

Голові спеціалізованої вченої ради  
ДФ 26.204.005  
в Інституті проблем математичних машин і  
систем НАН України  
доктору технічних наук, доценту  
Бегуну Василю Васильовичу

## **РЕЦЕНЗІЯ**

**ІЄВЛЄВА Миколи Георгійовича**, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника, ученого секретаря Інституту проблем математичних машин і систем НАН України на дисертацію **ОЛЕКСІЄНКА Петра Дмитровича «Моделі та метод програмного керування роями дронів на основі групового інтелекту»** подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

### **1. Актуальність теми дослідження**

Розширення сфер застосування безпілотних літальних апаратів супроводжується розвитком ройових технологій, у межах яких група автономних дронів спільно виконує поставлену місію. Розподілення функцій, локальна взаємодія та використання групового інтелекту надають таким системам переваги порівняно з окремими БПЛА, зокрема адаптивність до зміни ситуації, можливість масштабування та стійкість до втрати окремих агентів. Водночас ефективність рою безпосередньо залежить від організації програмного керування кожним його учасником. Дрон-агент повинен паралельно опрацьовувати дані підсистем спостереження, контролювати

власний стан, планувати подальші дії та обмінюватися інформацією з іншими агентами. Збільшення кількості взаємодіючих процесів підвищує вимоги до швидкодії програмного забезпечення, використання обчислювальних ресурсів та передбачуваності часової поведінки системи.

Найвні реалізації часто ґрунтуються на процедурному описі алгоритмів та періодичному опитуванні станів. Така організація ускладнює аналіз паралельності процесів і може призводити до затримки між виникненням події та відповідною реакцією агента. Тому важливим є перехід до подієво-орієнтованого керування, за якого обробка ініціюється фактом зміни стану системи або зовнішнього середовища.

Дисертаційна робота **Олексієнка Петра Дмитровича** спрямована на розроблення моделей та методу програмного керування роями дронів на основі вбудованих формалізованих моделей агентів. Використання керуючих Е-мереж, їх удосконалення подієвими тригерами та застосування MVC-підходу до організації взаємодіючих паралельних процесів формують основу для скорочення часу реакції та підвищення ефективності виконання ройової місії.

Тема дисертаційного дослідження є актуальною як з теоретичного погляду, пов'язаного з розвитком формальних моделей мультиагентного керування, так і з практичного погляду, пов'язаного зі створенням програмних систем для колективного використання БПЛА у моніторингових, пошукових та оборонних сценаріях.

## **2. Зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими планами, програмами, фундаментальними та прикладними дослідженнями**

Дисертаційне дослідження виконувалося у зв'язку з державною прикладною НДР «Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів», яка реалізовувалася в Національному університеті «Чернігівська політехніка» протягом 2023–2025 років, № державної реєстрації 0123U101819.

Тематиці цієї роботи відповідають отримані в дисертації результати щодо моделювання поведінки оборонного рою, організації взаємодії автономних агентів та програмної реалізації алгоритмів керування БПЛА.

### **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їхня достовірність**

Обґрунтованість представлених у дисертації положень забезпечується належним опрацюванням наукових джерел, чіткою постановкою наукового завдання та обґрунтованим вибором методів дослідження. Автором використано формальні методи опису керуючих алгоритмів, мультиагентне й імітаційне моделювання, програмну реалізацію та експериментальний аналіз характеристик системи керування.

Експериментальну перевірку проведено за уніфікованими сценаріями й параметрами, що забезпечує порівнюваність результатів подієвого та циклічного підходів. Оцінювання середніх значень часу реакції, їх розсіювання, ресурсного навантаження та результативності місії підтверджує достовірність основних висновків роботи.

Викладені результати мають послідовний і взаємопов'язаний характер, а сформульовані висновки відповідають змісту проведених теоретичних та експериментальних досліджень.

### **4. Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

У дисертаційній роботі отримано сукупність взаємопов'язаних наукових результатів, спрямованих на формалізацію та програмну реалізацію процесів керування агентами рою БПЛА. Їх новизна визначається запропонованими моделями поведінки окремого агента і рою загалом, удосконаленням керуючих Е-мереж та розвитком методу програмного керування на основі вбудованих виконуваних моделей.

До найбільш вагомих наукових результатів дисертації належать:

1. Вперше розроблено формальну модель алгоритму керування агентом у складі рою дронів, яка, на відміну від існуючих, безпосередньо виконує роль трирівневої програми керування з подієво-орієнтовним реагуванням на зміну ситуації, що забезпечує узгоджене прийняття рішень при виконанні місії.

2. Вперше розроблено мультиагентну модель поведінки рою мультикоптерних дронів при виконанні місії із захисту інфраструктурних об'єктів, яка, на відміну від існуючих, відтворює роль групового інтелекту в процесі відбиття нападу повітряних цілей з урахуванням можливостей підсистем спостереження та розпізнавання, що дозволяє отримувати попередні оцінки ефективності проєктних рішень по системним показникам.

3. Удосконалено формальний апарат керуючих Е-мереж шляхом введення подієвих тригерів переходів, що забезпечує асинхронну активацію елементів моделі на рівнях реагування, планування та взаємодії без використання циклічного сканування станів системи керування, що забезпечує значне скорочення часу реакції на події.

4. Отримав подальший розвиток метод програмного керування роєм дронів, який, на відміну від існуючих, базується на MVC-підході в запропонованій інтерпретації до процесів керування та взаємодії вбудованих моделей агентів у реальному часі, що забезпечує самоорганізацію поведінки рою дронів з використанням групового інтелекту.

## **5. Теоретична цінність і практична значущість наукових результатів**

Теоретична цінність дисертаційної роботи полягає у розвитку методу програмного керування роєм дронів на основі вбудованих формалізованих моделей агентів. Запропонований метод поєднує керуючі Е-мережі, подієво-орієнтовану організацію обчислень та MVC-підхід, що забезпечує

безпосереднє виконання моделі поведінки у програмному контурі керування БПЛА.

Розроблений метод дозволяє скоротити час реакції на події, зменшити кількість непродуктивних операцій та підтримувати паралельне виконання процесів реагування, планування і взаємодії агентів.

Практична значущість одержаних результатів визначається створенням програмного пакета мовою Python, який може використовуватися для розроблення систем керування роями БПЛА.

#### **6. Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях**

Результати, що становлять наукову новизну та практичну цінність дисертаційної роботи, знайшли належне відображення в опублікованих працях **Олексієнка Петра Дмитровича**. Зміст публікацій розкриває основні етапи дослідження – від побудови моделей поведінки рою і формалізації алгоритмів керування до програмної реалізації та експериментального оцінювання запропонованого підходу.

Результати проведеного дисертаційного дослідження було опубліковано у 6 наукових працях, а саме: 2 (у співавторстві) у наукових фахових виданнях, 3 наукові праці (у співавторстві) опубліковані у виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, 1 теза доповідей (у співавторстві) у збірниках матеріалів конференцій.

#### **7. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності**

У дисертаційному дослідженні фактів порушення академічної доброчесності не виявлено. Використання наукових положень і результатів інших авторів супроводжується відповідними посиланнями, що засвідчує дотримання здобувачем установлених вимог академічної етики.

## **8. Дискусійні положення та зауваження до дисертації**

1. Запропонована інтерпретація архітектури MVC для організації взаємодії вбудованих моделей, механізму їх виконання та засобів спостереження є логічною. Проте в роботі недостатньо обґрунтовано переваги MVC порівняно з компонентними, сервісними та ROS/ROS2-орієнтованими архітектурами програмного забезпечення багатоагентних робототехнічних систем.

2. У дисертації використано NetLogo для дослідження колективної поведінки рою, Gazebo для моделювання фізичної взаємодії, Python для реалізації керуючих E-мереж, а також апаратну платформу на базі Jetson Nano і Pixhawk. Доцільно було б більш чітко пояснити роль кожної з вказаних платформ та обґрунтувати причини використання саме такого поєднання інструментальних засобів.

3. У роботі основну увагу приділено автономній взаємодії агентів і формуванню колективної поведінки на основі локальних рішень. Роль оператора або зовнішнього координатора розкрита обмежено: недостатньо описано процедури постановки та коригування місії, зміни пріоритетів цілей, аварійного втручання і контролю виконання завдань.

4. Апаратна платформа експериментального прототипу описана достатньо детально, однак у роботі обмежено представлено обґрунтування вибору саме використаного бортового комп'ютера та польотного контролера.

Разом із тим, зазначені зауваження мають загальний характер і не знижують наукової та прикладної значущості виконаного дослідження.

## **9. Загальна оцінка дисертаційної роботи, її відповідність встановленим вимогам**

Дисертаційна робота **Олексієнка Петра Дмитровича** на тему «Моделі та метод програмного керування роями дронів на основі групового інтелекту» є завершеним науковим дослідженням, яке за актуальністю, достовірністю

отриманих результатів, їхньою науковою новизною і практичною цінністю відповідає вимогам «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 року № 44, а її автор, **Олексієнко Петро Дмитрович**, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

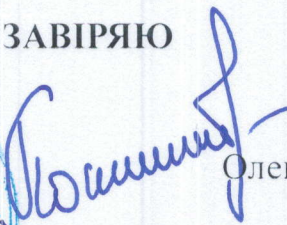
**Рецензент:**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
учений секретар Інституту проблем математичних машин і систем  
Національної академії наук України  **Микола ІЄВЛЄВ**

Підпис к.т.н., с.н.с. Миколи ІЄВЛЄВА **ЗАВІРЯЮ**

Директор ІПММС НАН України

чл-кор. НАН України



**Олег Копійка**