

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

професора кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» доктора технічних наук, професора БАРАБАША Олега Володимировича 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

В умовах триваючої широкомасштабної збройної агресії РФ проти України застосування безпілотних авіаційних комплексів перетворилося на один із ключових чинників здобуття тактичної та технологічної переваги на полі бою. Інтенсивна протидія з боку засобів радіоелектронної боротьби й вогневого ураження противника вимагає відходу від концепції поодинокого керування апаратами та переходу до координації дій автономних, функціонально стійких багатопозиційних груп БПЛА. У цьому контексті розробка нових математичних моделей, методологічних засад та адаптивних алгоритмів групового управління є надзвичайно актуальною науково-прикладною проблемою, спрямованою на забезпечення високої точності, живучості та ефективності виконання завдань за призначенням. Представлена дисертаційна робота безпосередньо відповідає пріоритетним потребам Сил оборони України щодо підвищення ефективності моніторингових, розвідувальних і спеціальних операцій у складній та динамічно змінюваній обстановці.

Безпілотна авіаційна техніка характеризується масштабованою модернізацією. В усіх країнах світу застосовуються безпілотні літальні апарати різного призначення, аеродинамічних схем, геометричних розмірів і масових даних, 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 автоматичному режимі від зльоту до посадки,

виконувати завдання моніторингу земної (водної) поверхні, а БПЛА військового призначення забезпечувати розвідку, пошук, вибір і знищення цілі в будь-який час доби і 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 цивільного та військового призначення під час виконання ряду завдань дає змогу сформулювати перелік завдань, визначити типи і класифікацію БПЛА, сформулювати технічні вимоги до проєктованих БПЛА. В сучасних умовах повномасштабної війни рф проти України, основні тенденції сучасного і перспективного розвитку БПЛА пов'язують, насамперед, з військовим призначенням. Науковий пошук авіаційних інженерів та конструкторів сьогодні спрямовано на формування образу БПЛА, що відповідає виконуваним завданням і визначає роль, межі та умови їх застосування.

Останнім часом розширюються можливості застосування безпілотних літальних апаратів. Разом із тим, одним із перспективних напрямів є забезпечення групового руху автономних роботів (безпілотних літальних апаратів) під час виконання колективних операцій, які з різних причин не можуть бути виконаними окремими апаратами.

Питанням керування груповими діями рухомих апаратів, що функціонують на землі, у воді, повітряному просторі, приділялась важлива увага дослідників та науковців у різні часи, про що свідчать численні джерела.

В дисертації Козуба А.М. прийнято обмеження, що полягає в тому, що управління здійснюється змінною групою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), призначених для реалізації однієї або декількох місій (завдань).

Структура розглянутої системи ґрунтується на сучасному погляді як про можливості керування, так і побудови цієї системи. Конструктивно система складається з людини-оператора, який формує завдання елементам групи, пульта керування і безпосереднього об'єктів керування – безпілотних літальних апаратів. БПЛА має у своєму складі як засоби керування 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 керування кожним БПЛА, керування всією групою БПЛА з урахуванням обмежень на льотно-технічні характеристики кожного БПЛА, стійкість побудови групи, ефективність виконання місії під час впливу на групу БПЛА внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Отже, тема дисертації, яка пов'язана з вирішенням нової актуальної науково-прикладної проблеми 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 приймав участь.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих у дисертації підтверджується вибором апробованих методів дослідження: синтез 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 керування безпілотними повітряними системами (БПС) з використанням комбінації нейронних мереж у процесі побудови траєкторії польоту БПС; 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 закінчується логічними висновками. Наприкінці роботи надані загальні висновки. Висновки відображають зміст проведених досліджень та їх практичного впровадження.

Достовірність одержаних результатів

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 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.

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, 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 пропорційно-інтегрально-диференціальних (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 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 автоматичного повторення запитів (ARQ), 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 виграв 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 ПІД-контролерів для керування рухом квадатора за умов апіорної невизначеності математичної моделі, квазіоптимальний режим роботи якого програє оптимальному режиму лише на 3%.

4. Підвищити швидкість налаштування параметрів ПІД-контролерів у порівнянні 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 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 соціоєкосистемі 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 Національного університету оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем (акт від 07.10.2024 р.); ТОВ «Аерокосмічне агентство «Магеллан», м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025 р.).

Впровадження результатів дисертаційних досліджень підтверджено 6 актами впровадження та 1 патентом на корисну модель.

Результати дисертаційної роботи рекомендується використати на підприємствах, що розроблюють БПЛА та системи керування багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів, а також у навчальних та наукових установах.

Завершеність досліджень, стиль викладання 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 авдзначено особистий внесок здобувача.

За результатами дослідження опубліковано 57 наукових праць. Основні результати дисертації оприлюднено у 24 наукових публікаціях:

- 1 монографія у співавторстві, опублікована в Німеччині;
- 1 розділ в колективній монографії у виданні IGI Global (США);
- 17 наукових статей у фахових виданнях України;
- 4 наукові статті у закордонних журналах, що проіндексовано в базі Scopus;
- 1 наукова стаття в науковому журналі Наукові праці Національної академії авіації (Азербайджан).

Додатково результати досліджень висвітлено в 32 матеріалах наукових конференцій та 1 патенті України на корисну модель.

Слід відзначити, що переважна більшість наукових статей опубліковано в період з 2011 року до 2020 року. З однієї сторони, це свідчить про довготривалу роботу здобувача над дисертацією, а з іншої – про відсутність публікацій в наукових журналах за останні 5 років.

Проте, за кількістю та якістю висвітлення основних результатів досліджень, дисертація відповідає вимогам щодо публікацій результатів дисертацій на здобуття ступеня доктора наук, висвітленим у Наказі МОН України від 23.09.2019 № 1220.

Оцінка мови, змісту та оформлення дисертації та автореферату

Стиль викладення автореферату та дисертації в цілому забезпечує його доступність та сприйняття. В 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.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації та відображає її основний зміст, наукові та практичні результати.

Недоліки і зауваження.

1. В розділі 1 дисертації здійснено постановку наукової проблеми та сформульовано мету дослідження. При цьому математична формалізація розглядається як “узагальнений критерій виконання завдання управління багатопозиційною системою повітряних об’єктів, що включає мінімум витрат часу та забезпечення точного виконання завдання”. Зрозуміло, що це багатокритеріальна оптимізаційна задача, тому зроблений висновок, що “Ефект (1.1) вважається досягнутим за описаних в дисертації припущень є не обґрунтованим. В описі безпосередньо математичної формалізації наукової проблеми немає відомостей щодо того, які величини треба обчислити, як обчислювати обмеження, наприклад, ризик зіткнення з іншими БПЛА та перешкодами, тощо.

2. Для оцінювання критерію виконання завдання групою БПЛА автор запропонував ймовірнісний підхід до на основі послідовності залежних подій. Проте, в даній моделі не враховано часову динаміку зміни параметрів середовища та затримки інформаційного обміну, що надає оцінюванню остаточної ймовірності спрощеного характеру. Разом із тим не виконано аналізу чутливості загального критерію ефективності до похибок оцінювання умовних ймовірностей.

3. В розділі 2 автор запропонував алгоритми керування рухом БПЛА на основі процедури бекстеппінгу та ітераційного налаштування ПІД-регуляторів. Проте, дана модель будується на класичному детермінованому математичному апараті, тоді як для досягнення високої ефективності й гнучкості керування в умовах невизначеності варто використовувати сучасні методи штучного інтелекту, зокрема глибоке навчання з підкріпленням. Разом із тим у роботі не виконано порівняльного аналізу обчислювальної складності та швидкодії

розроблених аналітичних методів із сучасними інтелектуальними алгоритмами керування.

4. В третьому розділі автор удосконалив систему управління рухом БПЛА на основі нейроконтролера та запропонував алгоритм побудови маршруту з використанням кривих Без'є. Проте, в даній моделі формування траєкторії не враховано динамічні обмеження літального апарата, такі як допустимий радіус віражу, максимальне перевантаження та обмеження швидкості. Разом із тим немає відомостей щодо оцінки стійкості системи в умовах раптової зміни масових характеристик об'єкта.

5. В дисертації розроблено методологічні основи групового застосування БПЛА та запропоновано структуру системи управління з виділеним лідером. Проте, в даній моделі не прописані обмеження щодо стійкості групи у разі раптового виходу з ладу лідера або втрати ним каналу зв'язку. Разом із тим немає відомостей щодо оцінки ефективності функціонування алгоритмів узгодження дій для гетерогенного складу групи, що складають апарати з різними динамічними та маневреними характеристиками.

6. В роботі (розділ 4) отримала подальшого розвитку топологія мультиагентної системи за відомою схемою «загибелі-розмноження» агентів та обчислення відповідних показників: відносний розмір системи, ступінь виконання завдань та швидкість реконфігурації у сталому режимі роботи. Також визначено основні показники ефективності топології багатокomпонентних груп БПЛА: надійність керування, структурна компактність, ступінь централізованості та живучість групи. Але, не визначено показники функціональної стійкості групи БПЛА, як інтегрального показника надійності керування, структурної компактності та живучості групи.

7. У розділі 5 автор запропонував інформаційну технологію управління групою літальних апаратів. Визначено, що обмін інформацією з групою БПЛА здійснюється по радіоканалу «БПЛА – пункт управління». Помилки приймання інформації пропонується усувати шляхом повторення пакетів. Проте, в дисертації не оцінено вплив інформаційних помилок на стійкість групи БПЛА.

8. В дисертації автор розробив модель групового управління багатопозиційною системою БПЛА з використанням підходу потенціальних полів. Проте, дана модель спирається на традиційний науково-методичний апарат. Але, для забезпечення високої ефективності колективної взаємодії та самоорганізації групи доцільно застосовувати методи штучного інтелекту, такі як багатоагентне навчання з підкріпленням чи алгоритми ройового інтелекту. Разом із тим немає відомостей щодо здатності запропонованої системи до автономного самонавчання та адаптивного прийняття рішень у складних динамічних умовах без попередньо заданих жорстких правил.

Вказані зауваження та недоліки не знижують цінності дисертаційної роботи та наукові досягнення автора.

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 науковою працею, у якій отримані 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, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40, а також вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 21.11.2021 р. № 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

професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

доктор технічних наук, професор

« » серпня 2026 року



Олег Барабаш

Олег БАРАБАШ

