

Голові спеціалізованої Вченої ради
Д 26.062.03 при Національному університеті
“Київський авіаційний інститут”
03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

начальника кафедри авіації інституту авіації та протиповітряної оборони доктора військових наук ГЕРАСИМЕНКА Володимира Вікторовича на дисертаційну роботу КОЗУБА Андрія Миколайовича на тему “Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об’єктів”, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – Навігація і управління рухом

Обґрунтування вибору теми дослідження та її актуальність

Війна за Незалежність України вкотре довела, що технології, взаємодія і персонал це вирішальні складові успіху, тому застосування безпілотних авіаційних комплексів перетворилося на один із ключових чинників здобуття тактичної та технологічної переваги на полі бою. Протидія з боку противника засобами радіоелектронної боротьби, вогневого ураження вимагає відходу від концепції управління поодинокими засобами та переходу до координації дій автономних, функціонально стійких багатопозиційних груп безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА). У цьому контексті розробка нових методологічних засад, математичних моделей та адаптивних алгоритмів групового управління є надзвичайно актуальною науково-прикладною проблемою, спрямованою на забезпечення високої точності, живучості та ефективності виконання завдань за призначенням. Дисертаційна робота Козуба А.М. безпосередньо відповідає пріоритетним потребам Сил оборони України щодо підвищення ефективності різного роду дій (операцій) у складній, невизначеній, небезпечній для людини динамічній обстановці. Сьогодні безпілотна авіація характеризується масштабною модернізацією. У світі застосовуються БПЛА різного призначення, аеродинамічних схем, геометричних розмірів та вагових характеристик тощо. Успіх їх застосування пов’язаний насамперед з бурхливим розвитком мікропроцесорної обчислювальної техніки, систем управління, навігації, передачі інформації, штучного інтелекту. Досягнення в цій галузі дають можливість здійснювати політ в автоматизованому режимі від зльоту до посадки, виконувати завдання

моніторингу земної (водної) поверхні, а БПЛА військового призначення забезпечують розвідку, пошук, вибір і знищення цілі в будь-який час доби, за будь-яких метеоумов. Подальше вдосконалення БПЛА відбувається завдяки застосуванню сучасних інформаційних технологій, насамперед нових навігаційних систем, обладнання, ефективних силових установок, різноманітних датчиків, що робить такі літальні апарати всепогодними, здатними працювати в будь-який час доби і протягом тривалого періоду передавати інформацію в реальному масштабі часу. Досвід практичного використання БПЛА подвійного призначення під час виконання ряду завдань дає змогу сформулювати перелік завдань, конкретизувати типи і класифікацію БПЛА, сформулювати технічні вимоги до проєктованих БПЛА. В сучасних умовах Війни за Незалежність України, основні тенденції сучасного і перспективного розвитку БПЛА пов'язують, насамперед, з військовим призначенням. Науковий пошук авіаційних інженерів та конструкторів сьогодні спрямовано на формування концепції БПЛА, що відповідають виконуваним завданням і визначають роль, межі та умови їх застосування. Останнім часом розширюються можливості застосування БПЛА. Разом із тим, одним із перспективних напрямів є забезпечення групового руху автономних роботів (безпілотних апаратів) під час виконання колективних операцій, які з різних причин не можуть бути виконаними окремими апаратами. Питанням управління груповими діями рухомих апаратів, що функціонують на землі, воді і в повітряному просторі, приділялась важлива увага дослідників та науковців у різні часи, про що свідчать численні джерела. В дисертації Козуба А.М. прийняте обмеження, яке полягає в тому, що управління здійснюється змінною групою БПЛА, призначених для реалізації однієї або декількох місій (завдань). Структура розглянутої системи ґрунтується на сучасному погляді як про можливості управління, так і побудови цієї системи. Система складається з людини-оператора, який формує завдання елементам групи, пульта управління і безпосередньо об'єктів управління – БПЛА, який має у своєму складі як засоби управління польотом, так і засоби забезпечення виконання поставленого завдання. Управління здійснюється по каналу зв'язку як відкритого, так і закритого типу. Основним об'єктом управління вважається БПЛА, що виконує завдання в групі. Тому виникає наукова проблема управління кожним БПЛА, управління групою БПЛА, з урахуванням обмежень льотно-технічних характеристик, стійкості побудови групи, ефективності виконання місії під час впливу на групу БПЛА внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих чинників. Отже, тема дисертації, яка пов'язана з вирішенням нової актуальної науково-прикладної проблеми щодо 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, є актуальною і важливою. Вирішенню цієї проблеми і присвячена дисертаційна робота Козуба А.М.

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”. Напрямок дослідження роботи пов'язаний з виконанням низки науково-дослідних робіт, в яких автор брав участь.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, одержаних у дисертації, підтверджується вибором апробованих методів дослідження: синтезу управління системою автономних повітряних об'єктів під час виконання типових групових завдань для функціонально стійкого управління; оптимального управління системою автономних повітряних об'єктів з відомими параметрами; оброблення інформації під час управління безпілотними повітряними системами (далі – БПС) з використанням комбінації нейронних мереж у процесі побудови траєкторії польоту; адаптації; 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. Дисертація добре структурована, усі розділи закінчуються логічними висновками. Наприкінці роботи надані загальні висновки. Висновки відображають зміст проведених досліджень, одержаних результатів та їх практичного впровадження.

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 експериментів на основі математичного моделювання на моделях-аналогах, що свідчить про достатню відповідність розроблених математичних моделей описуваним процесам. За твердженнями автора дисертації, розбіжність результатів машинних експериментів на розроблених математичних моделях не перевищує 10%. У процесі синтезу збіжність розроблених методів досліджувалася за допомогою аналізу відповідної квадратичної функції Ляпунова. Від'ємна визначеність її похідної за часом (монотонне спадання значення функції вздовж траєкторій системи) доводить асимптотичну збіжність запропонованих алгоритмів навчання.

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 управління 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 управління для забезпечення точного відтворення бокового руху апарата, який на відміну від відомих містить різні закони управління, зокрема грубий канал забезпечує мінімізацію помилки відхилення від заданої траєкторії за мінімальним часом управління, що дає змогу швидко переміщати фазові координати об'єкта управління в область досяжності точнішого каналу, який функціонує за пропорційним законом управління.

3. Уперше запропоновано метод налаштування пропорційно-інтегрально-диференціальних контролерів (далі – ПІД-контролерів) градієнтного типу за умов апіорної 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 управління БПС для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, який відрізняється від наявних оцінюванням каналу завантаження для встановлених методів управління потоком. Управління потоками має відбуватися за схемою автоматичного повторення запитів, яка надає можливість селективного вибору та максимальної пропускну 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 ймовірності 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.

Практичне значення одержаних автором наукових результатів

Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі, методи дозволяють:

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. Забезпечити точне відтворення бокового руху апарату за рахунок двоканальної системи управління БПЛА квадаторного типу.

3. Здійснити налаштування ПД-контролерів для управління рухом квадатора за умов апріорної невизначеності математичної моделі, квазіоптимальний режим роботи якого поступається оптимальному режиму лише на 3%.

4. Підвищити швидкість налаштування параметрів ПД-контролерів порівняно з вбудованим алгоритмом пакету Simulink на 4%.

5. Підвищити ефективність застосування БПЛА за рахунок спеціальної підготовки операторів для виконання завдань за призначенням.

Результати досліджень упроваджені у: Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України під час підготовки звітних матеріалів науково-дослідної роботи, шифр “Стратосфера-Р” (акт від 15.09.2016); Науково-виробничій впроваджувальній фірмі “Теотехнологія”, м. Київ (акт від 18.08.2022); 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 соціоєкосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз” (№ ДР 0121U109216, акт від 10.09.2024); 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); освітньому процесі Національного університету оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та

застосування космічних систем (акт від 07.10.2024); ТОВ “Аерокосмічне агентство “Магеллан”, м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025).

Результати дисертаційної роботи рекомендується використовувати на підприємствах, що розробляють БПЛА та системи управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів, а також у закладах вищої освіти та наукових установах.

Завершеність досліджень, стиль викладення автореферату та дисертації, публікації

Дисертація та автореферат написані грамотно, стиль викладення в них матеріалів досліджень та наукових положень, висновків і рекомендацій у цілому забезпечує доступність їх сприйняття. Зміст автореферату відображає основні результати роботи, які приведені в дисертації. Дисертація за тематикою та результатами відповідає паспорту спеціальності 05.22.13 – Навігація і управління рухом. Наукові положення, висновки і рекомендації, які виносяться на захист, одержані автором особисто. З наукових праць, які опубліковані у співавторстві, в дисертації відзначено особистий внесок здобувача. За результатами дослідження опубліковано 57 наукових праць. Основні результати дисертації оприлюднено у 24 наукових публікаціях: одна монографія у співавторстві, опублікована в Німеччині; один розділ в колективній монографії у виданні IGI Global (США); 17 наукових статей у фахових виданнях України; 4 наукові статті у закордонних журналах, що проіндексовані в наукометричній базі Scopus; одна наукова стаття в науковому журналі Наукові праці Національної академії авіації (Азербайджанська Республіка). Додатково результати досліджень висвітлено в матеріалах 32 наукових конференцій та одному патенті України на корисну модель. Більшість наукових статей опубліковані в період з 2011 по 2020 роки, що свідчить про фундаментальну та довготривалу роботу здобувача над дисертацією.

Проте відсутність публікацій в наукових журналах за останні 5 років свідчить про недостатність поточного висвітлення результатів дослідження, але за кількістю та якістю висвітлення основних результатів досліджень, дисертація відповідає вимогам щодо публікацій результатів дисертацій на здобуття ступеня доктора наук, визначеним у наказі Міністерства освіти і науки України від 23.09.2019 № 1220.

Оцінка мови, змісту та оформлення дисертації та автореферату

Стиль викладення автореферату та дисертації в цілому забезпечує доступність та сприйняття матеріалу. У авторефераті чітко і лаконічно викладено наукові завдання дослідження та шляхи їх вирішення, зрозуміла наукова і практична значущість роботи, особистий внесок здобувача. Матеріали дисертаційної роботи та автореферат структуровані, написані грамотно, з дотриманням чинних вимог до оформлення, а стиль викладення матеріалу забезпечує легкість і доступність їх сприйняття. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації та відображає її основний зміст, наукові та практичні результати.

Недоліки і зауваження

Поряд із високим науковим рівнем, ґрунтовністю викладення матеріалу та практичною значущістю, до дисертаційної роботи можна висловити низку зауважень і побажань конструктивного характеру.

1. Значна частина другого розділу роботи присвячена опису класичних математичних моделей, стабілізації та ПД-регулюванню окремих БПЛА (квадрокоптерів, літаків). Скорочення базових описів управління поодинокими об'єктами на користь більш детального розкриття нових емерджентних властивостей, що виникають під час утворення багатопозиційної групової системи, дозволило б додати змісту до тих частин роботи, які стосуються джерел наявних проблем в теорії та спрямовують до одержання нових наукових результатів.

2. У цільовому функціоналі (1.1) вагові коефіцієнти (a_1, a_2, a_3) уведено адекватно за змістом, проте в тексті відсутня деталізована методика їх адаптивного чи формалізованого вибору під конкретні сценарії польотного завдання.

3. У підрозділі 1.3 пропонується застосування наземної трилатераційної системи навігації для польотів у зімкнутих порядках. Автор справедливо зазначає вразливість методу до засобів радіоелектронної боротьби, однак у подальших розділах недостатньо висвітлено алгоритми автономного переходу групи на інші джерела навігації в разі повного подавлення наземного базису.

4. Під час розроблення алгоритмів оптимального за часом управління та процедур бекстеппінгу (підрозділи 2.1 та 2.2) передбачається відсутність шумів у каналах вимірювання координат. У реальних умовах експлуатації вимірювальні перешкоди суттєво впливають на точність стабілізації, тому цей чинник потребує додаткового більш ґрунтовного аналізу.

5. У розділах 4 та 5 розглядаються протоколи консенсусу та передавання даних ARQ, однак поза увагою залишилися питання кіберзахисності рою – як поводить алгоритм реконфігурації в разі підміни противником (GPS/Nav spoofing) телеметричних координат одного з БПЛА.

6. Застосування двоканальної системи (грубий/точний) та оптимізація кроку ПД-регулятора множниками Лагранжа – можна віднести до класичних прийомів теорії автоматичного управління. Твердження про те, що розроблений режим поступається оптимальному лише на 3%, потребує додаткового аналітичного обґрунтування, оскільки є емпіричним спостереженням для конкретної обчислювальної моделі.

7. У розділі 6 для реалізації алгоритмів нижнього рівня пропонується платформа OrangePy, проте в роботі бракує аналізу часової складності розрахунку потенційних полів та консенсусних протоколів при збільшенні чисельності групи з 5 до 20–30 БПЛА в режимі реального часу.

Відповідність дисертації встановленим вимогам і загальні висновки

Дисертаційна робота Козуба А.М. на тему “Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об’єктів” є завершеною, самостійно підготовленою кваліфікаційною науковою працею, у якій одержані обґрунтовані теоретичні результати, що вирішують актуальну науково-прикладну проблему розробки 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. Робота відповідає паспорту спеціальності 05.22.13 – Навігація і управління рухом, вимогам до оформлення дисертацій, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40, а також вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з Порядком присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 № 1197, а її автор, Козуб Андрій Миколайович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – Навігація і управління рухом.

Офіційний опонент:

начальник кафедри авіації інституту авіації та протиповітряної оборони
Національного університету оборони України
доктор військових наук, полковник
“29” серпня 2026 року

Володимир ГЕРАСИМЕНКО

Підпис засвідчую

Начальник управління адміністративного
та інформаційно-організаційної роботи
Національного університету оборони України
полковник



Богдан БІЛЯВСЬКИЙ