

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Кир'янова Артемія Юрійовича

на тему «Методи та програмне забезпечення децентралізованого управління  
груповим польотом безпілотних літальних апаратів на основі теорії

неоднорідного векторного поля»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 12 – Інформаційні технології

за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення

### **Актуальність теми дисертації.**

Сучасні досягнення в галузі комп'ютерних технологій суттєво загострили завдання забезпечення групового управління автономними об'єктами у реальних умовах, а також забезпечення стійкості до збоїв окремих БПЛА і масштабованості для великих груп БПЛА. В наш час основною проблемою в галузі комп'ютерних технологій є забезпечення групового управління автономними об'єктами у реальних умовах. Важливим завданням є розробка системи, яка забезпечить стійкість до збоїв окремих БПЛА та масштабованість для великих груп, адже місії часто відбуваються в непередбачуваному середовищі, що вимагає від БПЛА не тільки підтримувати стабільність конфігурації групи під час групових польотів, але й адаптуватися до змін та автономно уникати перешкод. Таким чином, для отримання та забезпечення групового управління автономними об'єктами у реальних умовах потрібна побудова та підтримка заздалегідь визначеної геометричної форми групи автономних об'єктів, як єдиного цілого протягом всієї місії.

В даний момент основним питанням є використання засобів моніторингу обробки інформації, які дозволяють великим групам БПЛА автономно обмінюватись інформацією і обробляти інформацію на борту.

Крім того в теорії та на практиці створення та застосування існуючих вимог підвищення ефективності групового управління БПЛА вимагається збільшення витрат на розробку математичного та програмного забезпечення та зменшення витрат на виконання безпілотними літальними апаратами різних завдань та місій. Висування таких вимог є необхідним і для збереження конфігурації групи БПЛА на етапі групового польоту в умовах дії зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів та обмеження можливостей існуючих методів щодо забезпечення стійкості групи автономних БПЛА при децентралізованому управлінні.

Для усунення визначеного протиріччя в дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання щодо розробки методів та архітектури програмного забезпечення для децентралізованого групового управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) з урахуванням особливостей їх динаміки, а також розроблено математичну модель для експериментального дослідження ефективності управління груповим польотом БПЛА.



Тому дисертація Кир'янова А.Ю. є актуальною.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше розроблено архітектуру та програмне забезпечення для управління та візуалізації групових польотів БПЛА, що базується на використанні децентралізованої архітектури взаємодії на основі схем консенсусу та гетерогенних векторних полів для відстеження заданої траєкторії руху. Зазначене програмне забезпечення відрізняється від відомих лінійних моделей завдяки інтеграції автопілотів БПЛА, що розширює можливості практичного застосування за межами існуючих підходів. Програмне забезпечення дозволяє підтримувати різні статуси місій та дронів та надає можливості користувачам виконувати різноманітні дії через інтерфейс для групового управління. Використання даного програмного забезпечення дозволяє керувати групами БПЛА для виконання різних завдань, зменшуючи енергетичні та часові витрати на виконання завдань.

2. Удосконалено метод простору відносних станів для формування групового управління БПЛА, що відрізняється від відомих законів керування точковими масами врахуванням динаміки польоту БПЛА. Реалізація зазначеного методу дозволяє мінімізувати загальну енергію, необхідну для підтримки групи БПЛА, враховуючи відстань між сусідніми БПЛА та необхідну корекцію курсу, що дозволило знизити енергоспоживання на 20 %.

3. Удосконалено метод формування керуючих впливів наведення БПЛА, який відрізняється від традиційних законів керування застосуванням методу нелінійного синтезу. Метод не враховує точне відстеження керуючих сигналів кінематичними моделями БПЛА, що дозволяє істотно збільшити ефективність виконання місій. Врахування сил притягування та відштовхування, що реагують на зміни в динаміці групи та середовища, дозволяє оптимізувати шляхи БПЛА для зниження загального часу місії та витрат енергії для групи з 15 БПЛА, що призвело до скорочення часу виконання місії на 25 %.

4. Запропоновано модель групового польоту БПЛА в середовищі MATLAB/Simulink, яка, на відміну від спрощених моделей, реалізує нелінійну динаміку апаратів і стандартні автопілоти для кожного з них, що дозволяє проводити налаштування параметрів у законах групового управління, оцінювати дію атмосферних полів на груповий політ БПЛА, а також здійснювати візуалізацію одержаних результатів.

Слід зазначити, що отримані в роботі результати є коректними і базуються на відомому математичному апараті, доведених теоретичних тверджень, а також на результатах проведених експериментів за допомогою математичного моделювання. Математичні викладки й доведення, наведені в роботі, також є коректними.



Результати досліджень прийняті до впровадження в Секторі № 5 оборони міста Київ (акт від 18.08.2023 р.); в ТОВ «Інтертехфорвард» (акт від 12.01.2024 р.); в навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (акт від 12.02.2024 р.) при викладанні дисципліни «Проектування кібер-фізичних систем» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кир'янова А.Ю. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 121– Інженерія програмного забезпечення та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Інженерія програмного забезпечення».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям для удосконалення існуючих методів підвищення ефективності функціонування та доступності гетерогенних розподілених нереляційних баз даних в умовах впливу внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Кир'янова Артемія Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело. Принципи академічної доброчесності не були порушені.

Отже, поставлене наукове завдання щодо розробки методів та архітектури програмного забезпечення для децентралізованого групового управління безпілотних літальних апаратів з урахуванням особливостей їх динаміки, а також розробка математичної моделі для експериментального дослідження ефективності управління груповим польотом БПЛА, вирішено. І це підтверджує, що здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота Кир'янова А.Ю. написана українською мовою. За своїм змістом дисертація відповідає діючим вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії і являє собою наукову працю, яка містить сукупність наукових положень та результатів, виставлених автором для публічного захисту. Також робота має внутрішню єдність і свідчить про особистий внесок автора у науку.

Оформлення дисертації відповідає вимогам Державних стандартів України. Текст дисертації написаний грамотною технічною мовою, ясно та зрозуміло. Автор вірно та однозначно використовує загальновідомі технічні



терміни та поняття. Матеріал викладений у логічній послідовності відповідно до поставленої мети та завдань дослідження.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 206 сторінок.

У **вступі** наведено основну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність дослідження.

У **першому розділі** дисертант розглядає етапи системного аналізу розробки інформаційних систем. Проводить огляд та порівняльний аналіз найбільш поширених підходів до групового управління БПЛА, визначає вимоги до створення системи прийняття рішень в різних ситуаціях застосування групи БПЛА.

**Другий розділ** присвячено розробці децентралізованого управління на основі методу неоднорідного векторного поля для груп БПЛА. Вирішення завдань управління, що розглядаються в роботі, ґрунтуються на ієрархічному підході до координованого виконання автономними БПЛА літакового типу різних місій, в яких є необхідним використання стратегій прямування шляху.

Передбачається наявність на кожному БПЛА налаштованого стандартного автопілота, який з достатньою точністю може відслідковувати вхідні сигнали рівня наведення. На цьому рівні у свою чергу діють закони управління з урахуванням цілей, які формуються для управління плануванням місій.

**Третій розділ** присвячений розробці програмного забезпечення для групового управління БПЛА. Розроблене програмне забезпечення включає методи контролю за положенням, швидкістю та взаємодією для забезпечення синхронного слідування визначеному шляху. Базові алгоритми синхронної роботи, пошуку шляху та консенсусу мають вирішальне значення для ефективної навігації та синхронізації між БПЛА.

**Четвертий розділ** присвячений розробці програмного забезпечення для управління та візуалізації групового польоту БПЛА. Програмне забезпечення слугує інтерфейсом між складними моделями даних щодо траєкторії польоту БПЛА та користувачем, якому потрібне цілісне візуальне представлення цих моделей. Алгоритмічна надійність у поєднанні з орієнтованим на користувача дизайном має велике значення для задоволення жорстких вимог до точності та надійності. У цьому контексті програмне забезпечення не лише керує траєкторіями БПЛА, але й перекладає ці траєкторії на візуальну мову.

Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

#### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковані в 12 наукових працях, серед яких 4 наукових статей в фахових журналах, затверджених МОН України, а також 8 публікацій в матеріалах наукових конференцій.



Рівень наукових публікацій достатньо високий. Всі результати наукових досліджень висвітлені в статтях з повним обґрунтуванням та підтвердженням достовірності. Немає порушень принципу академічної доброчесності. Особистий внесок здобувача у всіх наукових публікаціях є вагомим.

Таким чином, оприлюднення наукових результатів повністю відповідає вимогам до дисертацій доктора філософії, висвітленим у «Порядку присудження ступеня доктора філософії...» (Постанова КМУ від 12.02.2022 № 44).

#### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Під час обґрунтування актуальності теми дисертації не наведено кількісних характеристик, які підтверджували б саме актуальність наукового завдання щодо розробки механізмів групового управління БПЛА з урахуванням особливостей динаміки реальних систем «автопілот-БПЛА». При цьому вважаю, що досить важливим є проведення математичного моделювання та виконання обчислювальних експериментів з метою оцінювання ефективності розроблених алгоритмів.

2. В дисертаційній роботі автором удосконалено метод формування керуючих впливів наведення БПЛА, який відрізняється від традиційних законів керування застосуванням методу нелінійного синтезу, що дозволяє істотно збільшити ефективність виконання місій. Удосконалено метод простору відносних станів для формування групового управління БПЛА, що відрізняється від відомих законів керування точковими масами врахуванням динаміки польоту БПЛА. Реалізація зазначеного методу дозволяє мінімізувати загальну енергію, необхідну для підтримки групи БПЛА, враховуючи відстань між сусідніми БПЛА та необхідну корекцію курсу. Дані методи і алгоритми є досить ефективними, проте слід було б розглянути й їх недоліки, адже процес інтеграції нових методів в роботу керування групами БПЛА не може бути виконано без погіршення інших характеристик. Але таких відомостей в дисертації немає.

3. В третьому розділі дисертації наведено приклад розробки програмного забезпечення для групового управління БПЛА, у якому необхідний контроль за положенням, швидкістю та взаємним розташуванням для синхронного слідування визначеному шляху для інтерфейсу оператора реалізовано на Windows. Було б доцільно розглянути питання реалізації таких засобів для операційних систем Linux та MacOS.

4. В дисертації розглянуто питання програмного забезпечення призначеного для контролю та візуалізації польотів груп БПЛА, яке демонструє поєднання складних систем управління та передових технологій графічного рендерингу. Проте, на мою думку, доцільно було б зробити інтерфейс більш інтуїтивно зрозумілим для оператора.

5. Зауваження до оформлення роботи: в різних розділах роботи змінні одного типу виділяються різним форматуванням (вектори і матриці);



некоректно використовуються символи дефісу і тире; четвертий розділ перенасичений рисунками без достатнього пояснення; заголовок відірваний від тексту (стор. 75).

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну й практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кир'янова Артемія Юрійовича на тему «Методи та програмне забезпечення децентралізованого управління груповим польотом безпілотних літальних апаратів на основі теорії неоднорідного векторного поля» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням. Сукупність теоретичних та практичних результатів наведеної роботи вирішує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 12 – Інформаційні технології. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Кир'янов Артемій Юрійович в повні мірі оволодів методологією наукової діяльності та заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент:

доцент кафедри інформаційних систем та технологій  
факультету інформатики та обчислювальної техніки  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

кандидат технічних наук, доцент

«2» серпня 2024 року

