

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»**

КОЗУБ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 004.942:629.7.014-519(043.5)

**МЕТОДОЛОГІЯ СИНТЕЗУ УПРАВЛІННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ
СИСТЕМОЮ АВТОНОМНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Спеціальність 05.22.13 – навігація і управління рухом

**Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук**

Київ–2026

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, м. Київ.

Науковий консультант: Роботу виконано без консультування

Офіційні опоненти: **ОБІДІН Дмитро Миколайович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри аерогідродинаміки Національного аеро-космічного університету «ХАІ»

БАРАБАШ Олег Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГЕРАСИМЕНКО Володимир Вікторович, доктор воєнних наук, начальник кафедри авіації Національного університету оборони України

Захист відбудеться « ____ » _____ 2026 року об ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 в Національному університеті «Київський авіаційний інститут» (зала засідань – каб. 6-102) за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитися на офіційному сайті <http://asdoc.nau.edu.ua/> та в Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Київський авіаційний інститут» за адресою: 03058, Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корпус 8б, каб. 20.

Реферат розіслано « ____ » _____ 2026 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради 26.062.03
кандидат технічних наук, доцент

Юлія Квач

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом можливості з застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розширюються [1–4]. Водночас одним з найцікавіших напрямів, що розвиваються у світі, є напрям, пов'язаний із забезпеченням групового руху роботів під час виконання колективних операцій, які з різних причин не можуть бути виконаними окремими апаратами.

Низку питань керування груповими діями рухомих апаратів, що функціонують на землі, у воді, повітряному просторі, вивчали дослідники в різний час, про що свідчать численні джерела.

Огляд наукових публікацій свідчить про те, що на сьогодні напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики управління об'єктом багатопозиційної системи з використанням безпілотних технологій.

Це підтверджується проведеними дослідженнями і працями в області застосування безпілотних систем для завдань моніторингу таких вчених, як Артюшин Л. М., Красовський О. А., Коврижкін О. Г., Кунцевич В. М., Кучеров Д. П., Машков О. А., Мосов С. П., Попов І. О., Соколов А. Ю., Харченко В. П., Синєглазов В. М., Craig Reynolds, David Ward, Brian L Stevens., Frank L Lewis., E. Raymond, Авраам Карем, Ян Хе Кван, Якобсен М. В., Хюн Ен Мока, Бен М. Чен, Ліхуа Се, Девід П., Осама Хатіб, Бруно Сициліано та ін.

Згідно з розглянутими до дослідженнями існують три моделі управління групою, а саме з лідером, з віртуальним лідером та без лідера. На практиці найчастіше застосовуються моделі без лідера, у яких безпечний політ і виконання завдання групи за призначенням забезпечується рознесенням елементів групи в просторі та за часом. Перші дві моделі використовуються обмежено. Це пов'язано із складністю організації управління і взаємодії між елементами групи для першої моделі і складністю реалізації ефективного управління віртуальним лідером на великих відстанях відносно оператора системи та залежить від його підготовленості.

Об'єктом управління вважається група БПЛА, яка складається з окремих літаків, які називають агентами або елементами групи. Тому природно виникають завдання щодо побудови адекватної математичної моделі ЛА, як елемента групи, управління в групі, яке гарантуватиме безпечну їх взаємодію, та оцінювання підготовленості оператора. Зазвичай розглядаються дії малої групи, розмір якої може бути масштабовано.

Інформаційні та комунікаційні технології є пріоритетними напрямками розвитку в Україні до 2034 року, як зазначено у Законі України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності» від 13.01.2024 № 3534-IX. Унаслідок виконання цього закону та загальносвітових трендів відбувається інтеграція інформаційних технологій в усі галузі діяльності людини, зокрема і в аерокосмічній галузі.

У дисертаційній роботі розв'язується наукова проблема розроблення методології синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів під час виконання колективних дій за наявності штучних та

природних перешкод при виконанні завдань за призначенням за мінімальний час на прийняття рішення. В дисертаційній роботі ставиться завдання забезпечити функціонально стійке управління групою БПЛА за мінімального часу виконання завдань системою, що охоплює оператора та БПЛА, які складають групу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження в дисертаційній роботі проводилися в рамках Закону України «Про Національну програму інформатизації», Указу Президента України від 22 березня 2017 року № 73/2017 «Про Державну програму розвитку Збройних Сил України на період до 2020 року», Указу Президента України від 14 березня 2016 року № 92/2016 «Про Концепцію розвитку сектору безпеки і оборони України». Напрям дослідження роботи пов'язаний з виконанням низки науково-дослідних робіт, в яких автор приймав участь: шифр «САТУРН» (№ ДР 0117U000086), шифр «ПЛУТОН» (№ ДР 0121U112700), шифр «Стратосфера-Р» (№ ДР 0116U000034).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності застосування багатопозиційної системи, яка складається з окремих безпілотних повітряних об'єктів, завдяки забезпеченню функціонально стійкого управління за комплексного підходу до управління групою БПЛА під час виконання завдань за призначенням.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати такі наукові завдання:

1. Обґрунтувати доцільність застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для визначення типових завдань та показників ефективності функціонально-стійкого управління і перспективи.

2. Розробити математичні моделі дистанційно пілотованих літальних апаратів літакового і квадрокоптерного типів та визначити особливості їх параметрів з технологією врахування аеродинамічних характеристик безпілотних систем (БПС) для порівняння результатів моделювання з натурними результатами експерименту.

3. Синтезувати закони управління рухом як окремого БПЛА, так і групи та розробити алгоритм формування маршруту БПЛА.

4. Розробити технологію оброблення інформації під час керування БПС у тріаді «група-борт-оператор» для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором.

5. Побудувати систему групового управління БПЛА, що допоможе значною мірою усунути недоліки наявних технічних рішень за рахунок підвищення ефективності використання БПЛА, а саме: можливість коригування плану та оптимізації маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання завдання; значний виграш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА, зважаючи на ефективність топології груп.

6. Розробити методологію виконання моніторингу групою БПС у разі зміни координат у динамічному середовищі для використання як у народному господарстві, так і для виконання завдань в інших галузях економіки та дослідити структуру модернізованої багаторівневої системи управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління під час виконання групових завдань.

Об'єкт дослідження – процес управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів.

Предмет дослідження – науково-методологічний апарат теорії управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів за комплексного підходу, який містить БПЛА, групу БПЛА та оператора.

Методи дослідження. Для розв'язання поставленої в дисертаційній роботі проблеми використано такі методи: аналіз і синтез методів управління системою автономних повітряних об'єктів під час виконання типових групових завдань для функціонально стійкого управління; методи оптимального управління системою автономних повітряних об'єктів з відомими параметрами; метод оброблення інформації під час керування БПС з використанням комбінації нейронних мереж у процесі побудови траєкторії польоту БПС; методи адаптації; метод навчання нейронної мережі для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, нечіткої логіки в умовах невизначеності, що дає змогу формалізувати якісну інформацію, використовуючи її в процесі прийняття рішень для створення системи правил, що допомагають аналізувати результати роботи системи.

Дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.22.13 – навігація і управління рухом за пунктами, а саме: дослідження закономірностей процесів навігації й управління рухом, розроблення методів і засобів управління рухом і орієнтації транспортних засобів і їх потоків; принципи формування та використання фізичних і інформаційних полів для навігації, спостереження й управління рухом; структурний аналіз і синтез динамічних складних систем і процесів у них, а також ієрархічних, полієргатичних систем навігаційного обслуговування, їх оптимізація й ідентифікація.

Отже, тема дисертаційної роботи «Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів» вважається актуальною. Під багатопозиційною системою розуміємо систему, в якій кілька просторово-рознесених позицій (стаціонарних та рухомих) працюють спільно для виконання завдань за призначенням.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше запропоновано метод управління рухом мультиагентної системи, агентом якої є БПЛА, обладнаний засобами вимірювання та управління, який на відміну від наявних містить не тільки похибку відхилення групи від заданого маршруту, а й ще два спеціальні сигнали, які є похідними від потенціальних енергій притягання агентів і їх відштовхування від сусідів і перешкод, що гарантує цілісність і безпеку в процесі руху. Закон керування передбачає також зміну

конфігурації групи під час долання перешкод, за яким цілісність і розмір групової структури не втрачаються, що дає змогу виконувати завдання групової поведінки та навігації в динамічному середовищі.

2. Уперше розроблено метод управління БПЛА квадаторного типу завдяки введенню гібридної адаптивної системи керування для забезпечення точного відтворення бокового руху апарата, який на відміну від відомих містить різні закони управління, утім грубий канал забезпечує мінімізацію помилки відхилення від заданої траєкторії за мінімальним часом керування, що дає змогу швидко переміщати фазові координати об'єкта управління в область досяжності точнішого каналу, який функціонує за пропорційним законом керування.

3. Уперше запропоновано метод налаштування пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД)-контролерів градієнтного типу за умов апріорної невизначеності параметрів математичної моделі з адаптивним кроком налаштування, у якому на відміну від наявних локальні мінімуми вилучаються оптимізацією кроку зміни шуканих параметрів з використанням множників Лагранжа, що дає можливість отримати обчислювальну простоту, швидкість збіжності, можливість онлайн-налаштування в реальному масштабі часу.

4. Удосконалено метод формування маршруту БПЛА на основі кривих Без'є, який відрізняється від наявних мінімальною кількістю маршрутних точок, що забезпечує гладкість траєкторії та прийнятні значення кривизни при збереженні властивості інваріантності до масштабування.

5. Набув подальшого розвитку метод оброблення інформації під час керування БПС для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, який відрізняється від наявних оцінюванням каналу завантаження для встановлених методів керування потоком. Керування потоками має відбуватися за схемою ARQ, яка надає можливість селективного вибору та максимальної пропускної здатності приймальному каналу.

6. Удосконалено багаторівневу структуру багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів завдяки поєднанню різних схем адресації, що забезпечує ефективну взаємодію агентів у мультиагентній системі, яка дає змогу підвищити точність та оперативність виконання завдань такою системою, а також адаптивно змінювати конфігурацію рою завдяки введенню механізму консенсусу.

7. Набула подальшого вдосконалення побудована система групового управління БПЛА, що приводить до підвищення ефективності використання БПЛА, яка відрізняється функціональною стійкістю управління під час виконання типових завдань, що дає змогу коригувати план та оптимізацію маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання завдання; значний виграш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА зважаючи на ефективність топології груп.

8. Зазнала подальшого розвитку методологія виконання моніторингу групою БПС в динамічному середовищі, яка відрізняється визначенням точного місцезнаходження групи БПЛА і ступенем виконання завдання на основі загальних даних групи та допомагає визначити кращий сценарій для кожного агента під час виконання завдання групою. Запропонована методологія може бути використана в народному господарстві у процесі виконання різних завдань, що допомагає під час виконання колективних дій багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів забезпечити прийняття рішення за мінімального часу.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи дають змогу:

1) формалізувати процес застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління під час реалізації групового польоту БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу;

2) забезпечити точне відтворення бокового руху апарата завдяки двоканальній системі керування БПЛА квадаторного типу;

3) здійснити налаштування ПД-контролерів для керування рухом квадатора за умов апіорної невизначеності математичної моделі, квазіоптимальний режим роботи якого поступається оптимальному режиму лише на 3 %, та підвищити швидкість налаштування параметрів ПД-контролерів, яка порівняно з вбудованим алгоритмом пакету Simulink швидше на 4 %;

4) розробити методи та моделі безпечної взаємодії на основі введення в закон керування ефекту «потенційного поля», яке реалізовує ідею притягування та відштовхування агентів групи;

5) підвищити ефективність застосування БПЛА завдяки спеціальній підготовці операторів, що спрямована на зменшення помилок під час виконання завдань за призначенням.

Основні результати роботи реалізовані у:

Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України за замовленням Департаменту військово-технічної політики, розвитку озброєння та військової техніки Міністерства оборони України під час підготовки звітних матеріалів науково-дослідної роботи, шифр «Стратосфера-Р» (акт від 15.09.2016 р.); Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 18.08.2022 р.); Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ під час підготовки звітних матеріалів за темою НДР «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоecosистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216, акт від 10.09.2024 р.); навчальному процесі Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» у дисциплінах «Мультиагентні системи управління» та «Інтелектуальні системи управління в авіації» (акт від 11.09.2024 р.); освітньому процесі Національної академії оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем у

навчальній дисципліні «Організація застосування спеціальних комплексів для виконання завдань розвідки» (акт від 07.10.2024 р.); ТОВ «Аерокосмічне агентство «Магеллан», м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційного дослідження отримані особисто [21, 23]. У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: проаналізовано напрями застосування БПЛА в інтересах Збройних Сил України та їх тенденції [1]; проведено порівняльний аналіз застосування космічних систем дистанційного зондування Землі та БПЛА для виконання завдань спостереження [2]; проаналізовано досвід використання космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах та перспективи їх розвитку [3]; досліджено застосування безпілотних літальних апаратів під час виконання колективних дій [4]; уперше розглянуто завдання термінального керування системами з мінімальним часом перехідного процесу в умовах параметричної невизначеності інтервального типу та наявності обмежених перешкод у каналах вимірювання фазових координат, а також методи, що дають гарантоване їх вирішення [5]; досліджено термінальне керування динамічною системою третього порядку в умовах обмежених перешкод [6]; розглянуто розв'язання проблеми керування групою БПЛА, що рухаються за заданим маршрутом з використанням гладкого закону руху групи з введенням контрольованої компоненти для надання гарантій безпеки руху [7]; проведено синтез закону керування перемиканням для автопілота квадрокоптера [8]; розглянуто оцінювання підготовки оператора-пілота в конфліктній ситуації [9]; розглянуто стабілізацію просторового положення квадранта методом бекстепінгу [10]; проведено планування траєкторій декількох БПЛА з урахуванням мінімальної довжини маршруту БПЛА в умовах обмеження на криву, заснованого на кривих Без'є [11]; розроблено спосіб формування маршруту безпілотного літального апарата [12]; розроблено алгоритм керування мультиагентною системою в потенційному полі [13]; досліджено керування групою БПЛА, що рухаються за законом керування з гладкою функцією часу з фіксованими перешкодами [14]; запропоновано інтеграційний підхід до вибору маршруту групи БПЛА [15]; проведено реконфігурацію мультиагентних систем в умовах завад [16]; розроблено алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера під час керування динамічними об'єктами [17]; проведено аналіз варіантів структур побудови груп безпілотних літальних апаратів під час виконання колективних завдань [18]; проаналізовано засоби збору інформації (зважаючи на БПЛА) для геоінформаційних систем [19]; визначено завдання векторної оптимізації комплексу засобів оптико-електронного спостереження для аерокосмічного моніторингу лісових масивів [20]; розроблено методику обґрунтування комплексу засобів моніторингу лісових пожеж [21]; опрацьовано методику векторної оптимізації складу комплексу оптико-електронної апаратури для виконання завдань моніторингу районів різної площі з використанням космічних та повітряних засобів [22]; проведено оцінювання бойових можливостей з радіозаглушення супутникового зв'язку з використанням БПЛА постановки

перешкод в операціях [23]; розроблено методику оцінювання стійкості структури системи супутникового зв'язку під час передавання інформації на БПЛА [24]; розглянуто загальний підхід до розрахунку показників інформаційного трафіка повітряної інформаційної системи [25]; запропоновано підхід, що ґрунтується на введенні узагальненого показника продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різномірних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами [26]. В усіх роботах, виконаних у співавторстві, співавтори брали участь в обговоренні результатів і підготовці публікацій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати дисертації, практичні висновки і рекомендації, одержані в ході роботи, доповідались на наукових конференціях і семінарах у Національному університеті оборони України імені Івана Черняхівського, апробовані та оприлюднені під час конференцій: III Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології, системний аналіз і моделювання соціоекологоекономічних систем» (м. Київ, 19–21 жовтня 2011 р.); V Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ПРТК-2012) (м. Київ, 15–16 травня 2012 р.); V Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» (м. Київ, 25–27 вересня 2012 р.); XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика/AUTOMATICS – 2012» (м. Київ, 26–28 вересня 2012 р.); XI Міжнародна конференція доповідей «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 9–11 жовтня 2012 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2013)» (м. Київ, 27–29 травня 2013 р.); XX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика / Automatics – 2013» (м. Миколаїв, 25–27 вересня 2013 р.); X наукова конференція «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 9–10 квітня 2014 р.); V міжнародна науково-практична конференція «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики» (м. Луганськ, 5–8 травня 2014 р.); VII науково-технічна конференція «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення» (м. Київ, 23–24 жовтня 2014 р.); XX Всеукраїнська науково-практична конференції «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення» (м. Житомир, 28 листопада 2014 р.); науково-практична конференція «Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем» (м. Львів, 29 листопада 2014 р.); науково-практична конференція «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період» (м. Київ, 25 червня 2015 р.); 2015 IEEE 3rd International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)”, October 13–15, 2015; Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 7 квітня 2016 р.); 2016 IEEE 4th International conference «Methods and systems of navigation and motion control»(MSNMC) (October 18–20, Kiev); науково-практична конференція «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» (м.

Київ, 4 жовтня 2017 р.); 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2018). Kyiv, Ukraine. 24–27 May 2018; 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). October 16–18, 2018. Kyiv, Ukraine; IV Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 10 квітня 2019 р.); 2019 IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2019. October 22–24, 2019. Kyiv, Ukraine; CMiGIN 2019 (Conflict Management in Global Information Networks), Lviv, Ukraine, November 29, 2019; 2020 IEEE 6th International conference “Methods and systems of navigation and motion control”(MSNMC), October 20–23, Kiev, Ukraine; 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2021. October 19–21, 2021, Kyiv, Ukraine; VI Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 23 травня 2023 р.); VII Міжнародна науково-практична конференції «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 24 квітня 2024 р.); XV Міжнародна науково-практична конференції «Комп’ютерні системи та мережеві технології» (м. Київ, 25–26 квітня 2024 р.); 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine. 2025; VIII Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 30 жовтня 2025 р.); IX Міжнародна науково-практична конференція «Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 28 квітня 2026 р.).

Публікації. Наукові положення, висновки і рекомендації, які виносяться на захист, одержані автором особисто. З наукових праць, які опубліковані у співавторстві, в дисертації використані лише ті ідеї і положення, які є результатом власних досліджень здобувача. За результатами дослідження опубліковано 57 наукових праць, з них 2 колективні монографії, 24 наукові статті у фахових виданнях, із них 19 наукових статей у наукових фахових виданнях України, 6 наукових статей у виданнях, внесених до наукометричної бази даних Scopus; 30 праць (7 внесені до наукометричної бази даних Scopus), які засвідчують апробацію матеріалів дисертації; 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 401 сторінку, 88 рисунків, 14 таблиць і 45 сторінок використаних джерел із 363 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми дисертаційного дослідження, її сутність та сучасний стан, відбито зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено основні

положення, що виносяться на захист, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані щодо публікацій та апробації результатів, подано відомості про їх впровадження.

У першому розділі проаналізовано стан питань групового управління, обґрунтовано важливість та актуальність, виокремлено наукові завдання, які потребують виконання.

Завдання управління багатопозиційною системою повітряних об'єктів передбачає пошук точок інтересу, які являють собою результати уражень об'єктів, вогнища, завали, тощо, на території загальною площею S під час визначення масштабів екологічної катастрофи [21, 22]. Як узагальнений критерій виконання цього завдання виступає мінімум витрат часу та забезпечення точного виконання завдання

$$\min_{u_i} j = \int_0^T \sum_{i=1}^N [a_1 \|u_i(t)\|^2 + a_2 d_i(t) + a_3 \phi_i(t)] dt, \quad (1)$$

де a_1, a_2, a_3 – вагові коефіцієнти;

$u_i(t)$ – керувальні впливи;

$d_i(t)$ – відхилення від траєкторії або заданої точки;

$\phi_i(t)$ – ризик зіткнення з іншим БПЛА та перешкодами;

за умов

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f(x_i(t), u_i(t)), & i = 1, \dots, N, \\ u_i(t) \in U_i, & \forall t \in [0, T], \\ \|p_i(t) - p_j(t)\| \geq R_{\min}, \forall i \neq j, \\ p_i(t) \in P, & \forall t \in [0, T], \end{cases}$$

де $p_i(t) \in R^3$ – просторові координати i -го БПЛА в момент часу t ;

f – вектор-функція, що описує фізичні характеристики системи;

U_i – доступний простір керувальних впливів;

$R_{\min}$ – мінімально допустима відстань між БПЛА;

P – допустимий простір руху.

Для виконання поставленого завдання може бути використана група, що складається з n БПЛА. Група досліджує зону екологічної катастрофи паралельно за часом, контролюючи виділену ділянку траєкторії із загальною площею покриття

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (2)$$

де n – кількість БПЛА, $i = 1 \dots n$, $n \leq 5$.

Ефект (1) вважається досягнутим, якщо досліджена повністю вся територія з площею (2), достовірно виявлені вогнища катастрофи і своєчасно видана про них інформація на пункт управління, дані отримані від усіх БПЛА групи. Всі перелічені чинники можна трактувати як окремі події.

Через наявність випадкових і систематичних помилок, що виникають на кожному окремому етапі виконання завдання, критерій виконання завдання групою БПЛА набуває ймовірнісного змісту, тобто приріст ΔE стає мінімальним, якщо

отримана максимальна ймовірність P спільного прояву послідовності залежних подій. Унаслідок цього ефект (1) визначатимемо ймовірністю

$$P(ABC)=P(A) P(B/A) P(C/AB) , \quad (3)$$

де подія A полягає в дослідженні всієї території S , подія B – у виявленні всіх вогнищ катастрофи та своєчасному видаванні про них інформації на пункт управління, C – отриманні даних від усіх БПЛА; $P(A)$ – ймовірність успішного виконання події A ; $P(B/A)$ – умовна ймовірність виконання події B ; $P(C/AB)$ – умовна ймовірність виконання події C .

Застосування цього підходу дає змогу конкретизувати вихідні дані для виконання алгоритму управління, а саме склад групи, вимоги до апаратного забезпечення, вибору необхідного маршруту, встановлення вимог до взаємодії елементів групи на досліджуваній території [5, 6].

Проблемними питаннями, які природно виникають під час виконання зазначеного завдання, є управління окремим БПЛА, управління групою БПЛА, гарантування безпечних дій агентів групи і спроможність оператора адекватно діяти відповідно до ситуації, яка склалася у процесі виконання завдання за призначенням.

Одним із підходів, що може бути застосований під час виконання такого складного організаційно-технічного завдання, є побудова системи, що розглядається, як функціонально стійка, що забезпечить забезпечити розв'язання зазначених проблем.

Під функціональною стійкістю розглянутої організаційно-технічної системи розумітимемо її властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій у межах, установлених нормативними вимогами, що забезпечить виконання функціоналу (1). Особливо важливим є керування в умовах змін властивостей об'єкта керування або системи управління, що здійснюється в реальному масштабі часу, в експлуатаційних режимах об'єкта керування.

До властивостей функціональної стійкості групи належать: надійність керування, структурна компактність, ступінь централізованості та живучість групи, стабілізація взаємного положення безпілотних апаратів у групі, надійність реконфігурації та топології групи [16], надійність пропускну здатності каналу керування [26].

Отже, науково-технічна проблема, яка розглядається в дослідженні, полягає у відсутності методологічного та методичного апаратів забезпечення виконання завдань побудови функціонально стійких систем групового управління БПЛА, які б задовольняли вимоги сучасності і перспективи, розвитку сучасної практики групового управління БПС для забезпечення виконання завдань за призначенням, є актуальною.

У другому розділі подано розроблені математичні моделі безпілотних літальних апаратів та розглянуто особливості визначення їх параметрів, проведено дослідження проблеми синтезу закону оптимального керування часом з використанням динамічної моделі БПЛА як літакового [5, 6], так квадаторного типу [7], що являє собою систему диференціальних рівнянь із повністю відомими

параметрами за відсутності шуму в каналах вимірювання контрольованих координат у площині тангажа та крену. Мета дослідження – синтезувати закон керування, який забезпечує переміщення квадрантора з однієї точки в іншу в тривимірному просторі.

Узагальнену систему диференціальних рівнянь, що описують лінійну та обертальну динаміку об'єкта керування, можна навести у вигляді

$$\begin{vmatrix} mI & 0 \\ 0 & J \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \ddot{V} \\ \ddot{\Omega} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Omega \times mV \\ \Omega \times I\Omega \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F \\ M \end{vmatrix}, \quad (4)$$

де m – маса апарата; I – матриця інерції; J – матриця інерції ротора; F – сила, прикладена до переміщення планера в системі координат Землі; M – момент сил, діючих у центрі маси БПЛА, $V = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$, $\Omega = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$.

Розглядаючи основний тип руху, який полягає в подоланні сили тяжіння можна записати

$$F = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{vmatrix} \quad (5)$$

Змінними u_1, u_2, u_3 позначено сили, які забезпечують рух квадрантора. Вони можуть бути подані такими виразами

$$u_1 = M_1 + M_3 - M_4 - M_2 = k_1\Omega_1^2 + k_3\Omega_3^2 - k_4\Omega_4^2 - k_2\Omega_2^2; \quad (6)$$

$$u_2 = M_4 - M_2 = k_4\Omega_4^2 - k_2\Omega_2^2; \quad (7)$$

$$u_3 = M_1 - M_3 = k_1\Omega_1^2 - k_3\Omega_3^2. \quad (8)$$

У рівняннях (6)–(8) k_i – деякий коефіцієнт пропорційності, який зв'язує момент з кутовою швидкістю Ω_i . Детальніше рівняння динаміки, що описують поступальний рух БПЛА, мають вигляд

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{(I-I_3)}{I} \dot{\theta}(t)\dot{\psi}(t) - \frac{I_r}{I} \dot{\theta}(t)\Omega + \frac{c}{I} u_2(t); \quad (9)$$

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{(I-I_3)}{I} \dot{\psi}(t)\dot{\phi}(t) + \frac{I_r}{I} \dot{\phi}(t)\Omega + \frac{c}{I} u_3(t); \quad (10)$$

$$\ddot{x} = \bar{u}_1 (\cos(\psi) \sin(\theta) \cos(\phi) + \sin(\psi) \sin(\phi)) / m; \quad (11)$$

$$\ddot{y} = \bar{u}_1 (\sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\phi) - \cos(\psi) \sin(\phi)) / m. \quad (12)$$

У формулах (9)–(12) $\bar{u}_1$ є сумою M_i .

Оскільки вісь Z є віссю симетрії, а двигуни M_i однакові і жорстко закріплені на апараті, моменти інерції I_1 і I_2 дорівнюють один одному, тобто $I_1 = I_2 = I$.

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{1}{I} [(I - I_3) \dot{\theta}(t)\dot{\psi}(t) - I_r \dot{\theta}(t) + c u_1(t)]; \quad (13)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{I} [-(I - I_3) \dot{\psi}(t)\dot{\phi}(t) + I_r \dot{\phi}(t)\Omega + c u_2(t)]; \quad (14)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{1}{I} u_3(t), \quad (15)$$

де I_1, I_2, I_3 – моменти інерції квадрантора відносно осей X, Y і Z , що проходять через його центр маси відповідно; $\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ – кутові швидкості відносно осей X, Y і Z ; F_i – зовнішня сила; u_1, u_2, u_3 – механічні сили, що виробляються двигунами M_i ; t – час.

Якщо вважати, що тяги $u_1(t), u_2(t)$ обмежені амплітудою

$$|u_1(t)| \leq \bar{u}_1 = U, |u_2(t)| \leq \bar{u}_2 = U \quad (16)$$

та ввести нові позначення

$$\omega = \frac{I-I_3}{I} \dot{\psi}, \Phi = \dot{\varphi}, \Theta = \dot{\theta}, l = \frac{c}{I}, \quad (17)$$

а потім їх підставити в рівняння (18)–(19), отримаємо

$$\dot{\Phi}(t) = \omega \Theta(t) - \frac{l_r}{I} \Theta(t) \Omega + l \bar{u}_1(t) = \omega' \theta(t) + l \bar{u}_1(t); \quad (18)$$

$$\dot{\Theta}(t) = -\omega \Phi(t) - \frac{l_r}{I} \Phi(t) \Omega + l \bar{u}_2(t) = \omega' \Phi(t) + l \bar{u}_2(t). \quad (19)$$

Система рівнянь (18), (19) являє собою математичну модель квадрантора у формі системи диференціальних рівнянь другого порядку, яка далі буде використана для дослідження групового руху БПЛА. Особливістю моделі є наявність уявних коренів характеристичного рівняння, що задає нестійкий характер вільного руху. Ставиться завдання синтезу сигналів керування, що забезпечать потрібний рух у просторі фазових координат Θ і Φ .

Сигнали керування в системі рівнянь (18), (19) можна отримати, якщо застосувати принцип оптимального керування за часом в фазовому просторі координат Θ і Φ .

За цих умов фазовий простір координат Θ і Φ поділяється на чотири підпростори

$$S_1 = \{u_1(t) = U, u_2(t) = U\}, \quad S_2 = \{u_1(t) = U, u_2(t) = -U\}; \quad (20)$$

$$S_3 = \{u_1(t) = -U, u_2(t) = U\}, \quad S_4 = \{u_1(t) = -U, u_2(t) = -U\}. \quad (21)$$

Перемикання знака керування здійснюється відповідно до кривої

$$\mathfrak{Z} \equiv [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{Z}_{S_1}^j(\cdot)] \cup [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{Z}_{S_2}^j(\cdot)] \cup [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{Z}_{S_3}^j(\cdot)] \cup [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{Z}_{S_4}^j(\cdot)], \quad (22)$$

де $\mathfrak{Z}_{S_i}^j(\cdot) = \mathfrak{Z}_{S_i}^j(\Phi(t), \Theta(t))$, j – номер напівкільця, що є оптимальною траєкторією для пари вимірювальних координат Φ і Θ , $j = 0, 1, \dots, N$; N – кількість перемикань.

Отже, закон оптимального керування має вигляд

$$\bar{u}_1(t) = \begin{cases} +U, & \text{if } \mathfrak{Z}_{S_1}^j(\cdot) > 0, \mathfrak{Z}_{S_2}^j(\cdot) > 0, \\ -U, & \text{if } \mathfrak{Z}_{S_3}^j(\cdot) < 0, \mathfrak{Z}_{S_4}^j(\cdot) < 0, \\ \bar{u}_1(t-0), & \text{if } \mathfrak{Z}_{S_1}^j(\cdot) = 0, \\ \mathfrak{Z}_{S_2}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{Z}_{S_3}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{Z}_{S_4}^j(\cdot) = 0, \end{cases} \quad \bar{u}_2(t) = \begin{cases} +U, & \text{if } \mathfrak{Z}_{S_1}^j(\cdot) > 0, \mathfrak{Z}_{S_3}^j(\cdot) > 0, \\ -U, & \text{if } \mathfrak{Z}_{S_2}^j(\cdot) < 0, \mathfrak{Z}_{S_4}^j(\cdot) < 0, \\ \bar{u}_2(t-0), & \text{if } \mathfrak{Z}_{S_1}^j(\cdot) = 0, \\ \mathfrak{Z}_{S_2}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{Z}_{S_3}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{Z}_{S_4}^j(\cdot) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Закон керування (23) забезпечує оптимальний за часом рух керованого об'єкта в потрібну точку простору. Його особливістю є перемикальний характер, який задовольняє принцип максимуму, але керування будується у фазовому просторі, що вважається точнішим, оскільки керування здійснюється не за часом, а за вимірюванням реальних координат керованого об'єкта. Результати випробувань підтверджують результати моделювання щодо кількості перемикального керувального сигналу на рис. 1, 2.

Як альтернативний підхід розглядався варіант пошуку закону керування для БПЛА за моделлю (18), (19) із застосуванням *процедури бекстепінгу*. Розглянуто випадок, коли $\bar{u}_3 = \text{const}$ і без втрати загальності припустимо, що $\bar{u}_3 = 0$. Система (18), (19) множенням на $(l\omega)^{-1}$ кінцевого рівняння (18) і на коефіцієнт l^{-1} рівняння (19) переводить ці рівняння до еквівалентної форми

$$\dot{\alpha} = \beta; \quad (24)$$

$$\dot{\beta} = -(\omega')^2 \alpha + \bar{u}_4. \quad (25)$$

Тут використовуються вирази $\alpha = (l\omega)^{-1}\Phi$ і $\beta = l^{-1}\Theta$. Вводимо нову змінну $\beta = \kappa(\alpha)$, де $\kappa(0) = 0$. Далі розглянемо розв'язок системи з $\dot{\alpha} = \kappa(\alpha)$.

Вводимо кандидата функції Ляпунова, що задовольняє нерівність

$$\dot{L}_1(\alpha) = \frac{\partial L}{\partial \alpha} \dot{\alpha}(\alpha, \beta) \leq -W(\alpha), \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \quad (26)$$

де $W(\alpha)$ – позитивно визначена функція.

Нехай $e = \beta - \kappa(\alpha)$, тоді (24), (25) можна переписати у вигляді

$$\dot{\alpha} = \kappa(\alpha) + e; \quad (27)$$

$$\dot{e} = -(\omega')^2 \alpha + \bar{u}_4 - \dot{\kappa}(\alpha) = v, \quad (28)$$

де v – псевдорегульовальна змінна, яка стабілізує змінну α .

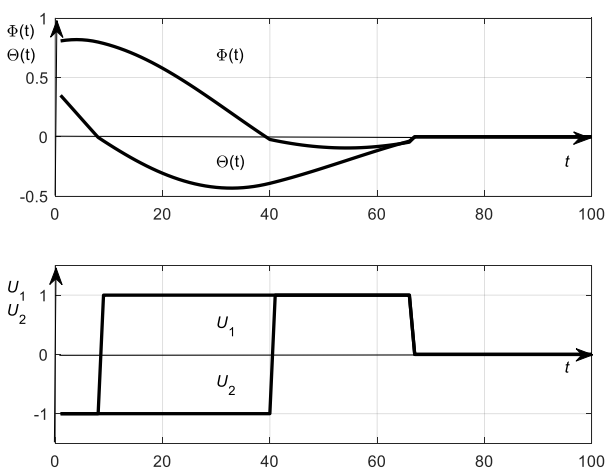


Рис. 1. Графіки змінних Φ , Θ , і U_1 , U_2 у часовій площині

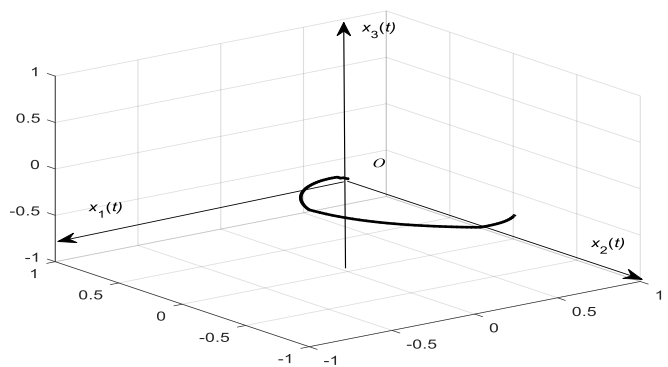


Рис. 2. Графіки змінних $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ у фазовій площині

Далі вводимо кандидата функції Ляпунова для (27), (28) і отримаємо

$$\dot{L}_2(\alpha) = \frac{\partial L}{\partial \alpha} \kappa(\alpha) + e v \leq -W(\alpha) + e v. \quad (29)$$

Вибираючи $v = -\lambda e$, отримаємо $\dot{L}_2 \leq -W(\alpha) - \lambda e^2$, де λ – параметр швидкісної збіжності процесу керування.

Отже, для $v, e, \kappa(\alpha)$ можна отримати закон керування за станом

$$\bar{u}_4 = (\omega')^2 \alpha + \frac{\partial \kappa(\alpha)}{\partial \alpha} \beta - W(\alpha) - \lambda (\beta - \kappa(\alpha)). \quad (30)$$

Дослідження було проведено для випадків, коли вхідний сигнал змінюється за ступінчастою, гармонічною функцією, а також проаналізовано просторову стабілізацію, яка зважає на взаємний вплив усіх чотирьох моментів квадрокоптера на траєкторію руху.

Проведено моделювання закону керування (23) для динамічної системи (24), (25) з параметром $\omega' = 42$ рад/с на інтервалі $T=10$ с, яке виконано в середовищі Matlab. На вхід динамічної системи подано одиничну ступінчасту функцію $\bar{u}_4 = 1(t)$. Стабілізація системи з параметрами закону керування (30) при $\lambda = 2$, $\lambda = 20$ показано на рис. 3, а і б. На цьому рисунку пунктирною лінією позначено вихід системи під час стабілізації за допомогою локального зворотного зв'язку.

Функція $\varepsilon(\lambda_i)$ корисна для оцінювання процедури (31), (32).

$$\varepsilon(\lambda_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Omega(\lambda_i) - \Omega^*|^2}, \quad (31)$$

де Ω_i, Ω^* – вимірювані та еталонні вектори кутових швидкостей відповідно, $1 \leq i \leq N$; N – кількість виконаних вимірювань; $\varepsilon(\lambda_i)$ – вимірювані та допустимі середньоквадратичні значення похибок вимірювань

$$\lambda \arg \min_{\lambda_i, 1 \leq i \leq N} \sqrt{\varepsilon(\lambda_i)}_{\max}, \quad (32)$$

де $\lambda_{\max} \leq \Lambda$ (Λ – границя стійкості), яка задовольняє $\varepsilon_{et} = \varepsilon(\lambda_{\max})$ і (30), (31). Формули (31), (32) встановлюють процедуру вибору достатнього значення λ для динамічної установки (24), (25).

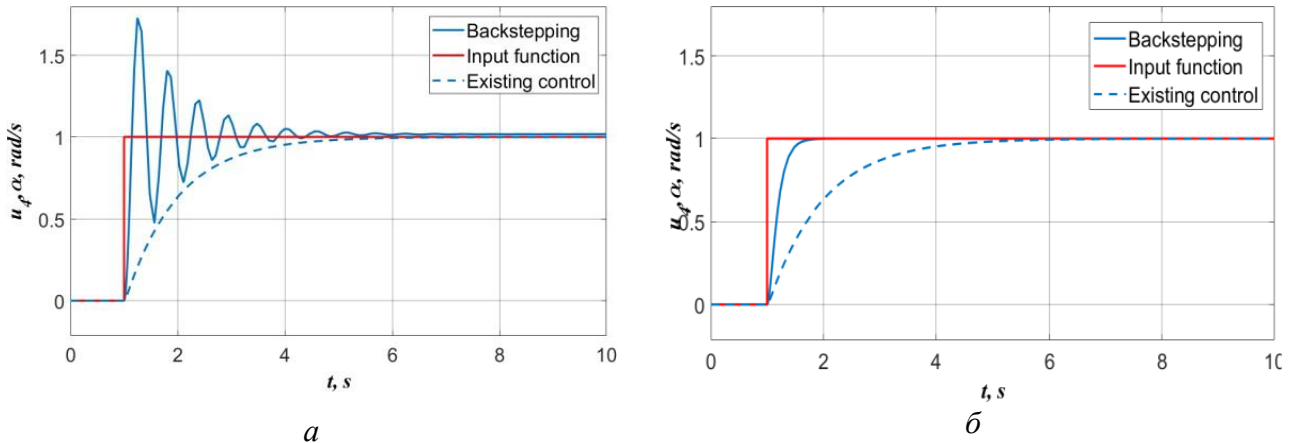


Рис. 3. Функції $\bar{u}_4(t)$ (червоний колір) та $\alpha(t)$ (синій колір) після стабілізації;
(а) $\lambda=2$ та (б) $\lambda=20$

Вхідний сигнал змінюється за гармонічною функцією з $\omega = 0,16$ рад/с, тобто $\bar{u}_4(t) = \sin \omega t$, дослідження для сигналу тривалістю $T=10$ с показано на рис. 4, а і б. Пунктирною лінією на рис. 4, б показано результат стабілізації за допомогою локального зворотного зв'язку.

Результати подані на рис. 5, підтверджують ефективність стабілізації систем з нелінійною динамікою. Аналіз рис. 4, 5 узгоджується з основним теоретичним результатом щодо стабілізації динамічної системи з нелінійною динамікою. Якість керування суттєво залежить від параметра λ . Аналіз закону керування (30), незважаючи на деяку складність аналітичного виведення, показує відносно просту технічну реалізацію, оскільки вона спирається на наявні в системі сигнали, що утворюють особливий тип зворотного зв'язку. Як видно з рис. 4, 5, регулятор за допомогою закону керування (30) компенсує початкову помилку, стабілізує неузгодженість кутових швидкостей крену, тангажа та ристання і підтримує їх значення рівними нулю.

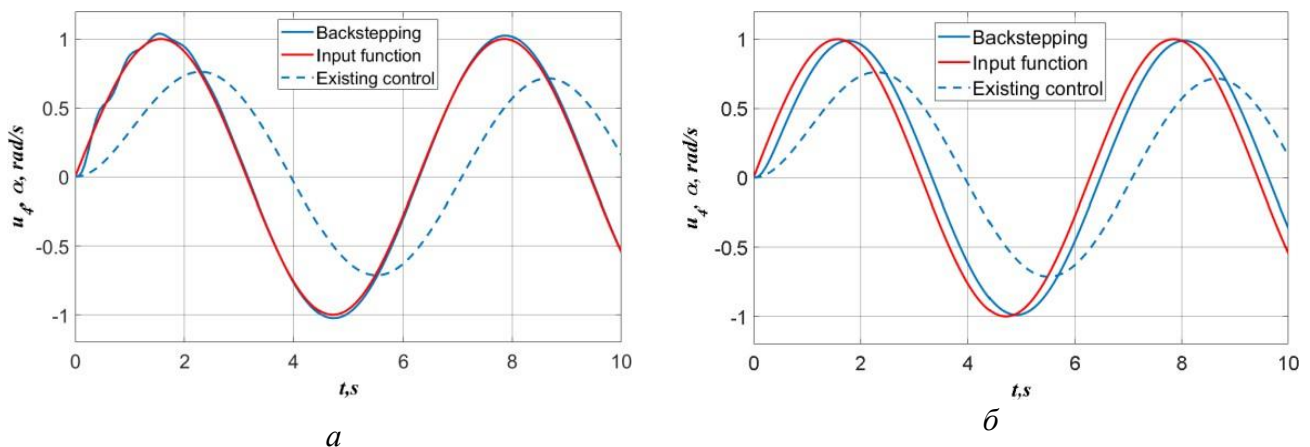


Рис. 4. Функції $\bar{u}_4(t) = \sin \omega t$ (червоний колір) та $\alpha(t)$ (синій колір) після стабілізації; (а) $\lambda=2$ та (б) $\lambda=20$

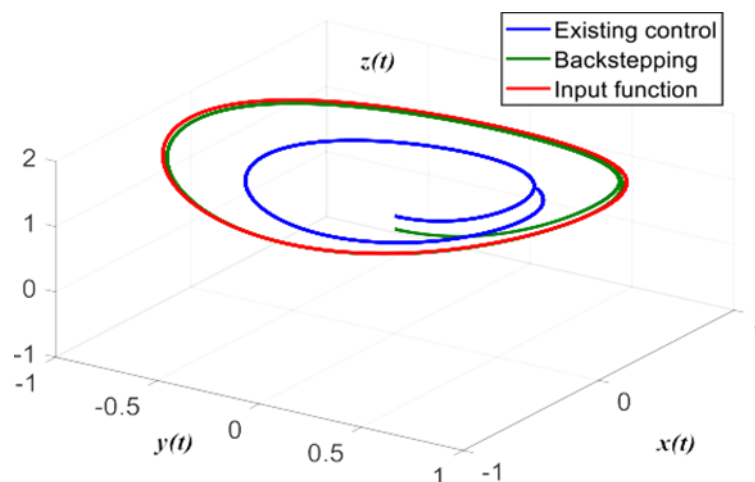


Рис. 5. Динаміка системи в 3D просторі

Застосування процедури (32) дає змогу отримати $\lambda = 10$ при $\varepsilon_{et} = 0,001$. У цьому дослідженні не беруться до уваги шуми в каналах вимірювання координат. Припускаємо, що врахування впливу шумів призводить до незначного погіршення

точності контролю, але ця проблема потребує розгляду. Система керування забезпечує відстеження квадрокоптером змінної вхідної величини для запропонованої математичної моделі. Тому доцільно реалізувати систему управління рухом як двоканальну, в якій закон керування (18), (19) забезпечує швидке переміщення в кінцевий стан, але з невеликою помилкою і тому є грубим каналом, а доведення об'єкта керування в кінцевий стан зі значно меншими помилками забезпечує точний канал керування, який будується за принципом зворотного зв'язку із ПІД-регулятором.

Вихідний сигнал j -го ПІД-контролера описується рівнянням

$$u_j(t) = k_{p_j} e(t) + \frac{1}{T_{i_j}} \int e(t) dt + T_{d_j} \frac{de(t)}{dt}. \quad (33)$$

У (33) $k_{p_j}, T_{i_j}, T_{d_j}$ – регульовані параметри ПІД-контролера, які визначають коефіцієнт передавання пропорційної, інтегрувальної та диференціальної ланок.

З метою подальшого синтезу введемо нову нотацію для коефіцієнтів пропорційності ПІД-контролера вигляду $q_{1_j} = k_{p_j}, q_{2_j} = 1/T_{i_j}, q_{3_j} = T_{d_j}$. Тоді (33) можна записати як

$$u_j(t) = q_{1_j} e(t) + q_{2_j} \int e(t) dt + q_{3_j} \frac{de(t)}{dt}. \quad (34)$$

Зазвичай на практиці використовують ручне налаштування параметрів ПІД-регулятора з використанням підходу Зіглера-Нікольса за розгінною кривою та подальшим підгоном параметрів на найкращий результат, але як показує досвід його застосування, це тривалий та не досконалий метод.

Знайдемо параметри налаштування ПІД-регулятора також ітераційним способом у процесі його функціонування, але так, щоб забезпечити виконання мінімуму функціоналу якості відносно помилки налаштування (35) у формі

$$I(q) = \sum_{i=0}^{\infty} e_i^2(q) dt \leq \varepsilon, \quad (35)$$

де e – вектор відхилення фазових координат керованої системи; ε – досить мала величина, $\varepsilon \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}$.

Ітераційна процедура налаштування параметрів ПІД-регулятора визначається виразом у формі

$$q_l = q_{l-1} + \varphi_{l-1}(h_{l-1}, p_{l-1}), \quad (36)$$

де q_l – значення вектора параметрів на l -му кроці; h_l – величина l -го кроку; p_l – напрямок зміни параметра на l -му кроці.

Умовою збіжності алгоритму є зменшення p_l , тобто $p_l^T = \nabla f_l < 0$, де f – функція, яка зменшується в напрямку p_l .

Як функцію $\varphi_l(h, p)$ в алгоритмі (36) використаємо знакову функцію вигляду

$$\varphi_l(h, p) = h \cdot \text{sign} \nabla f_l, \quad (37)$$

$$\text{sign}(\cdot) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(\cdot) > 0; \\ -1, & \text{if } f(\cdot) \leq 0, \end{cases} \quad (38)$$

де h – параметр, величина якого впливає на точність та швидкість збіжності алгоритму.

Пряме застосування функції $\varphi_l(h, p)$ з фіксованим значенням h

$$\varphi_l(h, p) = h \cdot \nabla f_l \quad (39)$$

приводить до методу градієнтного пошуку мінімуму функції (35).

Для збігу параметрів до мінімальної точки, крок апроксимації повинен бути змінений відповідно до умови

$$h_l = (q_l - q_{l-1}) \frac{\frac{\partial I(q_l)}{\partial q} - \frac{\partial I(q_{l-1})}{\partial q}}{\left\| \frac{\partial I(q_l)}{\partial q} - \frac{\partial I(q_{l-1})}{\partial q} \right\|}. \quad (40)$$

Якщо змінювати крок на початковій і кінцевій ділянках траєкторії, можна отримати метод найшвидшого спуску. Якщо далі зменшувати крок, то дістанемо вищу точність мінімального значення функціоналу. У цьому разі напрямок руху збігається з (39), але наступний крок пропонується виконувати за функцією

$$f(h) = I\left(q - h \frac{\partial I(q)}{\partial q}\right), \quad (41)$$

яка забезпечить подальшу мінімізацію (37).

У такий спосіб розв'язано задачу пошуку оптимальних параметрів ПД-контролера. Алгоритм розв'язування такий:

1. Обираються вільним чином початкові значення: $q_1, q_2, q_3 \in Q$; розмір кроку: $h_0 \in R^+ \setminus \{0\}$; параметри: $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in R^+ \setminus \{0\}$, $\varepsilon_2 \ll \varepsilon_1$.

2. Починаючи з $i = 1$, повторюється правило (36), збільшується $h = k h_0$, де k – ціла константа, поки задовольняється $I(q) \leq \varepsilon_1$.

3. Відшукуються нові значення q_i з новими параметрами h і ε_2 функціоналу (35), параметр h знаходиться мінімізацією (39).

Порівняння результатів моделювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати порівняння

Параметри	Алгоритм, що пропонується	Simulink
q_1 , rad/V	8,2936	1736
q_2 , с	0,253	88,68
Час зростання, с	1,1	0,0164
Час налаштування, с	2	0,132
Перевищення, %	4	13,4

Порівняння запропонованого алгоритму на основі градієнтного підходу з вбудованим алгоритмом пакету Simulink показало кращу швидкість збіжності запропонованого алгоритму налаштування параметрів ПД-регулятора відповідно до розробленої математичної моделі керування бічним рухом [8,10].

У третьому розділі репрезентовано узагальнений підхід до опису математичної моделі безпілотного літального апарата, показано особливості реалізації системи управління рухом на базі нейроконтролера типу «Adaline» Б. Уїдроу та особливості побудови маршруту БПЛА на основі обмеженої кількості точок з використанням кривих Без'є. Мета дослідження – вивчення руху БПЛА за маршрутом з нейроконтролерним керуванням.

Узагальнено підхід до проектування системи керування динамічним об'єктом з невідомими параметрами, який описується диференціальним рівнянням вигляду

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t), \quad (42)$$

у якому $x(t) \in R^n$ – вектор змінних стану; $u(t)$ – керувальний сигнал; A – $n \times n$ матриця та b – n -вимірний вектор, тобто

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ k \end{pmatrix}. \quad (43)$$

У (43) коефіцієнти $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}, k$ визначаються параметрами системи, конструктору системи заздалегідь невідомі. Передбачається тільки, що система (42) комплексного коріння не має, а коефіцієнти $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}, k$ можуть перебувати в інтервалах

$$\underline{a}_{ni} \leq a_{ni} \leq \bar{a}_{ni}, \quad \underline{k} \leq k \leq \bar{k}, \quad (44)$$

межі $\underline{a}_{ni}, \bar{a}_{ni}, \underline{k}, \bar{k}$ вважаються відомими.

Описаний підхід керування динамічним об'єктом можна реалізувати за допомогою приладу, який містить, як варіант конструктивного виконання, виконавчу частину, у складі нейроконтролера, релейного елемента, динамічного об'єкта; вимірювальний канал, який складається з датчика положення, датчика швидкості, обчислювача помилки; системи налаштування нейроконтролера, що складається з блоків кодування, блока пам'яті, обчислювача; логічного пристрою, у складі лічильника кількості перемикачів, фіксатора першого перемикачання, компаратора числа перемикачів, компаратора помилки, а також можуть бути залучені блоки зупинки та початкових установок.

Запропоновано підхід, згідно з яким підвищення ефективності налаштування вагових коефіцієнтів системи на відміну від системи “Adaline” Б. Уїдроу під час керування динамічним об'єктом полягає в тому, що досягається точність відпрацювання завдань із мінімальними часовими витратами та зменшується тривалість налаштування нейроконтролера завдяки додатковому контролю кількості перемикачів та використанню як навчальної точки – фазових координат точки першого перемикачання сигналу управління.

За цих умов навчання нейроконтролера відбувається за поточною лінією перемикачання $F(c, X(t))$, яка вибудовується на кожному кроці навчання.

Такий алгоритм налаштування, крім кращих характеристик відпрацювання об'єктом завдання, має додаткову можливість навчатися в процесі функціонування системи у разі зміни параметрів об'єкта, які виявляються, наприклад, під час зміни навантаження або його початкового стану. У разі постійно діючого завдання можна значно зменшити час навчання нейроконтролера за допомогою визначення помилкових ситуацій та дострокового коригування вагових коефіцієнтів нейроконтролера [17]. Пропонується реалізація нейроконтролера на платформі OrangePi.

Після завершення процесу налаштування отримано квазіоптимальний за швидкістю процес керування. На процес навчання нейроконтролера для динамічного об'єкта, який досліджено, витрачено п'ять ітерацій за початкового розладу вагових коефіцієнтів у 100 % [17].

Запропоновано застосування інтерполяційних многочленів для створення маршрутів БПЛА, побудованих на підставі заданих n -точок з координатами (x_i, y_i) , де $i = \overline{1, n}$, має вигляд

$$s(n) = \sum_{i=1}^n y_i \prod_{i \neq j} \frac{(x - x_i)}{(x_i - x_j)}. \quad (45)$$

Крива, побудована на основі (45), має коливальний характер. Це явище зумовлено тим, що побудована крива проходить через контрольовані точки, а в неконтрольованих крива може мати коливання. Пояснюється це особливістю подання інтерполяційного многочлена як суми ступеневих функцій. Для підвищення точності відтворення кривої слід додавати проміжні точки (наприклад, як-от дотичні до кривої), що підвищує громіздкість інтерполяційного многочлена.

У цьому разі інтерполяційний многочлен задається в параметричній формі вигляду [11, 12]

$$\begin{aligned} x &= s_x(t); \\ y &= s_y(t), \end{aligned} \quad (46)$$

де $t = \overline{0, 1}$. Тоді, для заданих n -точок многочлен Без'є записується у вигляді

$$\begin{aligned} s_x(t) &= \sum_{k=0}^n C_n^k t^k (1-t)^{(n-k)} x_i; \\ s_y(t) &= \sum_{k=0}^n C_n^k t^k (1-t)^{(n-k)} y_i, \end{aligned} \quad (47)$$

де x_i, y_i – площинні координати точок-орієнтирів p . Основні властивості кривої, що використані під час планування маршруту, побудованого на підставі многочлена Без'є.

Вирази

$$\begin{aligned} s(t) &= (1-t) \left[(1-t)^{n-1} x_0 + \sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^i t^i (1-t)^{n-i-1} x_i \right] \\ &+ t \left[\sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^{i-1} t^{i-1} (1-t)^{n-i} x_i + t^{n-1} x_i \right]. \end{aligned} \quad (48)$$

$$s(t) = (1-t)[(1-t)[(1-t)p_0 + tp_1] + t[(1-t)p_1 + tp_2] + t[(1-t)[(1-t)p_1 + tp_2] + t[(1-t)p_2 + tp_3]] = (1-t)[(1-t)R_1 + tR_2] + t[(1-t)R_2 + tR_3]; \quad (49)$$

$$R_i = (1-t)p_{i-1} + tp_i; \quad (50)$$

$$Q_{i-1} = (1-t)R_{i-1} + tR_i, \quad (51)$$

де $i = \overline{1, n-1}$ дають змогу побудувати алгоритм розрахунку кривої за многочленом Без'є (48)–(51).

В умовах прокладання маршруту з перешкодами на шляху проходження БПЛА, пропонується як координати точок-орієнтирів вибирати координати одиночних перешкод, беручи до уваги властивість (45) кривих, тобто маршрут не пролягатиме через перешкоду. Якщо перешкоди складні, тобто коли необхідно прокладати маршрут між перешкодами, пропонується як точки-орієнтири вибирати середню відстань між перешкодами.

Порівняльний аналіз алгоритмів формування маршруту БПЛА показує перспективність використання кривих Без'є, які застосовуються у векторній графіці під час створення ліній довільної форми. Основними перевагами кривих Без'є є обмежена кількість маршрутних точок, що задаються, інваріантність щодо операції масштабування, що допомагає зберегти форму кривої у разі зміни масштабу основи (карти), гладкість кривої і відсутність коливань між маршрутними точками-орієнтирами, що забезпечує задовільну кривизну траєкторії [11, 12].

Розглянутий підхід доречно використовувати в середовищі MissionPlanner під час побудови маршруту БПЛА.

У четвертому розділі розглянуто методологічні основи моделювання групового польоту, що передбачають: визначення основної конфігурації групи, яка має лідера, вимоги до дій групою БПЛА; зосереджено увагу на проблемі консенсусу до дій у групі; визначено сигнали управління, які дають змогу формувати функціонально стійке управління завдяки діям в створюваному сигналами управління потенціальному полі сил тяжіння та відштовхування, також запропоновано шарову структуру побудови системи управління. Отже, розглянуто багатоагентну систему (Multi-Agent System), що складається з кількох автономних інтелектуальних агентів, які взаємодіють між собою для досягнення спільної мети або кількох цілей. Кожен агент має свою мету, свої знання, свою логіку і може приймати рішення самостійно, але вони домовляються, узгоджують дії, вирішують конфлікти. БПЛА є агентами, які виконують колективні завдання.

За результатами наявних підходів до дій у групі, основну увагу зосереджено на безпілотних засобах, з огляду на напрацювання і положення для пілотованих засобів. Під час розгляду пілотованих засобів головний акцент зроблено на основних показниках безпечної дії, а саме інтервалах та дистанціях, які можна використати в безпілотних засобах.

У процесі керування безпілотними засобами виявлено такі способи організації дій у групі, які визначаються наявністю або відсутністю лідера, а саме: з лідером, без лідера. Організація дій групи БПЛА без лідера на перший погляд виглядає привабливішою завдяки виконанню великої кількості завдань, які визначаються окремим літальним засобам, безпека дій у групі гарантується рознесенням маршрутів у просторі та за часом. Але в цьому разі вимагається велика кількість часу на визначення окремого маршруту та контролю якості дій кожного літального засобу. Водночас кожний засіб має обмежені можливості, діє тільки самостійно, ймовірність загального виконання окремого завдання може виявитися не високою.

Для підвищення ймовірності виконання завдання бажано створювати групу, в якій є лідер. Усі члени групи виконують тільки одне завдання із забезпеченням визначених інтервалів та дистанцій. Але лідер стає вразливим елементом групи. У разі втрати лідера група дезорієнтована, вимагається деякий час для визначення лідера. Виявлена проблема може бути розв'язана, якщо група має віртуального лідера. Як віртуальний лідер може бути вибрано певну точку маршруту, наприклад, кінцеву. Отже, у дослідженні на підставі наведених чинників обрано конфігурацію групи з лідером.

Розглядається група БПЛА, яка складається з n агентів, що діють в евклідовому просторі $OXYZ$. Динаміка багатоагентної системи описується диференціальною моделлю інтегратора другого порядку в формі:

$$\ddot{p}_i(t) = k_i u_i(t). \quad (52)$$

У рівнянні (52) k_i – коефіцієнт, що описує реакцію i -го агента, $t \geq 0$ – час.

Введемо параметр $D_\varepsilon > 0$, який визначає розмір багатоагентної системи, що є її сукупністю для $\forall t \rightarrow \infty$, тобто

$$p_i \rightarrow D_\varepsilon(p_c). \quad (53)$$

Розглянемо випадок, коли лідер є агентом, розташованим у центрі групи, тоді його положення визначається рівнянням

$$p_c(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(t); \quad (54)$$

$$D_\varepsilon(p_c) = \{p \in \mathbb{R}^3: d = \|p - p_c\| < \varepsilon\}. \quad (55)$$

У (55) ε виступає як конструктивний параметр, що задає безпечну відстань між агентами.

Отже, формула (55) слугує критерієм цілісності групи. Слід зазначити, що конфігурація групи може змінюватися [16], але нерівність $D_{p_c} \leq D_\varepsilon(p_c)$ для групи має завжди виконуватися [7].

Передбачається, що група складається з ідентичних N -агентів, кожен агент інформує своїх сусідів у певний дискретний момент часу t_k , тоді структура комунікації в цей час описується графом $G_k = \{v, e(k)\}$, де v – безліч вершин графа; $e(k)$ – ребра графа у момент часу t_k . $E(k)$ зручно уявити $v \times v$ матрицею, в якій елемент (i, j) означає зв'язок i -го агента з j -м.

Вводиться кількість сусідів i -го агента $N_i = \{j | (i, j) \in e(k)\}$ у момент часу t_k . Введемо також матрицю A_k , яка є матрицею суміжності графа G_k і має відмінні від нуля елементи $a_{ij} > 0$, якщо $j \in N_i$, і $a_{ij} = 0$, інакше, тобто $j \notin N_i$. Матриця Лапласіана цього графа запишеться як $L_k = D_k - A_k$, де $D_k = d(i, j)_{N \times N}$.

$$d(i, j)_{N \times N} = \begin{cases} \deg(v_i), & \text{if } i = j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (56)$$

Закон керування залежить лише від інформаційної доступності i -го агента. Передбачається, що вимірний стан i -го агента визначається координатами положення швидкості вбудованими датчиками, передається найближчим сусідам з деякою дискретністю t_k .

Оскільки стан j -х об'єктів надходить у дискретні моменти часу, тому сам агент є дискретною системою. За цих умов система трансформується

$$\begin{aligned} p_i(t_k) &= p_i(t_{k-1}) + v_i^+(t_{k-1}); \\ v_i(t_k) &= v_i(t_{k-1}) + u_i^+(t_{k-1}), \end{aligned} \quad (57)$$

де $v_i^+(t_k) = v_i T$, і T – інтервал дискретизації, $t_k = kT$.

Вводимо вектори

$$x_i(t_{k-1}) = (p_i(t_{k-1}), v_i^+(t_{k-1})); \quad (58)$$

$$v_i(t_{k-1}) = (v_i(t_{k-1}), u_i^+(t_{k-1})). \quad (59)$$

Тоді розв'язок системи рівнянь у розширеному просторі станів має вигляд

$$x_i(t_k) = e^{AT} x_i(t_{k-1}); \quad (60)$$

$$v_i(t_k) = e^{A^+T} u_i^+(t_{k-1}), \quad (61)$$

де

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I_N \\ \alpha & \beta \end{pmatrix}. \quad (62)$$

Протягом інтервалу дискретності T систему (57) зручно подати в матричному вигляді

$$\dot{x}_i(\lambda) = Ax_i(\lambda) + Bu_i(\lambda); \quad (63)$$

$$y_i(\lambda) = Cx_i(\lambda) + Du_i(\lambda). \quad (64)$$

Тут A – матриця агента розмірністю $n \times n$; B – матриця управління чи входу розмірністю $n \times m$; C – матриця виходу розмірністю $l \times n$ і матриця компенсації D розмірністю $l \times m$, де m – число входів; l – число виходів; n – розмір вектора стану агента. Час λ змінюється від 0 до T . Якщо $kT < t < [k+1]T$, то $\lambda = T - kT$. Початкові умови для i -го агента, що описуються рівняннями (63), (64) знаходяться з рівняння

$$x_i(kT^+) = G_x x_i(kT) + G_u u_i(kT), \quad (65)$$

де $x_i(kT)$ та $u_i(kT)$ – значення вектора стану та вектора входу до моменту надходження нової інформації ($[k-1]$ -й період); $x(kT^+)$ – після отримання інформації (k -й період) i -го агента.

Матриці G_x , G_u показують зміну компонентів відповідних векторів під час надходження інформації.

На інтервалі розв'язок рівнянь (63), (64) дістанемо у вигляді

$$x_i(\lambda) = \Phi(\lambda)x_i(kT^+) + \int_0^\lambda \Phi(\lambda - \tau)Bu_i(\tau)d\tau, \quad (66)$$

де $\lambda = t - kT$; $\Phi(t) = e^{A\lambda}$. Переходячи від змінної λ до змінної t , отримаємо

$$x_i(t) = \Phi(t - kT)x_i(kT^+) + \int_{kT}^t \Phi(t - \tau)Bu_i(\tau)d\tau. \quad (67)$$

Відповідно, вектор виходу $y(t)$ отримаємо підстановкою вектора (68) у рівняння (65)

$$y_i(t) = C\Phi(t - kT)x_i(kT^+) + \int_{kT}^T \Phi(t - \tau)Bu_i(\tau)d\tau + D_{u_i}(t). \quad (68)$$

Рівняння (67), (68) визначають зміну вектора x_i i -го агента та його вихід в інтервалі $kT < t \leq (k+1)T$. Перехід від k -інтервалу $(k+1)$ -го здійснюється через рівняння (65), яке дає змогу отримати початкові умови $(k+1)$ -го інтервалу зміни вектора стану. Значення вектора $x([k+1]T)$ у кінці k -го інтервалу знаходять із виразу (67) при $t = (k+1)T$:

$$x_i([k+1]T) = \Phi(T)x_i(kT^+) + \int_{kT}^{(k+1)T} \Phi([k+1]T - \tau)Bu_i(\tau)d\tau. \quad (69)$$

Підставляючи вектор (70) та $u_i([k+1]T)$ у рівняння (66) знаходимо $x([k+1]T^+)$. Закон керування i -го агента має вигляд

$$u_i(t) = \alpha v_i(t_k) + \beta \sum_{j \in N} d_{ij}(k) (y_j(t_k) - y_i(t_k)), \quad (70)$$

де $t_k \leq t < t_{k+1}$, α , β – невідомі позитивні коефіцієнти, вибрані з умови забезпечення консенсусу та сталого керування.

Аналіз динаміки групи передбачає послідовну зміну стану кожного агента відповідно до алгоритму:

1. Введення вихідних даних i -го агента.
2. Розрахунок вектора виходу i -го агента з дискретністю T всередині k інтервалу.
3. Зміна початкових умов інтервалу kT .
4. Розрахунок вектора виходу $y(kT^+)$.
5. Перехід до нового інтервалу та п. 2.

Група з 10 ідентичних агентів діє в умовах обміну інформацією каналами керування близькими до реальних. Група відпрацьовує маневр однією з площинних координат, наприклад, за висотою. Для виконання протоколу параметри $\alpha = 1$, $\beta = 1$ вибрано за умови забезпечення сталого керування та заданого протоколу консенсусу. Агенти незалежно один від одного приймають рішення щодо формування керувальних впливів для відпрацювання маневру за мінімальний час.

Отже, протокол консенсусу [16], який є розв'язком системи диференціальних рівнянь другого порядку відносно позицій кожного агента групи, забезпечує злагоджену взаємодію групи.

Система керування агентом має засоби вимірювання та обчислювальні засоби, які дають можливість перетворювати результати вимірювань у сигнали, еквівалентні силам притягування і відштовхування. Сила тяжіння забезпечує цілісність групи, тоді як сили відштовхування допомагають уникати зіткнень один з одним і з перешкодами. Виникнення таких сил дає змогу нам підтвердити існування потенціальних енергій притягування і відштовхування.

Потенціальна енергія, що притягує, записується відповідно до виразу [7, 13]

$$E_{att}(\Delta p) = \frac{1}{2} \mu (\Delta p^2), \quad (71)$$

де $\mu > 0$ – масштабний коефіцієнт, а $\Delta p_i = \|p_i - p_c\|$ – евклідова відстань між агентом і лідером групи. Форма гомогенного поля потенціалу в полі агента-лідера має вплив найбільший на краях і ослаблений у центрі, де розташований лідер. Сила, що генерується цим полем, визначається виразом [6]

$$u_{att}(\Delta p) = -grad E_{att}(\Delta p) = -\mu(\Delta p). \quad (72)$$

Енергія відштовхувального поля має вигляд [22]

$$E_{rep}(\Delta p_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} v \left(\frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & \text{if } \Delta p_i \leq d_0 \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0 \end{cases} \quad (73)$$

У цьому виразі $v > 0$ також є масштабним коефіцієнтом, а $d_0 > 0$ – певна константа, що визначає мінімальну відстань до найближчого сусіднього агента. Форма цього поля має дію протилежну притягуванню, тому найсильніше відштовхування відбувається в центрі і слабке на краях області агрегації [14].

Аналогічно (73) подамо силу відштовхування за допомогою виразу

$$u_{rep}(\Delta p_i) = -grad E_{rep}(\Delta p_i) = \begin{cases} v \left(\frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{(\Delta p_i)^2} \frac{p_i - p_0}{d_0}, & \text{if } \Delta p_i \leq d_0, \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0, \end{cases} \quad (74)$$

де p_i – найближчий агент до p_0 або перешкоди p_M , і

$$d_0 = \max_{1 \leq i \leq N} |p_i - p_0|. \quad (75)$$

Розглянуто рух групи БПЛА по прямій частині траєкторії (рис. 6), рух на криволінійній частині траєкторії (рис. 7) та рух в умовах перешкод (рис.8).

Рух в умовах перешкоди є найскладнішим рухом [7, 14], оскільки потребує введення до закону керування додаткових елементів, заснованих на силах притягування і відштовхування.

Оскільки перешкоди розташовуються так, що група здатна подолати цей тип перешкод тільки в разі зміни конфігурації з виконанням умови (76) для агента-лідера:

$$p^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} p_i, \dot{p}^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} \dot{p}_i, \quad (76)$$

де $N^* = N-1$ – кількість сусідніх агентів в групі.

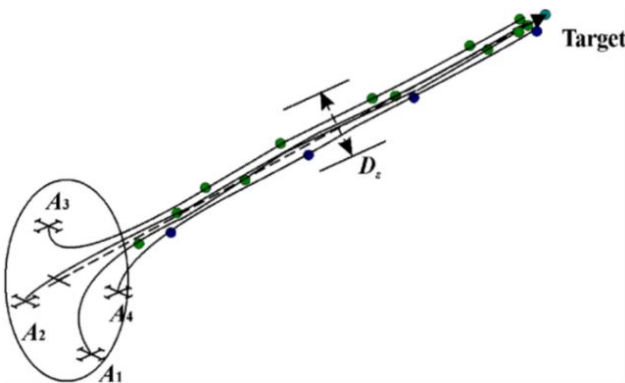


Рис. 6. Рух БПЛА вздовж лінії

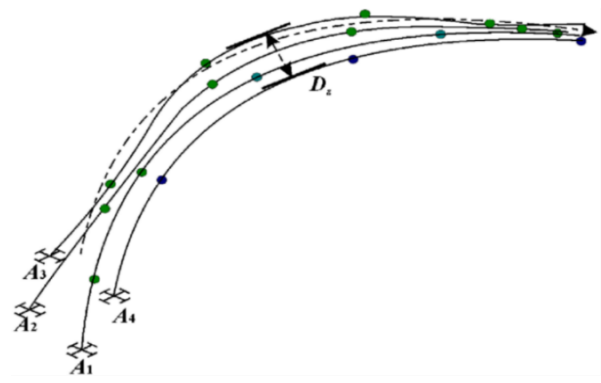


Рис. 7. Рух БПЛА по кривій

Деякі результати з управління групою в різних умовах подано на рис. 6–9.

У п'ятому розділі подано обґрунтування схеми оброблення пакетів під час передавання інформації оператору і основні вимоги до оператора з розробленим оцінюванням його діяльності на основі методу аналізу ієрархій зважаючи на суперечливі чинники.

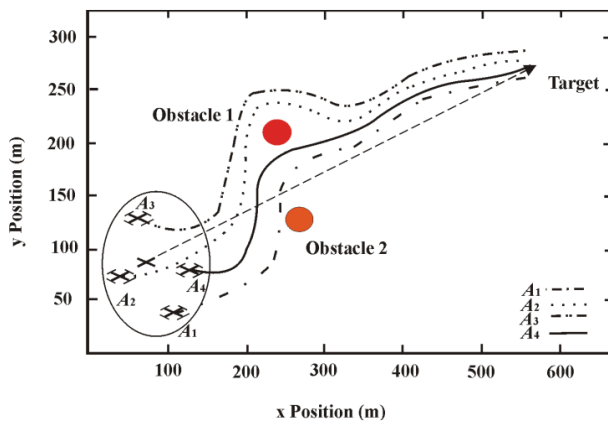


Рис. 8. Обхід руху агента-лідера і агента-члена до цілі

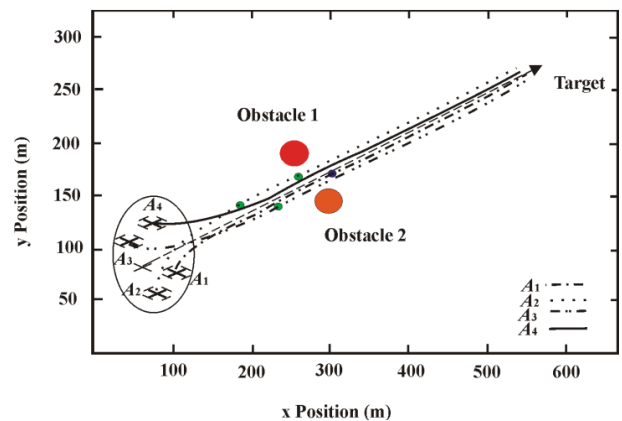


Рис. 9. Група БПЛА долає побічні перешкоди шляхом руху типу лінії

Під час керування діями групи БПЛА необхідно передавати великі обсяги інформації на наземну станцію управління.

Інформація передається пакетом, що спрощує оброблення інформації. Рух літака, збій обладнання, перешкоди на шляху поширення радіохвиль, деякі пакети даних можуть бути втрачені або, наприклад, може бути відсутнє підтвердження їх отримання.

Режим зупинки та очікування для повторних пакетів оцінюється як неефективний спосіб відновлення втрачених пакетів. У цьому разі канал зупиняється на тривалий час до отримання серії пакетів. Перспективнішим є використання вікна, яке ковзає у потоці інформації. Якщо повторити втрачену

інформацію у фіксованому вікні, можна покращити використання радіоканалу. На практиці режим вибіркової відмови також дає аналогію використання каналу [41]. Проблема, яка досліджується в цій роботі, полягає в порівнянні зазначених технологій з погляду переваги та отримання оцінок розміру розсувного вікна.

Усі БПЛА передають інформацію на наземну станцію управління в асинхронному режимі, тоді система оброблення вхідного потоку має вигляд

$$I = I_{UAV_1} + I_{UAV_2} + \dots + I_{UAV_n}, \quad (77)$$

де I_{UAV_i} – потік даних від i -го джерела та $i = \overline{1, n}$. Тут проблеми автоідентифікації, автентифікації не розв'язуються. Пакети від усіх БПЛА розглядаються як єдиний потік.

Основною проблемою під час передавання даних є рух БПЛА, невідповідність швидкостей оброблення в точках приймання та передавання, перевантаження буфера через пошук даних на низькій швидкості [25], повторне передавання даних на іншу адресу та помилки у процесі передавання даних. Отже, виникає необхідність контролювати потік даних.

Є кілька методів керування потоком даних. Серед них зупинка і очікування, повернення до M -кроків, вибіркова відмова. Останні два підходи відомі як механізм автоматичного повторення запитів (ARQ) [41]. Перша схема працює у такий спосіб: якщо відправник надіслав пакет, одержувач надсилає підтвердження про готовність отримати наступний пакет. У цьому разі маємо дві помилки. Одна помилка може виникнути через пакет передавання, а інша – через отримання підтвердження. За другою схемою відбувається введення «ковзного вікна» для передавання M -пакетів. Помилка в пакеті призводить до необхідності повторити його та наступні пакети, передані в цьому вікні. У разі вибіркового відхилення повторюються лише ті пакети, які були пошкоджені, і пакети, термін придатності яких закінчився. У всіх досліджуваних оцінках пропускну здатності ми припускаємо, що ймовірність помилок під час передавання пакетів даних становить $p = 10^{-3}$.

Робоче місце оператора – це пульт дистанційного керування, через який він управляє агентами на екрані дисплея. Тривала робота з консоллю висуває деякі конкретні вимоги до оператора. Основними серед них є реакція на подію, її точність, сприйняття та розуміння відображуваної ситуації з певною затримкою, придатність розуму та рук, що характеризується стресостійкістю, що визначається ступенем стійкості до негативних впливів та нештатних ситуацій.

Важливим моментом під час оцінювання дій оператора є вибір відповідних параметрів і метод оцінювання результатів його діяльності.

Час реакції оператора визначається годинами затримки сигналу t_i в i -му пристрої керування та затримкою сигналу від моменту розпізнавання оператором ситуації до відповідної реакції t_{del} , або

$$t = \sum_{i=1}^n t_i + t_{del}, \quad (78)$$

де n – загальна кількість елементів керування.

Затримка оператора перебуває в діапазоні 100...500 мс, що відповідає реакції геймера. Найкращим результатам відповідають менші значення.

Час експозиції τ ока оператора також визначається двома чинниками: здатністю помітити новий об'єкт, який світиться, і часом усвідомлення цього об'єкта.

Точність ϵ дій оператора визначається товщиною пристрою користувача та розміром плями на екрані, яку оператор повинен надійно перекривати пристроєм.

Рівень операторських помилок ν залежить від ступеня підготовленості, завантаженості, втоми внаслідок тривалої роботи. За експериментальними даними, одержаними під час оброблення візуальних сигналів [25], отримано такі результати: для початківців, які не мають досвіду, коефіцієнт помилок становить 0,27, для операторів, які пройшли 4 і більше тренінгів, – 0,018. Оскільки непідготовлених операторів, як правило, немає, максимальне значення показника можна взяти 0,15.

Показники, що оцінюються за бальною шкалою, до якої входять стресостійкість k , підготовленість Σ , далекоглядність λ , також можна визначити за категоріальною шкалою: відмінно, добре, задовільно, погано. Обравши цю шкалу за основу, можна скласти таку відповідність. Категорія «відмінно» оцінюється в 8–9 балів, «добре» – 5–7 балів, «задовільно» – 3–4 бали, «погано» – 1–2 бали.

Дотримуючись процедури [26] і формул

$$J = \sum_{i=1}^N \alpha_i \sigma_i, \quad (79)$$

$$J_{\min} = \max_{\alpha_i} \left(\frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i \sigma_i^+ + \frac{1}{m_2} \sum_{i=m_1+1}^{m_2} \alpha_i \sigma_i^- \right), \quad (80)$$

де α_i – i -й ваговий коефіцієнт, σ_i – i -й нормований параметр; $m_1 + m_2 = N$, у випадку розглянутих параметрів $N=7$.

$$\sigma_i = \frac{\bar{\xi} - \xi_i}{\bar{\xi} - \underline{\xi}}, \quad (81)$$

де ξ_i – вимірне значення параметра, $i = 1 \dots N$ (79) – (81). Накладено обмеження на вагові коефіцієнти

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1. \quad (82)$$

За допомогою методу ієрархічного аналізу були визначені ваги, які задовольняють умову узгодженості для вихідних матриць попарних порівнянь A .

Проведення розширеного дослідження безпілотних платформ підтверджує необхідність спеціальної підготовки операторів для обслуговування, експлуатації та виконання завдань за призначенням [9, 49].

У роботі запропоновано підхід, що ґрунтується на введенні узагальненого показника продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різномірних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами. Описаний метод є модифікацією методу аналізу ієрархій процесів, заснованого на ідентифікації однотипних показників, ефективність якого підтверджена

чисельними прикладами [26]. Розглянутий підхід може бути використаний під час сертифікації оператора після проходження процесу навчання.

У шостому розділі наведено пропозиції до реалізації багатопозиційної системи управління групою БПЛА на основі трирівневої архітектури [18], надано пропозиції щодо реалізації окремих елементів системи та виконання багатопозиційною системою безпілотних авіаційних об'єктів завдань за призначенням [19–24].

Архітектура системи керування побудована на основі поведінкових реакцій (Behavior-Based Architecture), яка має подання структури керувального алгоритму багатоканальної системи керування у вигляді сукупності щодо простих і за можливістю мінімально зв'язаних один з одним обчислювальних модулів, які формують поведінкові реакції за допомогою систем керування високого середнього та низького рівнів. Кожна поведінкова реакція відповідальна за виконання конкретного управлінського завдання.

Основою функціонування системи є розроблений узагальнений показник продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різномірних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами, який може бути використаний під час сертифікації оператора після проходження процесу навчання.

Нижній рівень системи управління ґрунтується на розв'язанні задачі стабілізації керування квадрокоптером, який має нелінійну динаміку. Система управління рухом БПЛА має бути побудованою на базі двоканальної системи управління, у якій грубий канал швидкий, а точний використовує ПД-контролери з можливістю градієнтного налаштування параметрів. Для її реалізації доцільно використовувати мікроконтролери на платформі OrangePi.

Для гарантування безпечної дії групи пропонується використовувати протоколи управління [16], що базуються на консенсусі з використанням двох спеціальних сигналів, які є похідними від потенціальних енергій притягіння агентів і їх відштовхування від сусідів і перешкод, що також гарантує цілісність групи.

Інформаційний обмін між БПЛА слід здійснювати в пакетному режимі з використанням механізму адаптованого передавання даних, заснованому на механізмі ARQ. Запропоновані моделі побудови маршруту з оцінюванням дій оператора доцільно використовувати в середовищах MissionPlanner, ArduPilot.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні розроблено теоретичні засади побудови групового управління БПЛА та викладено нові методи керування окремим апаратом, групою, оцінювання оператора та формування інтегрального алгоритму покращення виконання завдання моніторингу земної поверхні.

На основі отриманих результатів дослідження можна зробити висновки теоретичного, методичного та практичного характеру, серед яких головними є такі:

1. Під час проведення системних наукових досліджень, спрямованих на вивчення можливостей підвищення ефективності моніторингу, здобувачем

виявлено суперечність між вимогами до моніторингу і необхідними технічними характеристиками систем групового управління БПЛА, що дало змогу сформулювати науково-технічну проблему щодо відсутності методологічного та методичного апаратів забезпечення виконання завдань побудови економічно доцільних систем групового управління БПЛА, які б задовольняли вимоги сучасності і перспективи.

2. Унаслідок вивчення сучасних методів групового управління розв'язано наукову проблему, що полягає в необхідності розроблення методів забезпечення цілеспрямованих дій групи і гарантування безпеки взаємних дій на основі використання протоколу консенсусу, методів потенціального поля, нових методів управління нелінійними об'єктами тільки на основі поточної інформації про функціонування об'єктів групи, контрольованої за допомогою наявних вимірювальних засобів (датчиків), обґрунтовано мету та завдання дослідження.

3. Досліджені в роботі основні завдання систем групового управління, що виконують БПЛА, дали можливість визначити типові математичні моделі, які використовуються для оптимізації системи керування окремим апаратом, і знайти для них закони керування, які забезпечують мінімальний час і точність регулювання, а також визначити базовий математичний апарат аналізу та синтезу систем управління БПЛА як нелінійного об'єкта.

4. Основою математичного апарату аналізу і синтезу групового управління БПЛА є метод простору станів (фазової площини). Наведені в роботі алгоритми діють з вихідними даними в матричному (векторному) вигляді. Для розв'язання задачі побудови маршруту застосовано підхід на основі поліномів Без'є, що використовуються у векторній графіці під час створення ліній довільної форми, перевагою якого є обмежена кількість маршрутних точок, що задаються, інваріантність щодо операції масштабування, що допомагає зберегти форму кривої у разі зміни масштабу основи (карти), забезпечується гладкість кривої і відсутність коливань між маршрутними точками-орієнтирами, що гарантує задовільну кривизну траєкторії.

5. У дисертації розроблено алгоритми, призначені для виконання завдань стабілізації руху, які гарантують знаходження зображуваної точки керованого об'єкта в деякій околиці заданої траєкторії. Особливістю методів управління є стабілізація руху повздовж заданої траєкторії нестійких об'єктів, математична модель яких має нульові та уявні полюси. Математичне моделювання підтверджує ефективність розроблених алгоритмів, час регулювання в порівнянні з об'єктами, математична модель яких має негативні полюси, не гірше одиниць відсотків (2...4 % під час моделювання). Швидкодія досягається використанням спеціальних законів керування перемикального типу та навчання ПД-регулятора для керування математичною моделлю об'єкта управління з повністю невідомими параметрами.

6. Достовірність одержаних результатів підтверджено:

- логічністю запропонованих підходів до опису процесів функціонування систем управління;

- коректним використанням математичного апарату наукових методів, раніше апробованих для виконання завдань в умовах невизначеності;
- коректністю викладення запропонованих теоретичних положень;
- підтвердженням отриманих результатів під час проведення машинних експериментів на моделях-аналогах, що свідчить про достатню відповідність розроблених математичних моделей описуваним процесам. Розбіжність результатів машинних експериментів на розроблених математичних моделях не перевищує 10 %.

У процесі виконання завдання синтезу всі розроблені методи досліджувалися на збіжність шляхом оцінювання деякої квадратичної функції типу Ляпунова. Монотонно спадний характер цієї функції дає змогу стверджувати про збіжність запропонованих алгоритмів навчання.

7. Велике практичне значення мають програмні моделі, розроблені автором і подані в дисертаційній роботі, для розв'язання задачі моніторингу. Особливістю розроблених методів є індивідуальний підхід до проєктування системи автоматичного управління.

8. Унаслідок проведення експериментально-теоретичних досліджень на прикладі системи моніторингу математичного та імітаційного моделювання підтверджено ефективність результатів теоретичних досліджень, викладених в основній частині дисертаційної роботи; розроблена система інтегрованого типу забезпечує вигреш у часі в 2,52 рази, за точністю в 1,52 рази, збільшення ймовірності виконання завдання на 40 %.

9. Побудована система групового управління БПЛА має підвищену функціональну стійкість управління під час виконання типових завдань, що доцільно використовувати для виконання різних господарчих та промислових завдань.

Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи дають можливість:

- 1) формалізувати процес застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління при реалізації групового польоту БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу;

- 2) забезпечувати точне відтворення бокового руху апарата завдяки двоканальній системі управління БПЛА квадратного типу;

- 3) здійснювати налаштування ПД-контролерів градієнтного типу для керування рухом квадранта за умов апіорної невизначеності математичної моделі, квазіоптимальний режим роботи якого, поступається оптимальному режиму лише 3%;

- 4) підвищити швидкість збіжності розробленого алгоритму налаштування ПД-контролерів градієнтного типу на 4 % порівняно з вбудованим алгоритмом пакету Simulink;

- 5) розрахувати ефективність реконфігурації мультиагентної системи, яка відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виходу агентів з ладу приблизно у 2–5 разів;

б) підвищити ефективність застосування БПЛА, що підтверджує необхідність спеціальної підготовки операторів (які пройшли 4 і більше тренінгів та рівень операторських помилок яких становить 0,018) для виконання завдань за призначенням.

Результати дисертаційної роботи впроваджені для потреб Міністерства оборони України, Національної академії наук України, а також вищих навчальних закладів України, що підтверджується актами реалізації та впроваджені:

у Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України (НДР, шифр «Стратосфера-Р», акт від 15.09.2016 р.);

у Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 18.08.2022 р.);

в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України під час підготовки звітних матеріалів за темою НДР «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоecosистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216, акт від 10.09.2024 р.);

у навчальному процесі Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» у дисциплінах «Мультиагентні системи управління» та «Інтелектуальні системи управління в авіації» (акт від 11.09.2024 р.);

в освітньому процесі Національної академії оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем у навчальній дисципліні «Організація застосування спеціальних комплексів для виконання завдань розвідки» (акт від 07.10.2024 р.);

у ТОВ «Аерокосмічне агентство «Магеллан», м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025 р.).

10. Мета дослідження, яка полягала у підвищенні ефективності застосування багатопозиційної системи безпілотних повітряних об'єктів під час виконання групових завдань завдяки впровадженню запропонованої методології – досягнута, та всі часткові завдання виконані повністю. Наукові результати досліджень є внеском у теорію систем управління та інформаційних технологій під час управління груповим рухом БПЛА для виконання різних завдань.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Замичковський В. П., Козуб А. М., Шолохов С. М. Напрями застосування БПЛА в інтересах Збройних Сил України з урахуванням тенденцій ведення війн 6-го та 7-го поколінь: Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ЗСУ. 2011. Вип. № 2 (88). С. 45–55.

2. Зуйко В. В., Козуб А. М., Михалевич В. Е., Сучасний стан та тенденції розвитку космічних систем дистанційного зондування Землі провідних країн світу.

Науково-технічний журнал Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2015. №.2(6). С. 51–60.

3. Козуб А. М., Шумейко В. О., Зуйко В. В., Ніколаєнко О.Є. Аналіз досвіду використання космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах та перспективи їх розвитку. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ: НУОУ. 2018. № 3(33). С. 53–60. DOI: 10.33099/2311-7249/2018-33-3-53-60.

4. Kuchеров D. P., Kozub A. M., Dzhaferzade R. M. Bepilotnyie letatelnyie apparaty pri vyipolnenii kollektivnyih deystviy. MAA. Elmi Məcmuələr. 2014. Cild 16. № 1. S. 1–8.

5. Kuchеров D. P., Kozub A. M. Metodyi sinteza adaptivnyih sistem terminalnogo upravleniya. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 325 p.

6. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Термінальне керування динамічною системою третього порядку в умовах обмежених збурень. *Вісник інженерної академії України*. 2013. № 3–4. С. 95–99.

7. Automated systems in the aviation and aerospace industries. Chapter 7. Synthesis of the Laws of Motion Control of a UAV Group With Natural Obstacles / Dmytro Kuchеров, Minglei Fu Zhejiang, Andrei Kozub. • copyright 2019 • 486 pp (193–219) • Identifiers: LCCN 2018036333| ISBN 9781522577096 (h/c) | ISBN 9781522577102. DOI: 10.4018/978-1-5225-7709-6.ch007 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

8. Kuchеров D., Rasstrygin A., Sushchenko O., Zhdanov S., Kozub A. Synthesis of the switching control law for a quadrotor autopilot. *International Journal of Engineering & Technology* 7(4), 3065-3068, 2018, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.16368 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

9. Kuchеров Dmytro, Sushchenko Olga, Kozub Andrey, Petrov Anton. Assessment operator-pilot training in conflict situation. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019. Vol. 2588, pp.1–11. DOI: <https://doi.org/10.55056/ceur-ws.org/Vol-2588/paper1.pdf> (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

10. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Skrynkovskyy R. Stabilizing the spatial position of a quadrotor by the backstepping procedure. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* Vol. 23, No. 2, August 2021, pp. 1188–1199. ISSN:2502-4752, DOI:10.11591/ijeecs.v23.i2.pp1188-1199, (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

11. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Планування маршруту БПЛА. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2013. № 5(194). С. 189–192.

12. Кучеров Д. П., Голенківська Т. І., Жданов С. В., Рудаков В. І., Станіщук А. Б., Твердохлібов В. В., Козуб А. М. Спосіб формування маршруту безпілотного літального апарата: пат. на корисну модель 117211 зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26.06.2017.

13. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Костина О. М. Управління мультиагентною системою в потенціальному полі. *Науково-технічний журнал Центрального*

науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2017. № 2 (14). С. 55–61.

14. Kuchеров D., Kostyna O., Kozub A. Group of UAVs Moving on Smooth Control Law with Fixed Obstacles. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* Vol. 2, No. 3, 1034-1041 (2017), DOI: 10.25046/aj0203131 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

15. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА. *Штучний інтелект*. № 4 (62). 2013. С. 333–343.

16. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Голенковська Т. І. Реконфігурація мультиагентних систем в умовах завад. *Наука і оборона*. 2016. № 3. С. 52–58.

17. Дихтяренко В. Н., Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера при керуванні динамічними об'єктами. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2014. № 2(14Е). С. 27–35.

18. Бондарев Д. І., Джафарзаде Р. М., Козуб А. М. Ефективність групових польотів безпілотних апаратів: Зб. наук. пр. «Системи обробки інформації» Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2014. Вип. 6(122). 206 с. С. 9–14.

19. Козуб А. М., Суворова Н. О. Аналіз засобів збору інформації для геоінформаційних систем. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків: ХУПС. 2011. Вип. № 3 (27). С. 42–47.

20. Козуб А. М., Суворова Н. О. Оптимізація комплекту засобів оптико-електронного спостереження аерокосмічного моніторингу лісових масивів. *Авиационно-космическая техника и технология*. Харків: ХАІ. 2012. Вип. № 3. С. 108–112.

21. Козуб А. М. Методика обґрунтування комплекту засобів моніторингу лісових пожеж. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2014. № 4(211). С. 194–199.

22. Козуб А. М., Білобородов О. О. Обґрунтування комплекту оптико-електронної апаратури аерокосмічних засобів моніторингу. *Управління розвитком складних систем*. Вип. 21. Київ: КНУБА. 2015. С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2015.21>.

23. Козуб А. М. Оцінка бойових можливостей з радіоподавлення супутникового зв'язку з використанням БПЛА постановки перешкод в операціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ: НУОУ. 2014. № 3(21). С. 23–26. DOI: 10.33099/2311-7249/2014-0-3(21)-23-26.

24. Заклевський Д. Є., Зуйко В. В., Козуб А. М. Методика оцінювання стійкості структури системи супутникового зв'язку: Зб. наук. пр. «Системи управління, навігації та зв'язку». Київ: ЦНДІ Н і У. 2011. Вип. № 4 (20). С. 279–283.

25. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Оцінка пропускну здатності групи безпілотних літальних апаратів під час виконання завдання з моніторингу. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ: НУОУ. 2015. № 2 (23). С. 70–74. DOI: [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2\(23\)-70-74](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2(23)-70-74).

26. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Nakonechnyi V. Assessing the operator's readiness to perform tasks of controlling by the unmanned aerial platforms. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 2020, 5(4), pp. 457–462, <https://dx.doi.org/10.25046/aj050454> (проіндексовано в базі даних Scopus).

27. Козуб А. М., Пронь С. В. Огляд стану ринку безпілотних засобів, які можуть бути задіяні для охорони об'єктів від пожеж. III Міжнар. наук-практ. конф. «Інформаційні технології, системний аналіз і моделювання соціоекологоекономічних систем». – Київ: НАУ. 19–21 жовтня 2011 р. С. 219–220.

28. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Математична модель колективного впорядкованого руху БПЛА. V Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ПРТК-2012). Київ: НАУ. 15–16 травня 2012 р. С. 66–68.

29. Kozub A. M., Suvorova N. O., Pron' S. V. Optimization of a set of surveillance means for ground aerospace monitoring in agriculture and forestry. *V Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації космічні технології»*. Київ: НАУ. 25–27 вересня 2012 р. С. 7.36–7.40.

30. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Моделювання позовжнього руху в задачах групового керування безпілотними літальними апаратами. XIX Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика / AVTOMATICS – 2012». Київ: НУХТ. 2012. С. 322.

31. Kuchеров D., Kozub A. Path planning unmanned aerial vehicles in complex flight conditions. XI Міжнародна конференція доповідей «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». 9–11 жовтня 2012 р. Вінниця: ВНТУ. 2012. С. 179.

32. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Мультиагентний підхід до задачі вибору маршруту: матеріали VI Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2013)», 27–29 травня 2013 р. Київ: НАУ. 2013. С. 195–197.

33. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм керування обмеженою групою БПЛА: матеріали XX Міжнар. конф. з автом. управ. «Автоматика / Automatics – 2013», 25–27 вересня 2013 р. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 2013. С. 242–243.

34. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА: матеріали Міжнар. наук. молод. школи «ССИИ–2013». 23–27 вересня 2013 р. сел. Кацивелі, АР Крим, Україна. Донецьк: Інститут проблем штучного інтелекту, 2013. С. 144–146.

35. Козуб А. М. Аерокосмічні засоби оптико-електронного моніторингу стану лісових пожеж: матеріали V Міжнар. наук-практ. конф. «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики». 5–8 травня 2014 р. Луганськ: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2014. С. 134–136.

36. Козуб А. М. Використання методу організації колективного мультиагентного управління групою БПЛА для доставки вантажу: матеріали VII наук-техн. конф. «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та

мереж спеціального призначення». 23–24 жовтня 2014 р. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації державного університету телекомунікацій. 2014. С. 104–105.

37. Козуб А. М. Застосування групи БПЛА з використанням агентського підходу для вирішення завдання коригування вогню артилерії: матеріали науково-практичної конференції “Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії Сухопутних військ”, 5–6 листопада 2014 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного. 2014. С. 73–76.

38. Козуб А. М. Агентний підхід щодо рішення завдання постановки перешкод станціям супутникового зв’язку з використанням БПЛА: матеріали XX Всеукр. наук-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення». 28 листопада 2014 р. Житомир: Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова. 2014. С. 152–153.

39. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Іванов Б. П. Інформаційне забезпечення групового польоту БПЛА: матеріали наук-практ. конф. «Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем». 29 січня 2015 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного, 2015. С. 249–251.

40. Козуб А. М. Оцінка пропускнуої здатності групи безпілотних літальних апаратів при виконанні завдання моніторингу: матеріали наук-практ. конф. «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період». 25 червня 2015 р. Київ: Державний науково-дослідний інститут авіації. 2015. С. 36.

41. Kucherov D., Kozub A. Control System Objects with Multiple Streams of Information. Proceedings. 2015 IEEE 3rd International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)”, October 13–15, 2015. P. 290–293. DOI: 10.1109/APUAVD.2015.7346623 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

42. Козуб А. М., Шумейко В. О. Роль космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах: матеріали міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 7 квітня 2016 р. Київ: НУОУ. 2016. С. 124–126.

43. Kucherov D., Kozub A., Kostyna O. Group behavior of UAVs in obstacles presence. 2016 IEEE 4th International conference «Methods and systems of navigation and motion control»(MSNMC), October 18–20, Kiev Ukraine, p. 51–54. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783104 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

44. Козуб А. М., Шумейко В. О., Кащишин О. Л. Методика планування застосування безпілотних авіаційних комплексів на основі результатів оброблення даних космічної розвідки: матеріали наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 5 квітня 2017 р. Київ: НУОУ. 2017. С. 116–119.

45. Варламов І. Д., Козуб А. М., Шумейко В. О. Аналіз технологій застосування Україною даних космічного і повітряного спостереження Збройними Силами

України: матеріали наук-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи». 4 жовтня 2017 р. Київ: Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України. 2017. С. 84–86.

46. Kuchеров D., Kozub A. and Rasstrygin A., "Setting the PID Controller for Controlling Quadrotor Flight: a Gradient Approach", 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 2018, pp. 90–93. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576294 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

47. Kuchеров D., Kozub A. Model of UAV as agent of multiagent system. 2018 IEEE International Conference of Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2018), 2018, pp. 343–347. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409156. **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

48. Зуйко В. В., Козуб А. М., Павлушко М. Я. Взаємодія космічних систем та безпілотних авіаційних космічних систем для виконання завдань розвідки та ураження: зб. матер. IV Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 10 квітня 2019 року. Київ: НУОУ. 2019. С. 54.

49. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control. 2019 IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2019. Proceedings, 2019, pp. 31–34, 8943918. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

50. Kuchеров D., Kozub A. Backstepping Algorithm for Controlling of Quadrotor. 2020 IEEE 6th International conference "Methods and systems of navigation and motion control"(MSNMC), October 20–23, Kiev Ukraine, p. 51–55. DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255518 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

51. Kuchеров D., Kozub A., Tkachenko V., Rosinska G., Poshyvailo O. PID Controller Machine Learning Algorithm Applied to the Mathematical Model of Quadrotor Lateral Motion. 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2021. Proceedings, 2021, pp. 86–89. DOI:10.1109/APUAVD53804.2021.9615438 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

52. Козуб А. М., Шумейко В. О., Мосійчук Д. І. Взаємодія безпілотних авіаційних систем для виконання завдань спостереження та ураження: зб. матер. VI Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 23 травня 2023 року. Київ: НУОУ. 2023. С. 104–106.

53. Козуб А. М. Синтез системи прийняття рішень керування безпілотною системою в умовах невизначеності: зб. матер. VII Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 24 квітня 2024 року. Київ: НУОУ. 2024. С. 159–161.

54. Козуб А. М. , Кучеров Д. П. , Пошивайло О. М. Рекомендаційна система для ефективного функціонування повітряного транспорту в складних умовах польоту:

зб. тез доп. XV Міжнар. наук-практ. конф. «Комп'ютерні системи та мережні технології» (CSNT-2024). 25–26 квітня 2024 р. Київ: НАУ. 2024. С. 83–84.

55. Козуб А. М. Варіант побудови системи управління групових дій безпілотних літальних апаратів: зб. матер. VIII Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 30 жовтня 2025 року. Київ: НУОУ. 2025. С.173–174.

56. Kuchеров D., Khalimon N., Tkachenko V., Myroshnychenko I., Kozub A. Determination of Coordinates of Airborne Objects From Signals of Ground Emitters. 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSNMC61130.2025.11399688 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

57. Козуб А. М. Технології виконання авіаційних робіт безпілотними літальними апаратами: зб. матер. IX Міжнар. наук-практ. конф. «Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 28 квітня 2026 року. Київ: НУОУ. 2026. С. 801–804.

АНОТАЦІЯ

Козуб А.М. Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація і управління рухом – Національний університет «Київський авіаційний університет», Київ, 2026.

Метою дослідження є підвищення ефективності застосування багатопозиційної системи, яка складається з окремих безпілотних повітряних об'єктів, завдяки забезпеченню функціонально-стійкого управління в разі комплексного підходу до управління групою БПЛА під час виконання завдань за призначенням.

У дисертаційній роботі отримані такі основні результати:

1. Уперше запропоновано метод управління рухом мультиагентної системи, агентом якої є БПЛА, обладнаний засобами вимірювання та управління, який на відміну від наявних містить не тільки похибку відхилення групи від заданого маршруту, а й ще два спеціальні сигнали, які є похідними від потенціальних енергій притягання агентів і їх відштовхування від сусідів і перешкод, що гарантує цілісність і безпеку в процесі руху. Закон керування передбачає також зміну конфігурації групи під час долаття перешкод, за яким цілісність і розмір групової структури не втрачаються, що дає змогу виконувати завдання групової поведінки та навігації в динамічному середовищі.

2. Уперше розроблено метод управління БПЛА квадаторного типу завдяки введенню гібридної адаптивної системи керування для забезпечення точного відтворення бокового руху апарата, який на відміну від відомих містить різні закони управління, у тім грубий канал забезпечує мінімізацію помилки відхилення від заданої траєкторії за мінімальним часом керування, що дає змогу швидко

переміщати фазові координати об'єкта управління в область досяжності точнішого каналу, який функціонує за пропорційним законом керування.

3. Уперше запропоновано метод налаштування пропорційально-інтегрально-диференціальних (ПІД)-контролерів градієнтного типу за умов апріорної невизначеності параметрів математичної моделі з адаптивним кроком налаштування, у якому на відміну від наявних локальні мінімуми вилучаються оптимізацією кроку зміни шуканих параметрів з використанням множників Лагранжа, що дає можливість отримати обчислювальну простоту, швидкість збіжності, можливість онлайн-налаштування в реальному масштабі часу.

4. Удосконалено метод формування маршруту БПЛА на основі кривих Без'є, який відрізняється від наявних мінімальною кількістю маршрутних точок, що забезпечує гладкість траєкторії та прийнятні значення кривизни при збереженні властивості інваріантності до масштабування.

5. Набув подальшого розвитку метод оброблення інформації під час керування БПС для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, який відрізняється від наявних оцінюванням каналу завантаження для встановлених методів керування потоком. Керування потоками має відбуватися за схемою ARQ, яка надає можливість селективного вибору та максимальної пропускної здатності приймальному каналу.

6. Удосконалено багаторівневу структуру багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів завдяки поєднанню різних схем адресації, що забезпечує ефективну взаємодію агентів у мультиагентній системі, що дозволяє підвищити точність та оперативність виконання завдань такою системою, а також адаптивно змінювати конфігурацію рою завдяки введенню механізму консенсусу.

7. Набула подальшого вдосконалення побудована система групового управління БПЛА, що приводить до підвищення ефективності використання БПЛА, яка відрізняється функціональною стійкістю управління під час виконання типових завдань, що дає змогу коригувати план та оптимізацію маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання завдання; значний виграш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість постановки різних завдань для багатокомпонентних учасників групи БПЛА зважаючи на ефективність топології груп.

8. Зазнала подальшого розвитку методологія виконання моніторингу групою БПС в динамічному середовищі, яка відрізняється визначенням точного місцезнаходження групи БПЛА і ступенем виконання завдання на основі загальних даних групи та допомагає визначити кращий сценарій для кожного агента під час виконання завдання групою. Запропонована методологія може бути використана в народному господарстві у процесі виконання різних завдань, що допомагає під час виконання колективних дій багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів забезпечити прийняття рішення за мінімального часу.

Ключові слова: система управління, багатопозиційна система, безпілотний літальний апарат, безпілотний авіаційний комплекс, безпілотне повітряне судно, дистанційно пілотована авіаційна система, управління груповим рухом, мультиагентна система, інтелектуальна система оброблення інформації, планування траєкторії, управління рухом, інформаційні технології.

ABSTRACT

Kozub A.M. Methodology of the synthesis of management of the multi-position system of autonomous air objects – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.13 – navigation and traffic control – National University "Kyiv Aviation University", Kyiv, 2026.

The purpose of the research is to increase the efficiency of the use of a multi-position system consisting of separate unmanned aerial vehicles by ensuring functionally stable control with an integrated approach to controlling a group of UAVs when performing assigned tasks.

The following main results were obtained in the dissertation work:

1. A method for controlling the movement of a multi-agent system, in which the agents are UAVs, has been proposed for the first time, equipped with measurement and control devices, which, unlike existing methods, incorporates not only the error of the group's deviation from the specified route, but also two additional special signals derived from the potential energies of attraction between agents and their repulsion from neighbours and obstacles, thereby ensuring integrity and safety during movement. The control law also provides for changes to the group's configuration whilst overcoming obstacles, ensuring that the integrity and size of the group structure are maintained, thereby enabling the execution of group behaviour and navigation tasks in a dynamic environment.

2. A method for controlling a quadcopter-type UAV has been developed for the first time through the introduction of a hybrid adaptive control system to ensure accurate reproduction of the aircraft's lateral motion; unlike existing methods, this system incorporates different control laws, whereby the coarse channel minimises the error of deviation from the set trajectory in the shortest possible control time, enabling the phase coordinates of the controlled object to be rapidly moved into the range of the more precise channel, which operates according to a proportional control law.

3. A method is proposed for the first time for tuning gradient-type proportional-integral-derivative (PID) controllers under conditions of a priori uncertainty in the parameters of the mathematical model, with an adaptive tuning step, in which, unlike existing methods, local minima are avoided by optimising the step size for changing the parameters of interest using Lagrange multipliers, thereby ensuring computational simplicity, rapid convergence and the possibility of online tuning in real time.

4. A method for generating UAV routes based on Bézier curves has been improved; this method differs from existing ones in that it uses a minimum number of

waypoints, ensuring a smooth trajectory and acceptable curvature values whilst retaining the property of invariance to scaling.

5. The method of information processing during UAV control has been further developed to ensure reliable two-way information transmission between the UAV's onboard computer and the operator, which differs from existing methods in its assessment of the downlink channel for established flow control methods. Flow control should be performed using the ARQ scheme, which enables selective selection and maximizes the receiving channel's throughput.

6. The multi-level structure of a multi-position system of autonomous aerial vehicles has been improved by combining different addressing schemes, which ensures effective interaction between agents in a multi-agent system. This enables such a system to perform tasks with greater accuracy and efficiency, as well as to adaptively change the swarm's configuration through the introduction of a consensus mechanism.

7. The developed UAV group control system has been further refined, leading to increased efficiency in UAV operations. It is characterized by functional control stability during the execution of typical tasks, enabling flight plan adjustments and route optimization based on data already received from other UAVs; this increases the likelihood of successful mission completion; significant time savings; the ability to simultaneously survey the territory and expand the area under simultaneous monitoring; the ability to assign different tasks to multi-component UAV group members, taking into account the effectiveness of group topology.

8. The methodology for monitoring a UAV swarm in a dynamic environment has been further developed; it is characterized by the determination of the swarm's precise location and the degree of task completion based on the swarm's aggregate data, and helps identify the optimal scenario for each agent during the swarm's task execution. The proposed methodology can be used in the national economy during the execution of various tasks, helping to ensure decision-making in the shortest possible time when performing collective actions by a multi-position system of autonomous aerial vehicles.

Key words: control system, unmanned aerial vehicle, unmanned aerial system, unmanned aircraft, remotely piloted aircraft system, swarm control, multi-position system, multi-agent system, intelligent information processing system, trajectory planning, motion control, information technology.