

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Київський
авіаційний інститут», завідувачу кафедри
електроніки, робототехніки і технологій
моніторингу та інтернету речей, доктору
технічних наук, професору
Заліському Максиму Юрійовичу

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри авіоніки та систем управління Національного університету
«Київський авіаційний інститут», кандидата технічних наук, професора Філяшкіна
Миколи Кириловича на дисертаційне дослідження Таранова Дениса
Володимировича “Методи адаптивного керування реконфігурацією та
структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності”, представлене на
здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151
“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”, галузь знань 15
«Автоматизація та приладобудування»

Актуальність дисертаційного дослідження

Сучасний етап розвитку авіаційних робототехнічних систем характеризується зростанням ролі групового застосування безпілотних літальних апаратів. Рої БПЛА розглядаються як перспективний напрям для виконання завдань, у яких важливими є автономність, масштабованість, стійкість до втрат і здатність діяти в умовах обмеженого або нестабільного зв’язку. На відміну від одиничних платформ, ройові системи здатні розподіляти навантаження між агентами, змінювати конфігурацію залежно від поставленого завдання та зберігати працездатність навіть у разі виходу з ладу окремих елементів.

Водночас практична реалізація таких систем пов'язана з низкою складних науково-технічних проблем. Однією з ключових є забезпечення адаптивного керування формацією та збереження структурної цілісності рою в умовах невизначеності. У реальних сценаріях застосування БПЛА можуть діяти радіоелектронні завади, бути відсутніми сигнали глобальної навігації, змінюватися якість каналів зв'язку та виникати втрати окремих агентів. За таких умов традиційні централізовані або жорстко задані схеми керування втрачають ефективність, оскільки залежать від стабільного керуючого вузла, передбачуваного середовища та незмінної структури групи.

Особливо важливою є задача не лише перебудови окремої формації, а й об'єднання незалежних груп БПЛА в єдину мережеву структуру без припинення виконання місії. Для цього необхідні алгоритми, які забезпечують локальне прийняття рішень, вибір координаторів, підтримання комунікаційної зв'язності та уникнення лавиноподібного зростання службового трафіку. Саме тому актуальним є пошук таких методів керування, які поєднують можливості ройового інтелекту, теорії графів, потенціальних полів і механізмів децентралізованої самоорганізації.

Дисертаційне дослідження Таранова Дениса Володимировича присвячене розробці методів адаптивного керування реконфігурацією та структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності. У межах роботи розглянуто проблему підвищення ефективності та живучості ройових систем шляхом створення математичних моделей і алгоритмів, здатних забезпечувати зміну формації, уникнення колізій, підтримання алгебраїчної зв'язності та децентралізоване об'єднання незалежних груп. Важливим є те, що запропоновані підходи орієнтовані на складні умови функціонування, зокрема на дію РЕБ, втрати агентів і відсутність гарантованої навігаційної підтримки.

Актуальність роботи підтверджується також тим, що її результати мають не лише теоретичне, а й прикладне значення. Розроблені методи перевірено шляхом імітаційного моделювання, а отримані результати засвідчили скорочення часу перешикування формації та зменшення енерговитрат порівняно з класичними

підходами. Отже, тема дисертації відповідає сучасним потребам розвитку автономних БПЛА, децентралізованих систем керування та інтелектуальних авіаційних комплексів, а її результати є значущими для подальшого розвитку наукового напрямку за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Зв'язок дисертаційного дослідження з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження виконувалось у межах наукових робіт КАІ, пов'язаних із розвитком методів керування групами БПЛА та підвищенням ефективності їх застосування в умовах складного середовища. Зокрема, робота пов'язана з науковою темою «Розробка інтелектуальної мобільної системи виявлення мінних полів» № 476-ДБ24.

Зміст дисертації безпосередньо узгоджується з цим напрямом, оскільки в ній розроблено методи адаптивної реконфігурації формацій, децентралізованого злиття роїв і підтримання стабільної комунікаційної зв'язності між агентами. Такі результати мають значення для побудови автономних мобільних систем, у яких група БПЛА повинна діяти узгоджено, зберігати керованість і адаптуватися до змін умов виконання місії.

Тема дисертації також відповідає освітньо-науковій програмі «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за спеціальністю 151 у КАІ, що підтверджує її відповідність профілю підготовки здобувача та науковому напрямку кафедральних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробленні та обґрунтуванні методів адаптивного керування реконфігурацією і структурним злиттям роїв БПЛА, які орієнтовані на функціонування в умовах невизначеності, радіоелектронної протидії, втрат агентів і нестабільної комунікаційної взаємодії.

Передусім, автором розроблено метод структурного синтезу об'єднаної мережі роїв БПЛА, що базується на протоколі інкрементального злиття

топологій. Її особливістю є використання логіки скінченного автомата та механізму шлюзових вузлів, завдяки чому злиття незалежних груп може відбуватися без повної перебудови всієї мережі. Це дає змогу зберігати безперервність керування та уникати фрагментації рою на ізольовані кластери.

У роботі удосконалено метод адаптивного керування формацією БПЛА на основі гібридного поєднання PSO та APF. Наукова відмінність запропонованого підходу полягає у використанні адаптивних коефіцієнтів, які змінюються відповідно до поточного стану формації. Завдяки цьому система отримує можливість гнучко переходити від глобального пошуку оптимальної конфігурації до локального уникнення зіткнень і стабілізації руху окремих агентів.

Подальшого розвитку набули методи децентралізованого розподілу ролей у багатоагентних системах. Запропонований алгоритм ALVCS забезпечує вибір координаторів на основі локальної інформації, зокрема характеристик енергетичного ресурсу та якості зв'язку. Такий підхід підвищує відмовостійкість системи, оскільки не потребує наявності єдиного центра керування та зберігає працездатність рою в умовах змінного складу агентів.

Вагомим елементом наукової новизни є використання спектральних характеристик графа зв'язку для оцінювання та підтримання структурної цілісності рою. У роботі показано, що контроль алгебраїчної зв'язності може бути використаний як формальний критерій збереження керованості об'єднаної системи під час реконфігурації та злиття роїв.

Крім того, у дисертації розроблено підхід до експериментальної перевірки запропонованих методів засобами імітаційного моделювання. Отримані результати підтверджують ефективність застосування адаптивних коефіцієнтів у методі PSO, а також здатність протоколу злиття підтримувати стабільну зв'язність мережі навіть за умов протидії та втрати частини агентів. Це свідчить про наукову обґрунтованість запропонованих рішень і їхню значущість для подальшого розвитку теорії та практики керування роями БПЛА.

Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність дисертаційного дослідження визначається тим, що запропоновані в роботі методи мають прикладне спрямування і можуть бути використані для створення більш стійких та ефективних ройових систем БПЛА. Розроблені алгоритми дають змогу забезпечувати адаптивну зміну формації, підтримувати комунікаційну зв'язність між агентами та виконувати злиття незалежних груп без втрати керованості.

Особливе значення має те, що результати роботи орієнтовані на умови, близькі до реальних сценаріїв застосування БПЛА: нестабільний зв'язок, дія радіоелектронної боротьби, обмежені бортові ресурси та необхідність швидкої реакції на зміну структури рою. Розроблена програмна реалізація алгоритмів у середовищі Python дозволила провести імітаційну перевірку запропонованих рішень і підтвердити їхню ефективність за ключовими показниками — часом реконфігурації, енерговитратами та швидкістю узгодження структури рою.

Практичне значення отриманих результатів також полягає у можливості їх використання під час розробки інтелектуальних бортових систем керування та модулів зв'язку для перспективних автономних безпілотних авіаційних комплексів. Важливим підтвердженням прикладної цінності роботи є впровадження результатів дисертації у процеси розробки бортових систем на ДП «ВО “Київприлад”», що засвідчує їхню придатність для подальшого практичного застосування.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності, дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота Таранова Дениса Володимировича є завершеним науковим дослідженням, у якому послідовно розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, пов'язану з адаптивним керуванням реконфігурацією та структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності. Структура роботи є логічною та відповідає загальній меті дослідження: у вступі обґрунтовано актуальність, мету, об'єкт, предмет і завдання; у розділах основної частини розкрито теоретичні засади, математичні моделі, алгоритмічні рішення та результати їх експериментальної перевірки.

У першому розділі автором здійснено аналіз сучасного стану технологій керування роями БПЛА та визначено ключові обмеження існуючих централізованих і децентралізованих підходів. У наступних розділах послідовно розроблено методи адаптивного керування формацією, протокол інкрементального злиття топологій і метод асиметричного локального голосування для вибору координаторів. Завершальний розділ присвячено імітаційному моделюванню, що дозволило перевірити ефективність запропонованих рішень.

Зміст дисертації свідчить про те, що автор не обмежився теоретичним описом проблеми, а довів розроблені методи до рівня алгоритмічної реалізації та експериментальної перевірки. Це підтверджує завершеність дослідження, його практичну спрямованість і відповідність вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Принципи академічної доброчесності у роботі дотримано. У дисертації зазначено, що вона містить результати власних досліджень, а використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. У висновку також підтверджено відсутність необґрунтованих запозичень і плагіату. Отже, дисертаційна робота може бути оцінена як самостійне, логічно завершене та належним чином оформлене наукове дослідження.

Мова та стиль викладення результатів

Мова дисертаційного дослідження є науковою, фаховою та достатньо аргументованою. Автор дотримується логіки академічного викладу: від постановки проблеми та аналізу існуючих підходів до формування власних моделей, алгоритмів і результатів їх експериментальної перевірки.

Стиль роботи відповідає тематиці дослідження та специфіці спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Автор коректно використовує терміни, пов'язані з роями БПЛА, децентралізованим керуванням, комунікаційними графами, спектральним аналізом, штучними потенціальними полями та імітаційним моделюванням.

Позитивним є те, що складні технічні положення викладено у взаємозв'язку з практичними задачами дослідження, що полегшує розуміння логіки запропонованих рішень. Окремі речення та фрагменти, насичені аббревіатурами й англomовними скороченнями, можуть потребувати уважного прочитання, однак це зумовлено специфікою предметної області та не впливає на загальну якість роботи.

Отже, мова та стиль викладення результатів є належними, відповідають вимогам науково-дослідної літератури та забезпечують достатній рівень зрозумілості й доказовості поданого матеріалу.

Повнота оприлюднення результатів

Результати дисертаційного дослідження достатньо повно відображені в опублікованих наукових працях здобувача. Основні положення роботи викладено у 9 наукових публікаціях, з яких 4 належать до публікацій у наукових фахових виданнях України, а 5 — до матеріалів наукових конференцій. Така кількість і спрямованість публікацій свідчить про належний рівень апробації отриманих результатів.

Опубліковані праці розкривають основні складові дисертації: питання точного керування БПЛА, гібридні методи перебудови рою, прогнозування рухомих цілей, адаптивне уникнення перешкод, децентралізовану комунікацію малих роїв БПЛА та застосування багаторівневих формацій. Це дає підстави стверджувати, що публікації охоплюють ключові результати дослідження та відображають його наукову логіку.

Окремо слід відзначити апробацію результатів на міжнародних, всеукраїнських та науково-практичних конференціях, що дало змогу представити основні положення дисертації у фаховому середовищі та підтвердити їхню актуальність для прямої автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій і безпілотних авіаційних систем.

Отже, оприлюднення результатів дисертації можна вважати повним і достатнім. Публікації здобувача відповідають змісту дисертаційної роботи, не

суперечать її основним положенням і підтверджують завершеність проведеного дослідження.

Загальна характеристика структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота побудована за традиційною для кваліфікаційних наукових праць логікою: від обґрунтування актуальності та аналізу сучасного стану проблеми до розробки власних методів, їх теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки. Структурно дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Її обсяг, кількість ілюстративного матеріалу, таблиць, додатків і використаних джерел відповідають характеру та змісту проведеного дослідження.

У вступній частині автор визначає науково-прикладну проблему, пов'язану з підвищенням ефективності та живучості роїв БПЛА в умовах невизначеності, радіоелектронних завад і нестабільної комунікаційної взаємодії. Тут сформульовано мету роботи, завдання, об'єкт і предмет дослідження, а також наведено основні положення наукової новизни та практичного значення.

Перший розділ має оглядово-аналітичний характер. У ньому розглянуто сучасний стан технологій керування групами БПЛА, типи ройових архітектур, особливості статичних, динамічних та адаптивних формацій, а також сфери застосування роїв дронів. Важливим є те, що автор не обмежується загальним описом, а поступово підводить до постановки задачі адаптивної зміни формації в умовах складного середовища.

Другий розділ становить теоретичну основу дослідження в частині вибору та утримання формації рою. У ньому розглянуто математичні та алгоритмічні засади керування формацією, зокрема застосування PSO-правил, топологічних обмежень, консенсусних механізмів і штучних потенціальних полів. Саме цей розділ формує підґрунтя для подальшого синтезу адаптивних алгоритмів керування.

Третій розділ присвячено проблемі структурного злиття незалежних груп БПЛА. У ньому запропоновано архітектуру злиття роїв, протокол інкрементального злиття топологій, реалізований як скінченний автомат, а також

алгоритм асиметричного локального голосування для вибору координаторів. Окремо розглянуто питання обчислювальної складності, часових затримок і спектральної оцінки перехідних процесів.

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження та перевірки ефективності запропонованих методів. За допомогою імітаційного моделювання в середовищі Python досліджено динаміку реконфігурації рою, процес інкрементального злиття та стійкість мережі за різних стратегій реконфігурації. Отримані результати підтверджують практичну спрямованість роботи та узгоджуються з поставленими завданнями.

Отже, зміст дисертації повністю відповідає її темі, а структура роботи забезпечує послідовне розкриття дослідження. Матеріал викладено системно: від класифікації та аналізу роїв БПЛА до створення методів адаптивного керування, злиття топологій і перевірки їх ефективності засобами моделювання.

Зауваження та недоліки дисертаційної роботи

Поряд із загальною позитивною оцінкою дисертаційної роботи слід зазначити окремі положення, які потребують уточнення або можуть бути розвинені в майбутньому.

1. Запропоновані в роботі алгоритми адаптивної реконфігурації та структурного злиття роїв БПЛА мають належне теоретичне обґрунтування й підтверджені імітаційним моделюванням. Водночас подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на перевірку цих алгоритмів у режимі hardware-in-the-loop або на реальних бортових платформах, оскільки саме такі випробування дали б змогу оцінити вплив затримок, обмежених обчислювальних ресурсів і нестабільності реальних каналів зв'язку.

2. У дисертації основна увага приділена роям малих БПЛА мультироторного типу, тоді як застосування запропонованого підходу до апаратів з фіксованим крилом потребує додаткового дослідження. Зокрема, варто було б окремо розглянути модифікацію нижнього рівня

керування з урахуванням мінімальної швидкості польоту, обмежень на маневрування та радіуса розвороту.

3. У роботі наведено вагомі результати щодо підвищення ефективності реконфігурації, зокрема скорочення часу перехідного процесу на 32% та зменшення енерговитрат на 14%. Водночас було б доцільно ширше показати, як ці показники змінюються за різних масштабів рою та різних рівнів втрати агентів, що дало б змогу повніше оцінити масштабованість запропонованих рішень.

Висловлені зауваження не є принциповими, не знижують наукової новизни та практичного значення дисертаційної роботи, а лише окреслюють можливі напрями її подальшого розвитку.

Загальний висновок на дисертаційну роботу

Дисертація Таранова Дениса Володимировича є цілісною та завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій послідовно розглянуто проблему адаптивного керування реконфігурацією та структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності, радіоелектронних завад і нестабільної комунікаційної взаємодії.

Автором проведено ґрунтовний аналіз сучасних підходів до керування роями БПЛА, розроблено власні математичні моделі й алгоритмічні рішення, а також здійснено їх експериментальну перевірку засобами імітаційного моделювання. Отримані результати свідчать про наукову новизну, практичну спрямованість і достатній рівень обґрунтованості положень, винесених у дисертаційній роботі.

Дисертація має логічну структуру, викладена на належному науковому рівні, відповідає принципам академічної доброчесності, а її основні положення апробовані та оприлюднені у наукових публікаціях. Висловлені зауваження не є принциповими та не впливають на позитивну оцінку проведеного дослідження.

З огляду на актуальність теми, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів і завершеність дослідження, дисертаційна робота

«Методи адаптивного керування реконфігурацією та структурним злиттям роїв БПЛА в умовах невизначеності» відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Таранов Денис Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Рецензент:

кандидат технічних наук, професор,
професор кафедри авіоніки та систем
управління Національного університету
«Київський авіаційний інститут»



Микола ФІЛЯШКІН



*Дієний Рішенням № 10/2023
Голова комісії
Генеральний секретар НАУ
Генеральний директор*