

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

ВІДГУК

офіційного опонента **КЛЮШНІКОВА Ігоря Миколайовича**, доктора
технічних наук, доцента кафедри кібербезпеки та інтелектуальних
інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»
на дисертаційну роботу **ОЛЕКСІЄНКА Петра Дмитровича** на тему
«**Моделі та метод програмного керування роями дронів на основі групового
інтелекту**» представлену на здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань
12 Інформаційні технології за спеціальністю
122 Комп'ютерні науки

Актуальність теми роботи

Сучасний розвиток безпілотної авіації характеризується переходом від використання окремих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) до створення ройових систем, здатних узгоджено виконувати завдання моніторингу територій, пошуку та супроводу об'єктів, перехоплення повітряних цілей і захисту критичної інфраструктури. Застосування рою дає змогу розподілити функції між апаратами, підвищити стійкість системи до втрати окремих її елементів та забезпечити виконання місії без постійного централізованого керування. Водночас рій БПЛА функціонує в умовах мінливого середовища, обмеженої спостережуваності, нестабільного зв'язку та жорстких вимог до часу реагування. Кожен БПЛА повинен одночасно контролювати власний стан, опрацьовувати інформацію від бортових підсистем, взаємодіяти з іншими

учасниками рою та своєчасно коригувати свою поведінку. Зі збільшенням кількості апаратів і складності місії традиційне циклічне опитування станів створює додаткове обчислювальне навантаження та може спричиняти затримки реакції, критичні для швидкоплинних і оборонних сценаріїв. Тому тема роботи присвячена розробці моделі та методу програмного керування, орієнтованих на подієве реагування, паралельне виконання процесів і забезпечення узгоджених дій агентів на основі групового інтелекту, є актуальною. Спрямованість дисертаційного дослідження на використання моделей безпосередньо у програмному контурі БПЛА відповідає сучасним вимогам до автономності, швидкодії та масштабованості таких систем.

Зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими планами, програмами, фундаментальними та прикладними дослідженнями

Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з державною прикладною науково-дослідною роботою (НДР) «Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів», що виконувалася у Національному університеті «Чернігівська політехніка» у 2023–2025 роках, № державної реєстрації 0123U101819, де досліджувалися процеси функціонування рою мультикоптерних БПЛА під час виконання захисних місій. З тематикою НДР узгоджуються розроблені в дисертації мультиагентна модель оборонного рою, моделі поведінки дронів-агентів та метод програмного керування їх узгодженими діями на основі групового інтелекту.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їхня достовірність

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, є достатньо аргументованими й логічно впливають із поставленої мети та завдань, що розв'язуються. Їх обґрунтованість

забезпечується системним аналізом сучасних підходів до керування ройовими системами БПЛА, формалізацією поведінки БПЛА-агента та дослідженням колективної поведінки рою засобами мультиагентного й імітаційного моделювання.

Достовірність результатів підтверджено програмною реалізацією запропонованих моделей і методу, інструментальним вимірюванням часових та ресурсних показників, а також серіями порівняльних експериментів для подієвого і циклічного підходів за уніфікованих умов. Використання експериментально визначених характеристик часу реакції у вдосконаленій імітаційній моделі рою дозволило додатково оцінити вплив запропонованих рішень на результативність виконання місії.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається розробленням моделей і методу програмного керування ройовими системами БПЛА, орієнтованих на забезпечення узгодженої поведінки дронів у динамічних умовах виконання місії. Автором поєднано мультиагентне подання рою, механізми групового інтелекту, трирівневу організацію керування та подієве реагування на зміни ситуації.

До основних наукових результатів, що характеризують новизну виконаного дослідження, належать:

- *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.

- *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 проектних рішень по системним показникам.

- *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 100-кратне скорочення часу реакції на події.

- *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.

Теоретична цінність і практична цінність наукових результатів

Теоретична цінність дисертаційної роботи полягає у розвитку засад програмного керування ройовими системами БПЛА на основі вбудованих виконуваних моделей поведінки дронів-агентів. Запропонований метод програмного керування роєм поєднує багаторівневу організацію поведінки окремого БПЛА, подієве реагування та групове прийняття рішень, що дозволяє пов'язати локальні дії агентів із результативністю виконання спільної місії.

Практична цінність отриманих результатів визначається можливістю їх використання для побудови систем керування роями БПЛА, у яких критичними є швидкість реагування, узгодженість дій та раціональне використання бортових обчислювальних ресурсів. Розроблена програмна реалізація забезпечує вбудовування SEN-моделей безпосередньо у контур керування дроном і може

застосовуватися у системах моніторингу, пошуку, супроводу та перехоплення цілей, а також захисту інфраструктурних об'єктів.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність та оформлення.

Викладені у дисертаційній роботі наукові положення, результати дослідження та сформульовані висновки є достатньо аргументованими й логічно взаємопов'язаними.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Структура роботи є цілісною і логічно пов'язаною - послідовність викладу матеріалу забезпечує логічний перехід від аналізу сучасного стану досліджуваної проблеми до розроблення нових наукових рішень, їх програмної реалізації та експериментальної перевірки. Зміст розділів повною мірою відповідає поставленій меті та сформульованим завданням дослідження.

У вступі автором належним чином визначено актуальність теми, сформульовано мету й основні завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет дослідження, наведено характеристику наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, а також інформацію щодо їх апробації, публікацій і впровадження.

Перший розділ присвячено дослідженню аналізу існуючих підходів до побудови систем керування роєм безпілотних літальних апаратів, розглянуто класичні та сучасні моделі організації колективної поведінки, а також виявленню обмежень існуючих рішень у контексті реактивності, масштабованості та ефективності використання ресурсів.

У другому розділі проаналізовано теоретичні основи використання мереж Петрі та їх розширених формалізмів для моделювання паралельних і розподілених систем, обґрунтовано доцільність застосування керуючих *E*-мереж

як бази для побудови моделі керування роєм БПЛА, а також сформульовано вимоги до структури та поведінки системи.

Третій розділ містить удосконалений метод керування на основі керуючих *E*-мереж, опис механізмів подієво-орієнтованого виконання, структуру програмної реалізації, інтеграцію з підсистемами БПЛА та принципи організації паралельного виконання і синхронізації процесів у межах одного агента.

У четвертому розділі наведено результати практичної реалізації запропонованого підходу, наведено результати експериментального порівняння подієво-орієнтованого та циклічного підходів, виконано аналіз часових характеристик, ресурсного навантаження та масштабованості, а також підтверджено ефективність запропонованої моделі.

У висновках узагальнено основні результати дисертаційного дослідження, які повністю відповідають поставленій меті та завданням роботи і впливають зі змісту виконаних досліджень.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, характеризується чіткою логікою викладу, внутрішньою завершеністю, належним рівнем наукової аргументації та відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки.

Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно відображено в публікаціях здобувача. Опубліковані праці висвітлюють питання моделювання оборонного рою БПЛА, розроблення вбудованих моделей алгоритмів керування, реалізації подієво-орієнтованого підходу, а також експериментальної перевірки процесів керування роєм БПЛА.

Результати проведеного дисертаційного дослідження було опубліковано у 6 наукових працях, а саме: 2 (у співавторстві) у наукових фахових виданнях категорії Б, 3 наукові праці (у співавторстві) опубліковані у періодичних виданнях, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus, 1 тези доповідей (у співавторстві) у збірнику матеріалів міжнародної науково-практичної конференції.

Дотримання вимог академічної доброчесності

За результатами перевірки тексту дисертації не виявлено ознак академічної недоброчесності, зокрема фальсифікації, фабрикації, плагіату, компіляції чи інших неправомірних запозичень. Використані у роботі наукові положення, результати досліджень та ідеї інших авторів супроводжуються належними бібліографічними посиланнями, що свідчить про дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності та вимог до оформлення наукових праць.

1. Дискусійні положення та зауваження до дисертації

1. У роботі формалізовано зовнішню подію та запропоновано механізм слухачів подій, однак семантика подієвої взаємодії розкрита не повністю. Зокрема, недостатньо визначено правила обробки одночасних подій, пріоритети критичних сигналів, порядок розв'язання конфліктів, а також реакцію моделі на дублювання, втрату або запізнення подій.

2. Формальна модель керування на основі керуючих Е-мереж описана достатньо детально, проте в дисертації не наведено повного аналізу її класичних формальних властивостей. Поза детальним розглядом залишилися питання досяжності станів, живучості, обмеженості, відсутності тупикових ситуацій і коректності синхронізації паралельних гілок, притаманних мережам Перрі.

3. Трирівнева структура керування агентом, що охоплює рівні реагування, планування та взаємодії, є послідовною і відповідає логіці функціонування

ройової системи. Разом із тим у роботі недостатньо обґрунтовано, чому саме трирівнева декомпозиція є найбільш придатною для поставленої задачі та за якими критеріями визначено межі відповідальності між рівнями.

4. Незважаючи на практичну реалізацію та впровадження результатів дисертаційної роботи, у тексті недостатньо систематизовано експлуатаційні особливості запропонованої системи. Зокрема, стисло розглянуто процес початкового налаштування рою, конфігурування агентів, заміни або додавання БПЛА, контролю працездатності компонентів і відновлення системи після виникнення відмов.

5. Формулу часу доступної реакції на стор. 26 доцільно представити як скалярний добуток зміни координат та зміни швидкостей. У представленому вигляді вона не враховує напрями відносного руху БПЛА.

6. На стор. 32 максимальний достпний час реагування подано як $T_{avail} = R_{det} - R_{safe}v_T$, що порушує розмірність.

Водночас, ці зауваження не зменшують загальної цінності роботи, а лише окреслюють напрями для подальших досліджень.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Олексієнка Петра Дмитровича на тему «Моделі та метод програмного керування роями дронів на основі групового інтелекту» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 122 Комп'ютерні науки, виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання присвячене розробці методу програмного керування роєм дронів як мультиагентною системою БПЛА з використанням вбудованих моделей алгоритмів поведінки дронів-агентів з підтримкою прийняття групових рішень.

Отримані в дисертаційній роботі теоретичні та практичні результати мають істотне значення для розвитку інформаційних технологій, зокрема у сфері керування роями БПЛА.

Вважаю, що дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю наукових результатів та практичною цінністю повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, передбаченим пп.6-9 «Порядку присудження 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, а здобувач Олексієнко Петро Дмитрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Офіційний опонент:

доцент кафедри кібербезпеки та інтелектуальних
інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



Ігор КЛЮШНІКОВ

Підпис Ігоря Ключнікова засвідчую

Голова Вченої ради Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»
доктор технічних наук, професор



Ольга ШИПУЛЬ