



**МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ  
ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА  
АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ  
ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ**

03035, м. Київ-35, вул. Митрополита Василя  
Липківського, 35, т./ф. (044) 206-31-87,  
e-mail: dei2005@ukr.net

**MINISTRY OF ENVIRONMENTAL  
PROTECTION AND NATURAL RESOURCES  
OF UKRAINE  
STATE ECOLOGICAL ACADEMY OF  
POST-GRADUATE EDUCATION AND  
MANAGEMENT**

35, Metropolitan Vasil Lypkivskyi str., Kyiv, 03035,  
Ukraine, tel./fax (044) 206-31-87,  
e-mail: dei2005@ukr.net

---

**Голові разової спеціалізованої вченої  
ради ДФ 26.002.176 у Національному  
технічному університеті України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

---

**03056, Київ, Берестейський проспект,  
37**

***ВІДГУК ОПОНЕНТА***

**професора кафедри екологічної безпеки**

**Державної академії післядипломної освіти та управління,  
Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України,  
доктора технічних наук, професора *МАШКОВА Олега Альбертовича*  
на дисертацію *КИР'ЯНОВА Артемія Юрійовича***

**за темою: "МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ГРУПОВИМ ПОЛЬОТОМ  
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ  
НЕОДНОРІДНОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ",**

**з галузі знань 12 – Інформаційні технології  
за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення  
на здобуття ступеня доктора філософії**

**Актуальність теми дисертації.**

У теперішній час має місце різке зростання застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в різних галузях, від сільського господарства до оборони, пошуково-рятувальних операцій і моніторингу навколишнього середовища. Це в свою чергу вимагає розробки складних систем управління. Такі системи повинні бути здатні координувати декілька БПЛА для

спільного та ефективного виконання складних завдань. Децентралізовані системи управління, на відміну від централізованих, забезпечують стійкість до збоїв окремих БПЛА і масштабованість для великих груп БПЛА. Застосування теорії неоднорідних векторних полів в контексті групового управління БПЛА є особливо актуальним через зростаючу складність місій, які вимагають адаптивних і динамічних стратегій реагування. Ці 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. Розробка методів і програмного забезпечення для децентралізованого управління є важливим кроком на шляху до реалізації повного потенціалу групового управління БПЛА, пропонуючи практичне рішення, яке відповідає майбутньому напрямку розвитку автономних систем.

Сучасні БПЛА можуть бути оснащені широким спектром датчиків, в тому числі камерами високої роздільної здатності, тепловізорами, LIDAR і мультиспектральними сенсорами. Ці інструменти значно розширили спектр застосування БПЛА – від моніторингу навколишнього середовища і реагування на катастрофи до управління сільським господарством та інспекції інфраструктури.

Розгортання кількох безпілотних літальних апаратів (агентів) у складі великого рою для вирішення завдань забезпечення екологічної безпеки довкілля та природних ресурсів має свої переваги. Спільні дії кількох агентів характеризуються широкою областю застосування та мають переваги при здійсненні екологічного моніторингу відповідних районів та об'єктів критичної інфраструктури. При цьому обстеження району та об'єктів спостереження здійснюється швидше, ніж за допомогою одного безпілотного літального апарату (БПЛА). Також з'являється можливість застосовувати різноманітну апаратуру екологічного спостереження (в оптичному, радіолокаційному, інфрачервоному діапазонах тощо).



Результатом будуть більш достовірні потоки даних, які будуть сформовані після комплексції (об'єднання) різних фізичних даних спостереження. Крім того, з'являється можливість застосування рою агентів БПЛА на різних висотах та швидкостях, щоб здійснювати екологічний моніторинг з різних напрямів.

Розгортання кількох агентів у складі великого рою має свої переваги. Спільні дії кількох роботів є широкою областю застосування. Можна візуалізувати кілька можливих переваг, зокрема у випадку безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Рій БПЛА може обстежити територію швидше, ніж один БПЛА, який кілька разів пролітає ту саму територію. Підходи вищого рівня, такі як декомпозиція пошукової сітки для окремих агентів, легше реалізувати, коли існує кілька агентів. БПЛА меншого розміру оснащені обмеженим обладнанням, щоб зменшити споживання енергії обладнанням і зменшити загальну вагу літака. Можна оснастити різних агентів у рої різними датчиками. Результатом будуть більш багаті потоки даних, які будуть створені після об'єднання різних даних датчиків. Подібні експерименти можна уявити, коли рій агентів БПЛА працює на різних висотах, щоб досліджувати наземні об'єкти, таким чином забезпечуючи різні точки зору на ціль. Такі покращення результатів агентами роїв особливо корисні, враховуючи високодинамічне середовище, в якому працюють БПЛА. Ситуація на полі бою може вже змінитися до того моменту, коли один БПЛА здійснить прохід над територією, потім переміститься, щоб охопити інші області, а потім повернеться. Делікатні інциденти, такі як пошуково-рятувальна місія (SAR), можуть вимагати залучення кількох агентів. Область може бути занадто великою для покриття одним БПЛА, і більше агентів підвищує ймовірність швидкого пошуку жертви.

Застосування БПЛА вийшло далеко за межі військових і спостережних функцій. У сільському господарстві БПЛА революціонізують способи моніторингу здоров'я посівів, управління ресурсами і максимізації

врожайності. У сфері охорони довкілля дрони відіграють вирішальну роль у моніторингу популяцій диких тварин, картографуванні лісових масивів і відстеженні змін в екосистемах, спричинених зміною клімату чи людською діяльністю. Комерційний сектор використовує БПЛА для безлічі цілей, зокрема, для доставки вантажів, інспекції інфраструктури та аерофотозйомки, і це лише деякі з них.

Систему з декількома транспортними засобами можна описати як ефективну, результативну, гнучку та демонструє більшу толерантність до несправностей, ніж один агент. Це робить більш життєздатним мати рій БПЛА намагаються виконати певне завдання. Однак складне середовище, в якому вони працюють, ускладнює створення стійких роїв БПЛА. Успішне впровадження роя БПЛА продемонструвало виняткову здатність виконувати завдання в різних сферах, таких як сільське господарство, обстеження природних ресурсів води, ґрунтів, тваринного світу, пошуково-рятувальні операції, а військові.

Непередбачені події, такі як погана погода, вторгнення ворожих агентів, зіткнення з чужорідними тілами чи іншими агентами рою, втрата зв'язку або помилки в схемах керування та програмному забезпеченні – лише деякі з подій, які можуть перешкоджати роботі рою. Часто поточні багатоагентні системи є взаємозалежними у високій мірі, що робить втрату навіть одного агента катастрофічною для всього рою та прогресу його місії.

Однак невдачі можуть мати різні форми, як внутрішні, так і зовнішні. Збої зв'язку, навігації та спостереження (CNS) класифікуються як внутрішні несправності, тоді як погода та перешкоди є зовнішніми подіями. Це дослідження є частиною поточних зусиль, спрямованих на підвищення стійкості роїв БПЛА. Щоб реалізувати відмовостійкість у зграях, нам спочатку потрібно концептуалізувати її в поведінкових реакціях, які потім можна реалізувати.

Результати проведеного аналізу військових конфліктів останніх



десятиліть показали, що одним із перспективних напрямів розвитку військової авіації, який значно підвищив би ефективність ударних авіаційних комплексів, є створення комплексів з безпілотними літальними апаратами та розвиток тактики їх застосування. При цьому має місце значне підвищення ролі безпілотної авіації як при вирішенні завдань забезпечення інших видів і положів військ, так і при вирішенні розвідувальних, ударних та спеціальних завдань. На етапі розвитку військової безпілотної авіації йдуть роботи зі створення нових ударних безпілотних літальних апаратів, здатних вирішувати завдання у складі групи. У зв'язку з цим актуальним є вирішення завдання щодо обґрунтування структури розподіленої системи управління групою ударних безпілотних літальних апаратів та розробки алгоритмів її функціонування, що дозволяють підвищити ефективність групового застосування ударних безпілотних літальних апаратів шляхом координації їх спільних дій в автономному режимі.

Слід враховувати, що ситуація в районі моніторингу може змінитися ще до того моменту, коли один БПЛА здійснить прохід над об'єктом спостереження, потім переміститься, щоб досліджувати інші об'єкти, а потім повернеться. Подібні ситуації виникають під час спостереження великомасштабних явищ та надзвичайних ситуацій таких як повені, пожежі, техногенні аварії та катастрофи. При цьому такі операції як пошуково-рятувальна місія (SAR) можуть вимагати залучення кількох агентів.

Систему з декількома транспортними засобами можна описати як ефективну, результативну, гнучку та більш толерантну до несправностей, ніж один агент. Це робить доцільним мати рій БПЛА, які здійснюють завдання екологічного моніторингу. Успішне впровадження рою БПЛА продемонструвало виняткову здатність виконувати завдання в різних сферах, таких як сільське господарство, обстеження природних ресурсів води, ґрунтів, тваринного світу, пошуково-рятувальні та військові операції.

Непередбачені події, такі як погана погода, завади, зіткнення з

чужорідними тілами чи іншими агентами рою, втрата зв'язку або помилки в схемах керування та програмному забезпеченні – лише деякі з подій, які можуть перешкоджати роботі рою. Часто багатоагентні системи є взаємозалежними, що робить втрату навіть одного агента катастрофічною для всього рою та ефективності його місії. Тому потрібні наукові розробки, спрямовані на підвищення стійкості роїв БПЛА.

В даний час ройова робототехніка технологічно передбачає проектування, будівництво та розгортання груп роботів, які координують і спільно вирішують загальну проблему або виконують окремі завдання. Ця технологія черпає натхнення в природних самоорганізованих системах, таких як соціальні комахи, зграї риб або птахів, які характеризуються колективною поведінкою на основі простих місцевих правил взаємодії. Як правило, ройова робототехніка реалізує інженерні принципи з вивчення природних систем. Розгортання кількох роботизованих комплексів (агентів) у складі великого рою має свої переваги. Тому спільні дії кількох роботів мають різні сфери застосування.

Можна виділити кілька можливих переваг, зокрема у випадку БПЛА. Рій БПЛА може досліджувати територію швидше, ніж один БПЛА, який пролітає над тією ж територією кілька разів. Розподіл функцій спостереження між окремими агентами, які оснащені обмеженим бортовим обладнанням, дозволяє більш ефективно вирішувати завдання використання БПЛА з різним бортовим обладнанням, наприклад, для пошуково-рятувальної місії. Це робить більш життєздатним мати рій БПЛА, які намагаються виконати певне завдання. Однак складне середовище, в якому вони працюють, ускладнює створення стійких роїв БПЛА. Успішна реалізація групи БПЛА продемонструвала здатність виконувати завдання в різних галузях, таких як сільське господарство, обстеження техногенних небезпечних об'єктів, транспортних систем, енергетичних комплексів, природних ресурсів води, ґрунту, тваринного світу, пошуково-рятувальні



операції, військові завдання.

На етапі розвитку безпілотної авіації екологічного моніторингу ведуться роботи зі створення нових безпілотних літальних апаратів, здатних вирішувати завдання спостереження в складі групи. У зв'язку з цим актуальним є розв'язання задачі обґрунтування структури розподіленої системи керування групою безпілотних літальних апаратів та розробки алгоритмів її функціонування. Це підвищить ефективність групового застосування безпілотних літальних апаратів екологічного моніторингу за рахунок координації їх спільних дій в автономному режимі.

Застосування штучного ройового інтелекту сприяє підвищенню ефективності використання рою безпілотних літальних апаратів для вирішення завдань забезпечення екологічної безпеки, захисту довкілля та природних ресурсів, виконання міжнародних зобов'язань України у сфері охорони навколишнього природного середовища. Тому необхідна наукова розробка та впровадження сучасних технологій забезпечення ройового моніторингу при управлінні роєм безпілотних літальних апаратів.

При створенні та застосуванні рою літальних апаратів доцільне враховувати досвід застосування малорозмірних безпілотних літальних апаратів, сьогоденні напрацювання в галузі штучного інтелекту та потреби в їх у майбутньому використанні.

Необхідність визначення наукових проблем керування польотом зграї безпілотних літальних апаратів визначається технологією створення та методологією застосування ройового інтелекту для управління групами малорозмірних безпілотних літальних апаратів

Розробка методології ройового інтелекту для управління групами малорозмірних безпілотних літальних апаратів передбачає врахування тенденцій розвитку малорозмірних БПЛА, зокрема перехід від використання одиночних БПЛА до груп та комплексів БПЛА. Основні проблеми управління групами БПЛА пов'язані з використанням методів ройового

інтелекту для вирішення типових завдань, що підтверджується комп'ютерним моделюванням.

Розробка штучного ройового інтелекту передбачає визначення предмету досліджень, - інформаційна взаємодія елементів групи безпілотних літальних апаратів та їх уразливість до деструктивного інформаційного впливу.

На даний момент ця проблема актуальна для апаратів, які застосовуються як у цивільних, так і оборонних сферах. Крім того, завдання виявлення прихованого деструктивного інформаційного впливу є невирішеним у контексті групи безпілотних літальних апаратів.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів та програмного забезпечення управління груповим польотом безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Важливо забезпечити групі автономних апаратів певну геометричну організацію, де вони рухаються як єдине ціле. Цей підхід використовується для виконання великої кількості практичних завдань. Наприклад, БПЛА літакового типу мають високу швидкість та маневреність, що корисно для завдань, де важлива тривалість та дальність польоту.

Для забезпечення такого управління необхідно впровадити методи, які дозволяють апаратам діяти незалежно один від одного, уникаючи централізованого керування. Такий підхід часто порівнюють з груповим управлінням, де кожен апарат приймає власні рішення. Групове управління в контексті безпілотних літаків розглядається, як організація групи апаратів з метою виконання складних завдань.

Метод векторних полів польоту по заданій траєкторії є одним із способів досягнення такого групового управління, де апарати формують та підтримують задані геометричні структури для спільного виконання завдань.

Метод управління групою автономних літаків, засновано на децентралізованій архітектурі консенсусу та використанні неоднорідного векторного поля проходження прямолінійного маршруту. Цей підхід спрямовано на створення алгоритмів управління, що дозволяють літакам утримувати задане положення в групі під час руху по прямолінійному



горизонтальному маршруту. Він базується на принципах консенсусу та використанні векторних полів проходження маршруту, що забезпечує гнучкість у виборі бажаної форми групи з урахуванням складної динаміки БПЛА.

Децентралізована архітектура консенсусу дозволяє апаратам узгоджувати своє положення за рахунок обміну інформацією, сприяючи точному слідуванню по заданій траєкторії та збереженню відносних положень літаків в групі. Цей метод має суттєве значення для застосування у сферах, де сумісне функціонування безпілотних літаків у групі є ключовим: моніторинг земної поверхні, пошук та рятування, виконання військових завдань. Ці методи гарантують асимптотичне наближення відносних положень в групі до заданих, а також наближення швидкості кожного літака до середньої крейсерської швидкості.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладного завдання, - розробки методів та архітектури програмного забезпечення для децентралізованого групового управління безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з урахуванням особливостей їх динаміки, а також розробка математичної моделі для експериментального дослідження ефективності управління груповим польотом БПЛА.

Тому тема дисертаційної роботи *КИР'ЯНОВА Артемія Юрійовича* присвячена рішення цього наукового завдання є актуальною.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Автор добре розуміє специфіку задачі, що розглядається у дисертації та коректно формулює її постанову. Дослідження підходів до групового управління БПЛА та постановка завдань (аналіз стану розвитку БПЛА, аналіз можливостей групового застосування, аналіз наукових методів для управління групами БПЛА) які виконано досить кваліфіковано, склали

основу розробки децентралізованого управління для груп БПЛА на основі методу неоднорідного векторного поля.

Тому автор обґрунтовано використовує загальноприйняті методи дослідження (лінійна алгебра, теорія групового управління, метод функцій Ляпунова, методи аналітичної геометрії, методи теорії нечіткої логіки, теорія нелінійного управління, теорія адаптивного управління, комп'ютерне моделювання) для розробки програмного забезпечення для групового управління БПЛА, розробки програмного забезпечення для управління та візуалізації групового польоту БПЛА.

Під час проведення досліджень автор спирається на відомі факти та наукові досягнення в обраній сфері, які отримані з використанням апробованого математичного апарату, який є адекватним інженерії програмного забезпечення децентралізованого управління груповим польотом безпілотних літальних апаратів.

Розроблені автором практичні рекомендації ґрунтуються на розробленому ним науково-методичному апараті, який є достатньо чутливим для відповідних змін вихідних даних.

Відмічаю, що наукові положення та рекомендації, які сформульовані у висновках до розділів (стор. 56, 83, 103, 152) та загальних висновках (стор. 153-155), зроблено науково обґрунтовано і логічно за результатами експериментальних досліджень, та оцінки їх достовірності та адекватності.

#### **Достовірність одержаних результатів.**

Достовірність наукових положень, які захищаються здобувачем, висновків і рекомендацій підтверджується їх відповідністю методології дослідження поставленого наукового завдання; повнотою розгляду на теоретичному і експериментальному рівнях об'єкту дослідження, що охоплюють його змістовні і процесуальні характеристики; застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження і можливістю відтворення результатів дослідження.



Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації ґрунтуються на:

- використанні результатів аналізу стану розвитку БПЛА, можливостей групового застосування, наукових методів для управління групами БПЛА;
- коректності застосування загальноприйнятих методів дослідження: лінійна алгебра, теорія групового управління, метод функцій Ляпунова, методи аналітичної геометрії, методи теорії нечіткої логіки, теорія нелінійного управління, теорія адаптивного управління, комп'ютерне моделювання.;
- узгодженістю із наявними результатами програмного забезпечення для управління та візуалізації групового польоту БПЛА;
- даних про їх успішне практичне застосування та порівняння отриманих результатів з відомими даними незалежних дослідників та результатами досліджень.

**Наукова новизна та важливість результатів**, які одержані автором в дисертації, полягають в наступному:

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання щодо розробки методів та архітектури програмного забезпечення для децентралізованого групового управління безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з урахуванням особливостей їх динаміки, а також розробка математичної моделі для експериментального дослідження ефективності управління груповим польотом БПЛА.

Метою дисертації є підвищення ефективності управління формуванням та підтримкою заданого положення групи автономних безпілотних літальних апаратів за рахунок розробки методів, алгоритмів та програмного забезпечення децентралізованого управління, що враховує нелінійний характер структури систем "автопілот-апарат".

Для досягнення цієї мети в роботі було сформульовано і вирішено наступні завдання:

- аналіз відомих підходів для вирішення завдання групового управління БПЛА та вибір серед них таких, що можлива організація децентралізованого групового управління БПЛА;
- аналіз існуючих методів та технологій створення інформаційної системи для забезпечення групового управління БПЛА;
- розробка архітектури та програмного забезпечення для управління та візуалізації групових польотів БПЛА;
- удосконалення методу простору відносних станів для формування групового управління БПЛА;
- удосконалення методу формування керуючих впливів наведення БПЛА на основі застосування методів нелінійного синтезу;
- розробка методів та алгоритмів групового управління БПЛА з урахуванням особливостей динаміки реальних систем «автопілот-БПЛА»;
- удосконалення математичної моделі серед MATLAB/Simulink, що дозволило провести моделювання управління групами БПЛА;
- проведення математичного моделювання та виконання обчислювальних експериментів з метою оцінки ефективності розроблених алгоритмів.

Проведені в роботі дослідження багатогранної архітектури, притаманної системам з декількома БПЛА, дозволили автору дослідити складну динаміку, яка лежить в основі ефективного управління групою і оперативної координації. Завдяки ретельному аналізу було встановлено, що децентралізовані механізми управління пропонують значні переваги в підвищенні гнучкості, масштабованості і стійкості груп БПЛА. Порівняльний аналіз літератури щодо стратегій управління формуваннями і їхнього обслуговування показав, що перевага надається централізованим підходам через простоту їхньої імплементації. Однак ці методи часто не дозволяють створювати формування довільної геометричної форми і не мають всебічного математичного аналізу стійкості. Такі обмеження



підкреслюють необхідність інноваційних, повністю децентралізованих алгоритмів управління. В роботі розглядається різниця між підходами відстеження траєкторії і слідування за траєкторією, актуальність методів слідування за траєкторією в системах спільного управління. Ці методи особливо актуальні для БПЛА з фіксованим крилом, які виконують різноманітні місії, пропонуючи стратегічну точність і ефективність в навігації заздалегідь визначеними маршрутами. Розроблені технології та методики мають на меті вирішити існуючі проблеми точності, ваги та залежності від зовнішніх систем навігації, що відкриває нові перспективи для застосування БПЛА. В роботі обґрунтовано, що результати дисертації зможуть забезпечити критичні технологічні переваги в управлінні групами БПЛА, сприяючи їх ширшому впровадженню та використанню в різних областях. Отже, управління групами БПЛА лежить в площині розвитку децентралізованих, гнучких стратегій управління. Такі стратегії, як визначено в роботі, повинні надавати пріоритет адаптивності, дозволяючи групам БПЛА динамічно коригувати свої формування і поведінку в режимі реального часу, тим самим максимізуючи оперативну ефективність для різних профілів місій. Пошук повністю децентралізованих алгоритмів є перспективним напрямком досліджень, який відкриє нові можливості і підвищить оперативну ефективність груп БПЛА.

В роботі розглянуто групове управління БПЛА літакового типу з урахуванням особливостей динаміки реальних систем «автопілот-БПЛА». Реалізовано модель архітектури децентралізованої взаємодії БПЛА на основі консенсусу. Автором удосконалено закони управління, що враховують обмеження на вхідні сигнали управління системи «автопілот-БПЛА», для випадку формування та підтримки групи за загальним курсовим кутом, а також доведено їхню стійкість загалом. Також удосконалено закони управління, що враховують обмеження на вхідні сигнали управління системи «автопілот-БПЛА», для випадку формування та підтримки групового

управління при орієнтуванні за загальним заданим прямолінійним шляхом, а також доведено їх асимптотичну стійкість загалом. На основі неоднорідного векторного поля за допомогою запропонованих законів управління синтезовані керуючі впливи формуванням для підтримки форми групи і для швидкостей та курсових кутів БПЛА, що гарантують збіжність поточних курсових кутів і швидкостей до заданих у законах управління, для сценарію польоту БПЛА прямолінійним шляхом. Реалізовано алгоритм адаптації системи «автопілот-БПЛА», що дозволяє зберегти стійкість і якість перехідних траєкторій БПЛА у разі, якщо динаміка одного або кількох апаратів відрізняється від первісного налаштування алгоритмів групового управління.

Сучасні методи групового управління БПЛА зазвичай покладаються на поєднання GPS, інерціальної навігації та базового зв'язку між БПЛА. Тому автором запропонована архітектура, заснована на алгоритмах блок-схеми, побудована на цих основах з покращеною візуальною обробкою для ідентифікації лідера, більш досконалими протоколами зв'язку та адаптивними можливостями прийняття рішень. Такий підхід забезпечує більш тонкий контроль і адаптивність у складних умовах. Покращена інформованість про ситуацію, яка досягається завдяки візуальній обробці, може значно покращити здатність групового управління підтримувати формування та виконувати завдання в умовах відсутності GPS. Крім того, використання алгоритмів може дозволити групі виконувати більш складні місії з більшою автономністю і меншим прямим наглядом з боку людини. Розроблена програмна архітектура, яка показана на блок-схемах, алгоритми якої забезпечують адаптивне керування та навігацію. Показані алгоритми зменшують залежність від початкових положень БПЛА, підвищуючи надійність і стабільність місій. Таким чином, сучасне програмне забезпечення для управління БПЛА зорієнтоване на інтеграцію надійних алгоритмів керування з гнучкістю адаптації до змін зовнішніх умов. Для



розробки програмної архітектури на основі запропонованих алгоритмів для групового управління БПЛА пропонується надати можливість самостійного прийняття рішень кожному з БПЛА, зберігаючи при цьому безперебійний зв'язок між БПЛА для забезпечення стійкості групи.

В роботі обґрунтовано, що розробка програмного забезпечення для децентралізованого управління БПЛА є значним кроком вперед у сфері безпілотних літальних апаратів. Ця система, інтегрує адаптивне налаштування коефіцієнтів у реальному часі, що є значним відходом від традиційних методів, заснованих на нечіткій логіці. Система не лише керує, але й візуально відображає динаміку групових управлінь БПЛА, підвищуючи операційну ефективність і безпеку. Завдяки своїй архітектурі це програмне забезпечення слугує важливим інтерфейсом між складними даними траєкторії польоту групи БПЛА та користувачем, візуалізуючи і контролюючи групу безпілотників. Включення бази даних для зберігання інформації про дрони, групові управління і місії, поряд з можливостями взаємодії з користувачем через графічний інтерфейс (фронтенд), сприяє створенню інтегрованого середовища управління. Крім того, компонент симуляції системи моделює поведінку БПЛА в тривимірному просторі, враховуючи різні статуси місії та умови, в яких перебувають дрони, забезпечуючи оновлення та точність даних у режимі реального часу. Система управління та візуалізації групового польоту БПЛА відрізняється інтегрованим інтерфейсом користувача, який об'єднує управління групою БПЛА, та моніторинг за станом місій і БПЛА в групі, забезпечуючи просте та зрозуміле керування. Система здійснює оновлення даних кожену секунду, враховуючи точність локацій в реальному часі, що ідеально підходить для динамічних місій. Система також має механізми адаптації до потенційних відмов дронів, що знижує ризики під час місій. Користувачі можуть легко управляти групами БПЛА та місіями через фронтенд, швидко адаптуючись до змінних умов. Ці особливості роблять систему високоадаптивною та

ефективною, забезпечуючи точність та надійність у складних операціях. Всі ці характеристики роблять її унікальною порівняно з іншими системами управління БПЛА.

У даній роботі

***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 і місіями. Використання даного програмного забезпечення дозволяє керувати групами БПЛА для виконання різних завдань, зменшуючи енергетичні та часові витрати на виконання завдань.

***Удосконалено:***

1. 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 %.

2. Метод формування керуючих впливів наведення БПЛА, який відрізняється від традиційних законів керування застосуванням методу нелінійного 154 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 %.

3. Удосконалено модель групового польоту БПЛА в середовище 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.

Таким чином, запропонований науково-методичний апарат в галузі інженерії програмного забезпечення (моделі, методи, методики і алгоритми) забезпечує підвищення ефективності управління формуванням та підтримкою заданого положення групи автономних безпілотних літальних апаратів.

Аргументування та критичне оцінювання порівняно з відомими рішеннями запропонованих автором нових рішень.

Як наукову основу, на наш погляд, слід використовувати теоретико-множинну модель інформаційної взаємодії групи безпілотних літальних апаратів на основі результатів порівняльної оцінки стратегій групового управління. Проведений аналіз такої моделі, дозволяє виявити та оцінити вразливі елементи, які здійснюють інформаційну взаємодію та схильні до деструктивного інформаційного впливу. Надалі модель інформаційного взаємодії (як внутрішнього, і зовнішнього) вводиться деструктивна інформація, що призводить до порушення функціонування одного літального апарату чи групи загалом.

Проведений аналіз показав, що інформаційна взаємодія групи

безпілотних літальних апаратів потребує підвищення фактора захищеності як від деструктивного інформаційного впливу, так і від прихованого деструктивного інформаційного впливу. Прихований деструктивний інформаційний вплив неможливо виявити класичними підходами забезпечення інформаційної безпеки. Отже, необхідно розробити нові методи, що дозволяють збільшити захищеність інформаційної взаємодії від таких атак.

Практична значущість пропонованого підходу полягає в тому, що результати аналізу теоретико-множинної моделі інформаційної взаємодії групи безпілотних літальних апаратів дозволять розробити та використовувати нові методи забезпечення інформаційної безпеки для ліквідації специфічних уразливостей, пов'язаних не тільки з класичними, але і з «м'якими» методами впливу. Такий підхід буде потрібний для застосування як зграї (групи) безпілотних літальних апаратів, так і для автономних робототехнічних систем.

Першою науковою проблемою при цьому є обґрунтування структури розподіленої системи управління групою ударних безпілотних літальних апаратів та розробка алгоритмів координації їхньої взаємодії для максимізації цільового показника на прикладі атаки кількох не однаково важливих цілей в автономному режимі.

При обґрунтуванні структури розподіленої системи управління групою безпілотних літальних апаратів та розробці алгоритму координації їхньої взаємодії пропонується використовувати методи системного аналізу. При цьому для синтезу показника ефективності координованих дій безпілотних літальних апаратів можуть використовуватися метод аналізу ієрархій та методи лінійного програмування, а для оцінки ефективності алгоритму координації дій безпілотних літальних апаратів у різних ситуаціях метод імітаційного моделювання.

Друга проблема полягає у необхідності розвитку теорії функціонування



системи управління групою безпілотних літальних апаратів, що дозволяє організовувати їх координовані дії в автономному режимі на основі теорії мультиагентних систем, а також розробку інтегрального показника якості оцінки групових дій безпілотних літальних апаратів.

Вирішення цієї проблеми передбачає використання представленої розподіленої мережецентричної системи управління групою безпілотних літальних апаратів з метою суттєвого підвищення ефективності групової атаки ударними безпілотними літальними апаратами та середнього виграшу.

Розподілена мережецентрична система управління групою ударних безпілотних літальних апаратів та алгоритми її функціонування можуть бути використані розробниками безпілотних літальних апаратів при проектуванні нових зразків авіаційної техніки.

Третя проблема пов'язана з можливістю застосування технологій мультиагентних систем до завдання керування роєм. За допомогою опису ключових особливостей ройового управління та протоколу локального голосування будується стратегія адаптивного управління за умов невизначеностей. У цьому алгоритм управління роєм динамічних об'єктів формується з урахуванням досягнення консенсусу.

Четверта проблема стосується аспектів інформаційної безпеки групових мобільних робототехнічних комплексів із ройовим інтелектом. При цьому обговорюються способи впливу протидіючої сторони на ройовий алгоритм. Чисельне моделювання можливих деструктивних інформаційних впливів на роєві робототехнічні системи свідчить про можливість усунення загрози для групи динамічних об'єктів – втручання в управління роєм з боку злоумисників. Таким чином обґрунтовуються нові вимоги щодо перспективних механізмів забезпечення інформаційної безпеки ройових систем.

Термін роєвий інтелект (PI) (англ. swarm intelligence) був введений Херардо Бені і Ван Цзіном в 1989 році, в контексті системи клітинних

роботів. Він визначає колективну поведінку децентралізованої системи, що самоорганізується. При цьому РІ розглядається теоретично штучного інтелекту як метод оптимізації. Проте раніше ідея докладно розглянута Станіславом Лемом у романі «Непереможний» (1964) та есе «Системи зброї двадцять першого століття, або Еволюція догори ногами» (1983).

Системи ройового інтелекту, як правило, складаються з безлічі агентів (елементи рою), що локально взаємодіють між собою і з навколишнім середовищем. Ідеї такої взаємодії, як правило, походять від природи, а особливо від біологічних систем. У ройовій системі відсутня централізована система управління, яка б вказувала кожному з агентів те що, що треба робити. При цьому кожен агент (елемент) слідує дуже простим правилам, а локальні і, певною мірою, випадкові взаємодії призводять до виникнення інтелектуальної групової поведінки, яка не контролюється окремими елементами.

Слід зазначити, що точне (математично формалізоване) визначення ройового інтелекту досі не сформульовано. Однак, в цілому, РІ повинен являти собою багатоагентну систему, яка б мала поведінкою, що самоорганізується, яка, сумарно, повинна проявляти деяку розумну поведінку.

Проблема групового управління автономними об'єктами у реальних умовах на сьогоднішній день є досить актуальною. Це обумовлено складністю управління, динамічними змінами параметрів обстановки, обмеженнями на вхідні сигнали управління в реальних системах «автопілот-БПЛА». Питанням групового управління безпілотних літальних апаратів присвячено багато досліджень та публікацій таких зарубіжних та українських вчених: A. Piccard, C. Ryan, C. Peebles, G. Collins, A. Erickson, N. Baldock, M. R. Mokhtarzadeh-Dehghan, L. N. Craig, R. Olfati-Saber, R.W. Beard, W. Ren, T.W. McLain, H. Yamaguchi, а також Л. Артюшин, О. Кононов, О. Машков, Д. Кучеров, Т. Шевельова, П. Павленко, Д. Бондарев, В. Голембо, А. Бочкарьов, О. Мартинюк, В. Герасименко, О. Барабаш та інших.



В багатьох роботах цих дослідників закладено основу для дослідження задач групового управління автономних БПЛА та їх спільного виконання завдань. Особливістю цих завдань є побудова та підтримка заздалегідь визначеної геометричної форми групи автономних об'єктів, що функціонують як єдине ціле протягом всієї місії. Зокрема, групи БПЛА знаходять своє застосування в багатьох практичних завданнях, підтверджуючи ефективність використання груп БПЛА у порівнянні з поодинокими польотами. Вирішення окреслених наукових завдань вимагає міждисциплінарного підходу, об'єднання знань з теорії управління, оптимізації, комп'ютерних наук та дослідження операцій. Успіх у цій справі обіцяє значно розширити можливості управління групами БПЛА, що дозволить проводити більш складні, автономні операції, які можуть адаптуватися до широкого спектру застосувань і середовищ.

Відповідно до загальноприйнятого визначення, під груповим управлінням мається на увазі отримання заданої заздалегідь геометричної форми групою автономних динамічних об'єктів. У процесі подальшого виконання завдання група має підтримувати цю форму, діючи як тверде тіло. Групи БПЛА використовуються у великій кількості практичних завдань. Тому проблеми групового управління БПЛА отримують останнім часом велику увагу дослідників усього світу. Результати досліджень свідчать про успіх запропонованих методів управління. Алгоритми, розроблені на їх основі, продемонстрували здатність до стабільного утримання групи та точного слідування по заданим траєкторіям руху літаків за різними сценаріями.

Ройова робототехніка технологічно передбачає проектування, конструювання і розгортання великих груп роботів, які координують і спільно вирішують загальну проблему або виконують окремі завдання. Ця технологія черпає натхнення з природних самоорганізованих систем, таких як соціальні комахи, зграї риб або птахів, що характеризуються колективною поведінкою на основі простих локальних правил взаємодії. Як правило,

ройова робототехніка реалізує інженерні принципи з вивчення цих природних систем.

Таким чином, ройова робототехніка прагне створити системи, які є більш надійними, відмовостійкими та гнучкими, ніж окремі елементи загальної системи, і які можуть краще адаптувати свою поведінку до змін у навколишньому середовищі.

Ройова робототехніка передбачає застосування ройового інтелекту, обчислювального моделювання колективної поведінки, що самоорганізується. Однак реалізація ройової поведінки в системі вимагає набагато більше, ніж просто застосування алгоритмів ройового інтелекту до існуючих роботизованих платформ. Насправді це часто вимагає переглянути традиційні роботизовані види діяльності, такі як планування, організація, керування, контроль. Тому втілення цього дослідження на практиці є викликом, який ще потребує належного вирішення. Власне кажучи, на сьогодні жодного реального застосування ройової робототехніки не існує. Тому потрібні додаткові дослідження, щоб отримати знання та практику, необхідні для того, щоб вивести рої роботів з лабораторії в реальний світ.

Ретроспективний аналіз інноваційних і перспективних напрямків створення ройової робототехніки.

За останні два десятиліття ройова робототехніка виросла з невеликої області, започаткованої кількома дослідженнями з явним біологічним натхненням, до зрілого наукового напрямку, в якому брали участь кілька лабораторій і дослідників по всьому світу. Пошук у Google Scholar показує, що фраза «ройова робототехніка» вперше з'явилася в 1991 році, і що її використання залишалося дуже обмеженим до 2003 року, коли воно почало значно зростати.

Проведений аналіз наукових джерел показують, що, незважаючи на те, що дослідницька галузь ройової робототехніки бере свій початок у кількох



основоположних роботах, надрукованих у 1990-х роках, лише з 2000 році він почав значно зростати.

Спочатку вивчення ройової робототехніки було спрямоване на перевірку концепції стигмергії (стигмергія – форма опосередкованого зв'язку між природними та штучними агентами, коли робота, яку виконує агент, залишає слід у середовищі, який стимулює виконання наступної роботи тим самим або іншими агентами).

Після кількох початкових спроб після 2000 року з'явилося кілька досліджень, зосереджених на таких завданнях, як пошук об'єктів. У кількох випадках рій роботів використовувався для точного повторення динаміки, що спостерігається в біологічних системах (приклад змішаного біологічно-роботичного суспільства).

Одним із перших міжнародних проектів, що досліджували співпрацю в групі роботів, був проект *Swarmbots*, який фінансувався Європейською Комісією в період з 2001 по 2005 рік. У цьому проекті група з до 20 роботів здатна до самоскладання, тобто фізично з'єднуючись один з одним, щоб сформувати взаємодіючу структуру, наприклад, для колективного транспорту, охоплення території та пошуку об'єктів. Головним результатом проекту було реалізація прикладу самоорганізованих роботів, які співпрацюють для вирішення складного завдання, причому роботи в рої з часом виконують різні ролі.

Проект *Swarmanoid* (2006–2010) поширив ідеї та алгоритми, розроблені в *Swarmbots*, на різномірні рої роботів, що складаються з трьох типів роботів — літаючих, скелелазних і наземних — які співпрацювали для виконання завдань пошуку.

Паралельно з успішною демонстрацією парадигми ройової робототехніки було проведено дослідження в напрямку мініатюризації апаратного забезпечення. Це передбачає розгортання сотень, можливо, тисяч взаємодіючих малих роботів. Роботи стають все меншими, аж до спроб

дизайну в міліметровому масштабі. Мініатюризація апаратного забезпечення та інтеграція відповідного набору датчиків завадили прогрес в цьому напрямку.

Лише через кілька років було проведено експерименти з тисячею роботів: кілобот. Кілоботи були задумані для підтримки першої демонстрації великого рою роботів, розробленого для формування форми, і пізніше були використані для кількох успішних досліджень,

Робототехніка роїв не обмежується наземними платформами, - розглядаються можливості застосування надводних і підводних роботів, а також рої літаючих дронів. Хоча водні та підводні технології все ще потребують значних зусиль для розвитку, натомість дрони вже комерціалізовані та представляють собою дуже перспективну платформу для застосування дистанційного зондування в різних сферах.

При цьому, основним напрямком впровадженням робототехніки є розробка методології керування зграями роботів. Ця методологія передбачає розробку аналітичних моделей ройових систем, прийняття еволюційних підходів до оптимізації, застосування мінімалістичних контролерів (нейронні мережі).

Таким чином, визначення надійної та ефективної інженерної методології для роїв роботів буде вимагати значних зусиль у найближчі роки.

Застосування ройових принципів у робототехніці називають груповою робототехнікою, тоді як поняття «ройовий інтелект» належить до загального набору алгоритмів. Так, наприклад, «ройове прогнозування» застосовується у вирішенні деяких завдань прогнозування.

Важлива проблема пов'язана з розробкою та реалізацією самих алгоритмів ройового управління (методи та критерії оптимізації) при вирішенні конкретних прикладних завдань застосування зграї рухомих об'єктів.



Нині такими вважаються такі алгоритми: метод рою частинок, мурашиний алгоритм, бджолиний алгоритм, штучна імунна система, алгоритм сірих вовків, алгоритм гравітаційного пошуку, алгоритм альтруїзму, алгоритм інтелектуальних крапель води, стохастичний дифузійний пошук, багаторойова оптимізація.

1. Метод рою частинок, МРЧ (англ. Particle Swarm Optimization, PSO) - метод чисельної оптимізації, для використання якого не потрібно знати точного градієнта функції, що оптимізується. МРЧ був доведений Кеннеді, Еберхартом та Шіі, спочатку призначався для імітації соціальної поведінки. При цьому алгоритм був спрощений і було визначено, що він придатний для виконання оптимізації. Книга Кеннеді та Еберхарта описує багато філософських аспектів МРЧ та так званого ройового інтелекту. Велике дослідження програм МРЧ зроблено Поле. МРЧ оптимізує заздалегідь сформульовану функцію, підтримуючи популяцію можливих рішень, званих частинками, та переміщуючи ці частинки у просторі рішень згідно із простою формулою. Переміщення підпорядковується принципу найкращого знайденого у цьому положенні становища, яке постійно змінюється під час перебування частинками вигідних положень.

2. Мурашиний алгоритм. Мурашиний алгоритм (алгоритм оптимізації мурашиної колонії, англ. ant colony optimization, ACO) — один із ефективних поліноміальних алгоритмів для знаходження наближених розв'язків задачі комівояжера, а також аналогічних завдань пошуку маршрутів на графах. Цей підхід запропонований бельгійським дослідником Марко Доріго (Marco Dorigo). Суть підходу полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, що шукають шляхи від колонії до їжі. В основі алгоритму лежить поведінка мурашиної колонії - маркування вдалих доріг великою кількістю феромону. Робота починається з розміщення мурах у вершинах графа, потім починається рух мурах - напрямок визначається імовірнісним методом, в якому враховуються: ймовірність переходу в графі, довжина відповідних

переходів, кількість феромонів на кожному з переходів, величина, що визначає ефективність алгоритму.

3. Бджолиний алгоритм (алгоритм бджолоїної колонії). Штучний алгоритм бджолоїної сім'ї (англ. artificial bee colony optimization, ABC) - алгоритм рою на основі мета-евристичного алгоритму, введеного Карабогом в 2005. Він імітує поведінку кормових медоносних бджіл. Алгоритм ABC складається з трьох етапів: робочої бджоли, бджоли-наглядача та бджоли-розвідника. Бджоли використовують алгоритм локального пошуку в околиці рішень, вибраних на основі детермінованого відбору робочими бджолами та ймовірнісного відбору бджолами-наглядачами. Бджола-розвідник виконує відмову від виснажених джерел живлення у кормовому процесі. За цією аналогією рішення, які більше не корисні для пошуку рішення, відкидаються та додаються нові рішення (за аналогією з дослідженням нових регіонів у пошуку джерел).

4. Штучна імунна система. Штучна імунна система - це адаптивна розподілена обчислювальна система, яка використовує моделі, принципи, механізми та функції, описані в теоретичній імунології, які застосовуються для вирішення прикладних завдань. Незважаючи на те, що природні імунні системи вивчені далеко не повністю, на сьогодні існують щонайменше три теорії, що пояснюють функціонування імунної системи та описують взаємодію її елементів, а саме: теорію негативного відбору, теорію клональної селекції та теорію імунної мережі. Вони стали основою створення трьох алгоритмів функціонування штучної імунної системи.

5. Алгоритм сірих вовків. Алгоритм оптимізації сірих вовків (Gray Wolf Optimizer, GWO) є мета-евристичним алгоритмом оптимізації, запропонованим С. Мирануничем і Дж. Р. Мирануничем у 2014 році. В основі цього алгоритму лежить імітація соціальної поведінки та ієрархії вовків у природі. Алгоритм використовує чотири типи вовків: альфа, бета, дельта та омега. Альфа-вовки домінують і приймають рішення про напрям



полювання, бета-вовки підпорядковуються і допомагають альфа-вовкам, дельта-вовки допомагають іншим вовкам і йдуть за лідерами, а омега-вовки зазвичай йдуть за іншими і виконують більшу частину роботи. Ця ієрархія використовується в алгоритмі відновлення позиції вовків і пошуку глобального оптимуму. У кожній ітерації алгоритму альфа, бета та дельта-вовки оновлюють свої позиції у просторі рішень, використовуючи власні найкращі рішення та найкращі рішення інших вовків. Омега-вовки оновлюють свої позиції, йдучи за найкращими вовками. Подібно до інших біоміметичних алгоритмів, алгоритм оптимізації сірих вовків використовує поведінку та взаємодію тварин у природі для створення ефективних методів вирішення складних завдань оптимізації.

6. Алгоритм гравітаційного пошуку. Алгоритм гравітаційного пошуку (англ. Gravitational Search Algorithm, GSA) — алгоритм пошуку, що ґрунтується на законі всесвітнього тяжіння та поняттях масової взаємодії. Алгоритм ґрунтується на теорії тяжіння з фізики Ньютона. В алгоритмі як пошукові агенти використовуються гравітаційні маси. Останніми роками розробили різні евристичні алгоритми оптимізації. Багато з цих алгоритмів ґрунтуються на природних явищах. Якщо порівнювати алгоритм гравітаційного пошуку коїться з іншими алгоритмами, цей алгоритм - одне з найефективніших у вирішенні різних завдань оптимізації нелінійних функцій.

7. Алгоритм альтруїзму. Дослідники зі Швейцарії розробили алгоритм, що ґрунтується на правилі Гамільтона сімейної селекції. Алгоритм показує, як альтруїзм особини в рої може з часом розвиватися і призведе до більш ефективної поведінки роя.

8. Алгоритм інтелектуальних крапель води. Алгоритм інтелектуальних крапель води (англ. IWD) - алгоритм рою на основі алгоритму оптимізації, який використовує методи природних річок та як вони знаходять майже оптимальні шляхи до місця призначення. Алгоритм знаходить оптимальні

або близькі до оптимальних шляхи, одержувані з реакціями, що протікають між краплями води, коли вода тече по руслу річки. В IWD алгоритмі кілька штучних крапель води залежать один від одного і здатні змінювати своє оточення таким чином, що знаходять оптимальний шлях на шляху найменшого опору. Отже, IWD алгоритм – це конструктивний популяційно-орієнтований алгоритм оптимізації.

9. Стохастичний дифузійний пошук. Цей алгоритм передбачає застосування методів Монте-Карло

10. Багаторойова оптимізація. Це новий, ще не досить розроблений підхід до створення та застосування груп роїв.

Щоб працювати в групі, окремі роботи повинні бути здатні взаємодіяти і спілкуватися один з одним, а також визначати роботи, яку вони виконують. Це передбачає відповідне програмне забезпечення при розгортанні роїв роботів.

Мініатюризація обладнання стане ключовим елементом для експериментів з великими роями та для багатьох майбутніх застосувань. В свою чергу зниження масштабу апаратного забезпечення створює надзвичайно складні проблеми, які досі не вирішені.

Крім того, поточна практика потребує збільшення розміру роїв, плавного переходу від малих до великих груп.

При цьому виникає проблема – як спроектувати поведінку рою (макрорівень), враховуючи, що ми можемо безпосередньо програмувати лише окремих роботів (мікрорівень), які складають рій, – це, ймовірно, найскладніший аспект для розгляду. Щоб вирішити цю проблему, доцільно запропонувати методології проектування керуючись біологічним натхненням, які є універсальними та придатними для багаторазового використання в різних прикладних контекстах, від шаблонів проектування до методів автоматичного проектування.



Крім того, є ключові аспекти, яким досі не приділялося достатньої уваги, - захист від зовнішніх атак, щоб зробити зграї стійкими до спроб зловмисників.

При цьому самоорганізація передбачає скоординований рух у зграї, розподіл завдання та приймання колективного рішення. У цьому відношенні ми сприяємо подальшому внеску біології, щоб надати нові принципи керування. Однак, слід уникати занадто великої довіри до «інструментів біологічного натхнення» і бути готовим до розробки управлінського рішення щоб надати рою здатність навчатися та покращувати свою продуктивність. У всіх випадках самоорганізація може бути більш корисною, ніж спроба прямого контролю.

Таким чином, ройова робототехніка прийняла парадигму самоорганізації, де управління роєм здійснюється за допомогою простих (стохастичних) правил, які визначають спосіб взаємодії роботів один з одним і з навколишнім середовищем без використання будь-якої форми централізованого контролю чи глобальних знань. Проте можна стверджувати, що в багатьох випадках доцільне застосування централізованих або ієрархічних форми керування елементами рою.

Однією з цілей ройової робототехніки є розробка та керування тисячами простих роботів, досягнення складної поведінки на рівні роя в результаті простої індивідуальної поведінки та численних взаємодій. Аспектом, який може максимізувати майбутній вплив роїв роботів, є використання тисяч мініатюрних роботів, розміри яких зменшуються до міліметрів або навіть мікро- чи нанометрів.

Такі зграї можуть отримати доступ до невеликих замкнутих просторів (наприклад, мікрофлюїдних каналів і людського тіла), маніпулювати мікроскопічними об'єктами (наприклад, мікропластиком або окремими клітинами) і самоорганізуватися для підтримки локалізованого лікування (наприклад, цільової доставки ліків). Зменшення розміру робота породжує

нові виклики, які необхідно вирішити, щоб ройна робототехніка могла пропонувати практичні рішення. Мікророботи та нанороботи стикаються з іншими фізичними законами, ніж у макроскопічному масштабі, що вимагає нових моделей колективної поведінки.

Сучасні підходи до мікророботів і нанороботів не використовують звичайне обладнання та створюють активні колоїдні частинки, біологічні роботи], наномашини, що живляться бактеріями і навіть керовані генетично сконструйовані організми. Загалом дослідження повинні зосереджуватися на методах керування, які використовують кілька ненадійних датчиків, мінімальні або повністю відсутні обчислювальні можливості та ненадійні дії. Рішення, які розробляють апаратне забезпечення для представлення властивостей самоорганізації, також є стохастичними.

Питання доцільності реалізації принципів децентралізації або ієрархії у зграї роботів або інтегрування цих двох аспектів, наразі недостатньо вивчене. При цьому створюються гібридні системи, де реалізуються ієрархічні структури управління, що є результатом процесів самоорганізації. Це забезпечує гнучкість поведінки, адаптивність до нових умов, стійкість до зовнішніх збурень. Усі ці функції принесуть користь зграям роботів, але неоднорідність не використовується настільки, як слід.

Дослідники Метьюз та інші, вивчаючи скоординовану колективну поведінку у фізично неоднорідних групах роботів, створили відповідну інфраструктуру рою, автономний перехід від суто самоорганізованого керування до ієрархічного керування та назад.

Проведений аналіз свідчить, що у реальному середовищі головна проблема, з якою стикається рій роботів, полягає в адаптації до несподіваних подій, таких як наявність перешкод або зміна атмосферних умов (наприклад, блискавки, вітер або дощ). Усі ці події можуть заважати рою рухатися вперед або виконувати завдання. У цих умовах рій повинен спільно адаптувати свою поведінку та самостійно змінювати свою стратегію. Такі колективні



здібності спостерігаються у деяких видів тварин, що живуть групою (зграї мошок, зграї риб, стада овець). У таких умовах реакція кількох особин, які помітили зміну навколишнього середовища, може поширюватися на всіх інших членів групи, дозволяючи їм ефективно реагувати на такі порушення, як, наприклад, напад хижака.

Такі колективні адаптаційні можливості є результатом не лише особливої форми взаємодії між індивідами, але й модуляції відносної інтенсивності цих взаємодій.

Перенесення зазначеного типу властивостей у зграї роботів могло б значно підвищити рівень їхньої автономності та було б перспективним напрямком дослідження.

Рої БПЛА повинні бути в безпеці під час виконання своїх завдань і вони також повинні бути стійкими до зовнішніх атак зловмисників. Крім того, збої в роботі рою можуть бути викликані також кількома зловмисними роботами, які можуть проникли в групу. Дослідження в області захисту роїв роботів все ще знаходяться в стадії розробки. Початкові роботи дозволяють вирішувати такі питання, як збереження конфіденційності інформації в рої, як уникнути перебоїв через наявність шкідливих роботів і як протистояти атакам.

У теперішній час взаємодія людини з одним роботом є достатньо добре вивченою проблемою, однак взаємодія з групою роботів відкриває абсолютно нові виклики. Основна складність при цьому полягає в тому, що в умовах самоорганізації рою немає чіткої сутності, з якою людина могла б встановити зв'язок.

Взаємодія людина-рій полягає в наданні інформації про цілі, яких потрібно досягти, або завдання, які потрібно виконати. Роєм можна керувати за допомогою кількох керованих користувачами роботів, вбудованих у рій. При цьому меншість зацікавлених агентів може визначати загальну поведінку групи. Подібні механізми являють собою ефективні засоби для

керування рою роботів. При цьому вони можуть створювати проблеми безпеки, які необхідно вирішити, щоб уникнути того, щоб кілька зловмисних роботів взяли під контроль увесь рій. В якості альтернативи користувач може контролювати зграї роботів або керувати ними безпосередньо (наприклад, за допомогою жестів або сигналів).

Безпосереднє керування роєм з боку користувача ускладнюється тим фактом, що зрозуміти, що робить рій, може бути дуже складно через безліч взаємодій, що відбуваються всередині рою, які може бути важко «прочитати» людині-спостерігачу. Тому ідентифікація діяльності має вирішальне значення. Можливі рішення можуть бути вбудовані в механізми самоорганізації рою, щоб зробити поточний стан і мету рою зручними для користувачів. Інтерфейси поведінки рою, можливо, із доповненою реальністю, може збирати та візуалізувати інформацію з рою. При цьому моделі колективної поведінки можуть забезпечити передбачення, які могли б допомогти користувачеві вжити відповідні дії (наприклад, шляхом видачі нових команд керування роєм). Розробка будь-якого управлінського рішення також вимагатиме розуміння психологічних ефектів, викликаних людьми, які взаємодіють із роєм роботів (зменшують стрес, покращують зручність використання та довіру).

Інтерфейси поведінки рою, можливо, доповнені реальністю, можуть збирати та візуалізувати інформацію з рою. При цьому моделі колективної поведінки можуть бути інтегровані, щоб забезпечити передбачення, які могли б допомогти користувачеві вжити відповідні дії (наприклад, шляхом видачі нових команд до керування роєм).

Дослідження ройової робототехніки будуть ключовими для вирішення складних проблем координації майбутніх застосувань робототехніки. При цьому розглядаються як кооперативні сценарії, - роботи, які координуються для виконання спільного завдання), так і напівкооперативні сценарії, а саме роботи які є власними інтересами.



Наприклад, спостереження за великою територією за допомогою одного робота може бути неможливим, і ефективним варіантом може бути використання багатьох роботів одночасно. Іншим прикладом є дослідження відповідного району спостереження за допомогою БПЛА. Якщо в цьому випадку один БПЛА може виконувати завдання моніторингу, це може бути недостатньо ефективним через обмежений час польоту та потрібний час щоб летіти назад для підзарядки. У таких умовах застосування кількох роботів може бути більш ефективним.

Після встановлення придатності мультироботної системи моніторингу району спостереження слід розглянути, який тип підходу до керування роєм буде найбільш прийнятним для розглянутої проблеми.

У деяких випадках централізоване керування роєм може бути можливим для вирішення проблем невизначеності завдань і непередбачуваності навколишнього середовища. Однак високий попит на онлайн-розпізнавання функцій і адаптацію до непередбачених ситуацій краще задовольнити за допомогою децентралізованих, самоорганізованих методів.

Технологія вибору ройових робототехнічних рішень при вирішенні прикладних завдань застосування.

Перше завдання полягає в тому, що слід передбачити використання багатороботної системи – і, як наслідок, групи роботів.

Після встановлення придатності мультироботної системи слід розглянути, який тип підходу до керування буде найбільш прийнятним для розглянутої проблеми.

Наприклад, коли неможливо чи доцільно координувати роботів централізовано, використання групи роботів може бути правильним шляхом. У деяких випадках централізоване перепланування може бути можливим для вирішення проблем невизначеності завдань і непередбачуваності навколишнього середовища. Однак високий попит на онлайн-розпізнавання

функцій і адаптацію до досвідчених непередбачених ситуацій краще задовольнити за допомогою децентралізованих, самоорганізованих методів.

Інший аспект, який слід розглянути, полягає в тому, чи розкладається дана проблема на фіксовану кількість чітко визначених завдань, які може вирішити команда БПЛА, кожен з яких має певну роль. Навіть якщо проблему краще вирішити за допомогою багатороботної системи, це не обов'язково визначає потребу в зграї БПЛА. Останнє вимагає ефективних пошукових здібностей, що краще виправдовується завданнями, які дозволяють різні розподіли ролей для доступних роботів.

Нарешті, підхід ройової робототехніки може бути правильним вибором, якщо очікується кореляція між числом роботів та збільшенням їх продуктивності.

Враховуючи ці міркування, слід критично оцінити потенційні області застосування ройової робототехніки, з точки зору переваг, які можна отримати при застосуванні ройової робототехніки. Діяльність і розподіл завдань, які виконує кожен робот, можуть бути певною мірою децентралізованими та самоорганізованими. Проте саме по собі конкретне завдання може не вимагати координації чи співпраці між роботами.

Подібні аспекти є фундаментальними в інших сферах застосування, таких як, наприклад, цивільний захист, де необхідність протистояти природним або антропогенним надзвичайним ситуаціям вимагає гнучкості зв'язків, підтримуючи роботів, здатних мати справу з аварійними ситуаціями.

Таким чином, розробка та впровадження ефективних роїв БПЛА є одним із найбільших викликів, які стоять перед робототехнікою, а також одним із найперспективніших напрямків дослідження.

Значні досягнення ройової робототехніки пов'язані з прогресом, досягнутим з використанням інноваційних технологій. Наприклад, нові матеріали, біогібридні рішення та нові способи зберігання та передачі



інформації допоможуть вирішити деякі поточні проблеми, пов'язані з апаратним забезпеченням роїв роботів.

Розробка методів штучного інтелекту, зокрема алгоритмів розподіленого навчання, які вимагають обмежених обчислень дозволить роєм роботів поступово збільшувати свою автономність. Рої повинні будуть забезпечити ефективність, що зараз є головною проблемою для всієї галузі робототехніки та штучного інтелекту, їхня складність може бути збільшена великою кількістю автономних об'єктів та їх численними взаємодіями один з одним, що є типовим для робототехнічних систем.

Таким чином, ройова робототехніка здійснює перехід від наукових розробок до реальних застосувань протягом поточного десятиліття. Такий перехід не буде негайним, але поступово залучатиме все більше і більше областей застосування до визначення нових викликів і створення попиту на нові технологічні рішення, які стимулюватимуть дослідження та інновації в наступні роки.

Проблеми створення та застосування штучного ройового інтелекту для забезпечення ефективного використання роєм роботизованих систем розглядалися в роботах багатьох авторів, наприклад:

Eva Horn, Lucas Marco Gisi (Ed.): *Schwärme — Kollektive ohne Zentrum. Eine Wissensgeschichte zwischen Leben und Information*, Bielefeld: transcript 2009. ISBN 978-3-8376-1133-5

Parsopoulos, KE; Vrahatis, M. N. Recent Approaches to Global Optimization Problems Through Particle Swarm Optimization (англ.) // *Natural Computing* (англ.) . : journal. — 2002. — Vol. 1, № 2-3. — P. 235—306. — doi:10.1023/A:1016568309421.

de Castro, Leandro N.; Timmis, Jonathan. *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach* (англ.). — Springer, 2002. — P. 57—58. — ISBN 1852335947, 9781852335946.

Waibel M, Floreano D and Keller L (2011) «A quantitative test of Hamilton's rule for the evolution of altruism» PLoS Biology, 9(5): e1000615. doi:10.1371/journal.pbio.1000615

Shah-Hosseini, Hamed. The intelligent water drops algorithm: a nature-inspired swarm-based optimization algorithm (англ.) // International Journal of Bio-Inspired Computation : journal. — 2009. — Vol. 1, no. 1/2. — P. 71—79.

Aboul E. H. Swarm Intelligence: Principles, Advances, and Applications / Aboul Ella Hassanien, Eid Emary. — CRC Press, 2016. — 210 p.

Xin-She Yang Nature-Inspired Optimization Algorithms / Yang Xin-She. — London: Elsevier, 2014. — 265 p.

Krishnanand K. N. Glowworm swarm based optimization algorithm for multimodal functions with collective robotics applications / K. N. Krishnanand, Debasish Ghose // Multiagent and Grid Systems – An International Journal. — 2006. — №2. — p. 209-222.

Маккафри Д. Тесты - Оптимизация по алгоритму светлячков [Электронный ресурс]. — 2015. — № 6, Vol. 30. — Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/mt147244.aspx> (дата звернення 01.03.2017) — Назва з екрана.

Yang C. Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search / Chenguang Yang, Xuyan Tu, Jie Chen // International Conference on Intelligent Pervasive Computing: 11 - 13 October 2007, IEEE Computer Society, Washington, USA. — p. 462-467

Е. Бонабо, М. Доріго, Г. Тераулаз, Рій прості правила визначають поведінку пішоходів і катастрофи натовпу», *Прос. Нац. акад. Sci. США*, вип. 108, вип. 17, стор. 6884–6888, 2011. [Онлайн]. «Оптимізація рою частинок» *Наукова педія*, вип. 3, № 11, стор. 1486, 2008 рік Доступно: <https://www.pnas.org/content/>

M. Dorigo, MAM de Oca та AP Engelbrecht, Принстон, Нью-Джерсі, США: Принстонський університет. Прес, 2010.



М. Вілсон, К. Мелхьюш, А. Б. Сендова-Френкс, М. Доріго та Т. Венселерс, «Еволюція самоорганізованої спеціалізації завдань у зграях роботів», *PLOS Comput. Biol.*, вип. 11, № 8, «Мінімалістичний підхід до комунікації та сприйняття в мікророботних роях», в *Proc. IEEE/RSJ Int. конф. Intell. Роботи Syst.*, серпень 2005 р. і С. Шоулз, «Алгоритми побудови кільцевих структур за допомогою мінімалістичних роботів, натхнених сортуванням розплоду в колоніях мурашок», *Автон. Роботи*, Серпень 2015, ст. немає. e1004273.

С. Гарньєта ін., «Втілення таргана М. Біраттарі, «Дизайн, керований властивостями, для роїв роботів: метод проектування, заснований на приписному моделюванні та перевірці моделі», *ACM Trans. Автон. готовий до використання: Аліса*,» в *Proc. IEEE/RSJ Int. конф. агрегаційна поведінка в групі мікророботів*, *Intell. Роботи Syst.*, серпень 2005 р., стор. 3295–3300.

А. Рейна, Г. Валентині, К. Фернандес-Ото, А. Е. Ейбен і Т. Вісек, «Оптимізований зліт автономних дронів у обмеженому середовищі», *Sci. робот.*, вип. 3, № 20, 2018, ст. немає. істи3536. [Онлайн]. Доступно: <https://robotics.sciencemag>. США: MIT Press, 2017.

Ф. Мондада, Л. М. Гамбарделла, Д. Флореано, Д. Скарамуцца, «Flightmare: гнучкий симулятор квадрантора», 2020 р., arXiv:2009.00563. [Онлайн]. S. Nolfi, J. Deneubourg і M. Dorigo, «Співпраця swarm-bots–фізична взаємодія в колективній робототехніці», *Робот IEEE*. [org/article/10.3389/frobt.2016.00029](https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00029)

М. Рубінштейн, К. Алер, Н. Хофф, А. Кабрера та ін «Багаторівневе просторове моделювання для стохастичних розподілених роботизованих систем», *Міжн. Дж. Робот. рез., самоорганізація та сортування в колективній робототехніці*, *Артиф. життя*, вип. 5, № 2, стор. 173–202, Р. Нагпал, «Кілобот: недорогий робот із масштабованими операціями, призначений для колективної поведінки», *робот. Автон. сист.*, вип. 62, вип. 7, стор. 966–975, 2014, реконфігурована модульна робототехніка. [Онлайн]. Доступно:

<http://www.sciencedirect.com/science/> т. 30, немає. 5, стор. 574–589, квітень 2011.

М. Дуартета ін., «Еволюція колективної поведінки колективна поведінка в команді конструювання роботів, натхненній термітами», Наука, вип. 343, вип. 6172, стор. 754–758, 2014. [Онлайн]. Доступно: <https://> для справжнього рою надводних роботів, PLoS ОДИН, вип. 11, № 3 березня 2016 р. ст. немає. e0151834.

Г. Франческа та М. Біраттарі, «Автоматичне проектування багатомоторний симулятор для багатороботних систем», Swarm Intell., вип. 6, № 4, стор. 271–295, поведінки для swarm-бота", Автоном. Роботи, зграй роботів: досягнення та виклики», Frontiers Robot. III, вип. 3, стор. 29 березня 2016 р. [Онлайн]. Доступно: <https://www.frontiersin>. Грудень 2012.

Л. Гаратоні та М. Біраттарі, «Ройова робототехніка», в Доступно: <https://arxiv.org/abs/2009.00563>

М. Gauci, J. Chen, W. Li, TJ Dodd і R. Groß, «Розподіл завдань і наймання в кооперативних роботів, як у мурах», природа, вип. 406, вип. 6799, М. Доріго, «Колективне рішення за допомогою 100 кілоботів: швидкість проти точності в проблемах двійкової дискримінації», Автоном. Агенти Multi-Agent Syst., «Самоорганізована агрегація без обчислень» Міжн. Дж. Робот. рез., вип. 33, вип. 8, стор. 992–995, серпень 2000 р.

А. Оздемір, М. Гаучі, С. Бонне, Р. Гросс, Л. М. Гамбарделла, «Співпраця через використання локальних взаємодій в автономній колективній робототехніці: експеримент із тягненням палиці», Автономний. Роботи, вип. 11, № 2, стор. 149–171, рої», Sci. робот., вип. 3, № 25, 2018, ст. немає. eaau9178. [Онлайн]. Доступно: <https://> «Пошук консенсусу без обчислень» Робот IEEE. Автом. Lett., вип. 3, № 3, стор. 1346–1353, [robotics.sciencemag.org/content/3/25/eaau9178](https://robotics.sciencemag.org/content/3/25/eaau9178)

Г. Валентиніта ін., «Кілогрід: новий експеримент Зграї: розробка та аналіз стратегій для кращого проблема /Дослідження в області



обчислювальної техніки HJ Karpen і GCHE de Croon, «Мінімальне навігаційне рішення для рою крихітних літаючих роботів для дослідження невідомого середовища», *Sci. робот.*, вип. 4, № 35, 2019, ст. немає. eaaw9710. [Онлайн]. Доступно: <https://robotics.sciencemag.org/content/4/35/eaaw9710>. (Середовище для робота Kilobot), *Swarm Intell.*, Інтелект). Хам, Швейцарія: Springer, 2017.

В. Гернацький, М. Скверчинський, В. Вітвіцький, координації *interindividuelles chez Bellicositermes natalensis et Cubitermes sp. La théorie de la stigmergie: Essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs*,» *Комахи Sociales*, вип. 6, № 1, стор. 41–80, P. Wroński та P. Koziński, «Квадротор Crazyfly 2.0 як платформа для досліджень і навчання в робототехніці та інженерії управління», в *Proc. 22-й міжн. конф. Методи Моделі Автом.* [sciencemag.org/content/4/35/eaaw9710](http://robotics.sciencemag.org/content/4/35/eaaw9710)

BP Gerkey і MJ Mataric, «Формальний аналіз М. Доріго, «Командна робота в самоорганізованих колоніях роботів», *IEEE Trans. еволюція обчис.*, вип. 13, № 4, стор. 695–711, серпень 2009. «Проблема кращого з п у групах роботів: формалізація, сучасний рівень і новизна і таксономія розподілу завдань у багатороботних системах», *Міжн. Дж. Робот. рез.*, вип. 23, вип. 9, стор. 939–954, вересень 2004 р.

Е. Нуньес, М. Маннер, Х. Мітіче, М. Гіні, перспективи активної матерії», *Annu. Преподобний Конденс. Матерія фіз.*, вип. 11, № 1, сценарій», в *Proc. 17-й міжн. конф. Автоном. Агенти Multiagent Syst. (AAMAS)*, M. Dastani, G. Sukthankar, E. André та S. Koenig, Eds. Річленд, Южная Кароліна, США: Міжнародна фундація автономних агентів і мультиагентних систем, «Таксономія для проблем розподілу завдань із часовими та впорядкованими обмеженнями», *робот. Автоном. сист.*, вип. 90, стор. 55–70, квітень 2017 р. [Онлайн]. Доступно: <http://www.sciencedirect.com>. стор. 441–466, березень 2020 р.

LA Nguyen, TL Harman і C. Fairchild, SC Kerman, «Два інваріанти взаємодії людського рою», *Дж. Взаємодія людини і робота.*, вип. 5, «Swarmathon: експеримент з роєм робототехніки для майбутнього

дослідження космосу», вProc. IEEE Int. Симп. вимірювання Контрольний робот. (ISMCR), вересень 2019 р., <http://www.jstor.org/stable/2094909>

Х. Хаманн і Х. Верн, «Самкова основа і М. Льюїс, «Взаємодія людини з роями роботів: опитування»,IEEE Trans. Людина-мах. просторово-часові безперервні моделі для проектування алгоритмів у ройовій робототехніці»,Swarm Intell., вип. 2, сист., вип. 46, вип. 1, стор. 9–26, лютий 2016.

М. Коппола, Дж. Го, Е. Гілл та Ф. Мондада та М. Доріго, «Злиття нервових систем для роботів»,Nature Commun., вип. 8, GCHE de Croon, «Доказове формування шаблону самоорганізації зграєю роботів з обмеженими знаннями»,Swarm Intell., вип. 13, № 1, немає. 1, стор. 439, грудень 2017 р.

Й. Краузе, А. Ф. Вінфілд, Ж.-Л. Deneubourg, досліджувати майже критичність у природних зграях»,фіз. Преподобний Летт., вип. 113, грудень 2014 р., ст. немає. 238102, М. Доріго, «Жестикуляція на підроях: до прямого управління зграями роботів людьми» вProc. 14 річниця. конф. Назустріч Автоному. Роботизована система (ТАРОС)(Конспект лекцій з інформатики), том. 8069, А. Натрай, С. Кемерон, К. Мелгуїш, «Інтерактивні роботи в експериментальній біології», Тенденції Ecol. еволюція, вип. 26, вип. 7, стор. 369–375, 2011. [Онлайн]. Доступно: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S01695310.1103/PhysRevLett.113.238102> зробити:

К. Е. Пеєр, Л. Чжан і Б. Дж. Нельсон, «Опитування щодо проблем безпеки ройової робототехніки», вProc. 5-й міжн. конф. Автоном. Автоном. «Моделі довіри до людського контролю над роями з різними рівнями автономії»,IEEE Trans. людина-«Біологічні магнітні плавальні мікророботи для біомедичних застосувань»Нанорозмір, вип. 5, № 4, стор. 1259–1272, 2012. [Онлайн]. В наявності: сист., 2009, С. 307–312.



І. Рабінович, М. Чацігеоргіу, Б. Чжао, А. С. Пентланд, «Безпечна та таємна співпраця в роботизованих роях», 2019 р., arXiv:1904.09266. [Онлайн]. Доступно: <https://arxiv.org/abs/> «Роздуми про майбутнє ройової робототехніки» Sci. робот., вип. 5, № 49 грудня 2020 р. М. Treinin і W. R. Schafer, «Перебудова нейронних ланцюгів шляхом вставки ектопічних електричних синапсів у трансгенний *C. elegans*», Nature Commun., вип. 5, № 1, 2014, ст. немає. 4442. [Онлайн]. Доступно: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1050134945> і <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/44424385/> ст. немає. eabe4385.

І.Д. Чейз, «Соціальний процес та ієрархія М. Кейзерс і С. Шабанович, Взаємодія людини і робота: Вступ. Кембридж, Великобританія: створює новий набір проблем для інтелектуальних розподілених обчислень», Паралелізм IEEE, вип. 5, формування в малих групах: порівняльна перспектива», амер. соціол. Рев., вип. 45, вип. 6, стор. 905–924, 1980. [Онлайн]. В наявності: Кембриджський університет Преса, 2020.

Л. Бусоніу, Р. Бабуська, Б. Де Шуттер, [robotics.sciencemag.org/content/4/28/eaau7897](https://robotics.sciencemag.org/content/4/28/eaau7897)

Е. Ціната ін., «На основі глибокої нейронної мережі спільне візуальне відстеження за допомогою кількох мікролітаків», Робот IEEE. Автом. Lett., eaav8006

В. Стробель, Е. К. Феррер і М. Доріго, «Блокчейн ройна робототехніка», Автон. Роботи, вип. 17, пп. 2–3, технологія захищає зграї роботів: порівняння консенсусних протоколів та їх стійкості до візантійських роботів», Frontiers Robot. III, вип. 7, стор. 111–246, вересень 2004 р.

К. Бартнек, Т. Белпаєм, Ф. Ейссел, Т. Канда, [com/science/article/pii/S0921889016306157](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889016306157)

J. Gautrais, C. Jost, R. Jeanson і G. Theraulaz, номери 2–4, стор. 209–239, грудень 2008 р.

Г. Подевійн, Р. О'Грейді, Н. Метьюз, А. Жиль, *swarm: багатомодова трансформація, пересування та маніпуляції*», *Sci. робот.*, вип. 4, № 28, 2019, ст. немає. eaav8006. [Онлайн]. Доступно: <https://robotics.sciencemag.org/content/4/28/C>. Fantini-Hauwel і М. Dorigo, «Дослідження впливу збільшення розмірів груп роботів на психофізіологічний стан людини в контексті взаємодії людини з роєм», *Swarm Intell.*, вип. 10, березень 2008 р.

К. Нам, П. Вокер, Х. Лі, М. Льюїс і К. Сікара, <https://www.pnas.org/content/107/21/9541>

М. Доріго, Г. Тераулаз, В. Тріанні, <http://dx.doi.org/10.1039/C2NR32554C>

Г.-З. Янта ін., «Великі виклики науки робототехніка», *Sci. робот.*, вип. 3, № 14, 2018, ст. немає. eaar7650. [Онлайн]. Доступно: <https://> стор. 54, травень 2020.

С. Казаді, «Інженерія роїв», приватна агрегація різнорідних роботів», в *Proc. 13-й міжн. Симп. Розпод. Автон. Роботизована система*, Р. Гросс, А. Коллінг, С. Берман, Е. Фразцолі, А. Martinoli, F. Matsuno, and M. Gauci, Eds. Cham, Швейцарія: Springer, 2018, стор. 587–601, мікроскопічні роботи масового виробництва, природа, доктор філософії дисертація, California Inst. техн., т. 584, вип. 7822, стор. 557–561, серпень 2020 р.

М. Літа ін., «Створення класів ройових рішень АК Sood, «Флокування на відстані в активній зернистій речовині», *Nature Commun.*, вип. 5, № 1, з використанням гамільтонівського методу проектування рою», в *Proc. 9-й міжн. конф. Агенти Артїф. Intell.*, вип. 2. зробити:10.1007/978-3-319-73008-0\_41

А. Ренцалья, Л. Доїчідіс, А. Мартінеллі та Візантійські роботи через технологію блокчейн у груповому робототехнічному колективному прийнятті рішень Ф. Перуані, «Самохідні штанги: Інсайти та Е. Б. Косматопулос, «Мультиробот тривимірне покриття невідомих областей», *Міжн. Дж. Робот. рез.*, вип. 31, вип. 6, стор. 738–752, промислового



обладнання», Робот IEEE. Автом. Маг., Міжн. Дж. Робот. рез., вип. 31, вип. 6, стор. 753–773, т. 16, вип. 1, стор. 103–112, березень 2009.

W. Hönig, JA Preiss, TKS Kumar, «Розгортання та польоти великомасштабного бойового зграї UAS: Результати виклику зграї в академіях обслуговування DARPA», у Proc. Міжн. конф. Безпілотний літальний апарат сист. (ICUAS), черв. 2018 р., P. Dragicevic і S. Follmer, «Zooids: Building blocks for swarm user interfaces», в Proc. 29 річниця. Симп. Програмне забезпечення інтерфейсу користувача технол. Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США: Асоціація комп'ютерів Г. С. Сухатме та Н. Аянян, «Планування траєкторії для роїв квадаторів», IEEE Trans. робот., вип. 34, вип. 4, стор. 856–869, серпень 2018.

CE Luis, M. Vukosavljev і AP Schoellig, «Онлайн-генерація траєкторії з прогнозованим керуванням розподіленою моделлю для планування руху кількох роботів», Робот IEEE. Автом. Lett., вип. 5, № 2, т. 12, № 3, стор. 363–374, липень 2019 р.

Н. Hamann і A. Reina, «Масштабованість у Формування форми для рою піко-супутників», в Proc. NASA/ESA Conf. адаптуватися. Hardw. сист., Лос-Аламітос, Каліфорнія, США: IEEE Computer Society (IROS), вересень 2015 р., стор. 5382–5387.

Ч. Пінчіроліта ін., «Самоорганізований і масштабований і Н. Аянян, «Змішана реальність для робототехніки», в Proc. IEEE/RSJ Int. конф. Intell. Роботи Syst. стор. 604–611, квітень 2020 р.

М. Вайбель, Б. Кійс та Ф. Аугульєро, «Дрони як платформа для трансплантації стовбурових клітин», Sci. робот., вип. 4, № 30 травня 2019 р., <http://arxiv.org/abs/2006.04969>

Е. Цикунов, Р. Агішев, Р. Ібрагімов, модель передбачуваного контролю: огляд і дорожня карта майбутніх дослідницьких можливостей», IEEE «Реконфігурована інтегрована багатороботна дослідницька система (RIMRES): гетерогенні модульні реконфігуровані роботи для дослідження

космосу», Дж. Польовий робот., вип. 31, вип. 1, С. 3–34, 2014. [Онлайн]. Доступно: <https://onlinelibrary.wiley>. Л. Лабазанова, А. Тлеугазі та Д. Цецеруку, «SwarmTouch: Керування рою мікроквадротори з керуванням імпедансом за допомогою носимого тактильного інтерфейсу», IEEE Trans. Тактильні відчуття, Система керування, вип. 34, вип. 4, стор. 87–97, серпень 2014.

Х. Донг і М. Сітті, «Контролінг «Динамічне розгортання зграї БПЛА для нерівномірного покриття», в Proc. 17-й міжн. конф. Автон. Агенти MultiAgent Syst. (AAMAS), 2018, Січень 2017.

Проведений аналіз за темою досліджень показує, що на даний час недостатньо висвітлені питання наукового обґрунтування створення та застосування методів та програмного забезпечення децентралізованого управління груповим польотом безпілотних літальних апаратів.

Усі вище визначені чинники визначають аргументування та критичне оцінювання запропонованих автором нових рішень порівняно з відомими рішеннями.

**Практична значимість та важливість для галузі** полягає в створенні інформаційної технології підвищення ефективності управління формуванням та підтримкою заданого положення групи автономних безпілотних літальних.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що методи і програмне забезпечення можуть бути застосовані при розробці систем групового управління роєм безпілотних літальних апаратів. Ці системи є важливими для вирішення різноманітних практичних завдань. Наприклад, вони можуть бути використані для екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів, а також у військовій справі, - радіолокаційної локалізації, операцій радіоелектронної боротьби, подолання проти



повітряної оборони противника за допомогою хибних цілей. При цьому вони дозволяють координувати ураження цілей, формувати антенні решітки на базі БПЛА для покращення зв'язку і вимірювати швидкість вітру для метеорологічних досліджень. Ці досягнення також дозволяють збільшити корисне навантаження або дальність польоту за рахунок зменшення індуктивного опору під час польотів у щільних групах. Такі застосування підкреслюють широкомасштабний вплив результатів досліджень на ефективність застосування як цивільних, так і військових БПЛА для виконання різноманітних завдань.

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 у цілому, відповідність оформлення дисертації вимогам, затвердженим МОН України.**

У *вступі* надана загальна характеристика дисертації, а саме: обґрунтування вибору теми дослідження (висвітлюється зв'язок теми дисертації із сучасними дослідженнями у відповідній галузі знань шляхом критичного аналізу з визначенням сутності наукової проблеми або завдання); мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження; методи дослідження; наукова новизна отриманих результатів; особистий внесок здобувача; апробація матеріалів дисертації.

У *першому розділі* «ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ГРУПОВОГО УПРАВЛІННЯ БПЛА ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ» здійснено аналіз стану розвитку БПЛА, аналіз можливостей групового застосування, аналіз

наукових методів для управління групами БПЛА. Здійснено постановку наукового завдання групового управління БПЛА.

У *другому розділі* «РОЗРОБКА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ГРУП БПЛА НА ОСНОВІ МЕТОДУ НЕОДНОРІДНОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ» проведено вибір та обґрунтування моделі групового управління БПЛА. Розглянуто групове управління на основі методу простору відносних станів. Наведено розробку законів управління для кооперативного слідування прямолінійним шляхом.

У *розділі 3* «РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ГРУПОВОГО УПРАВЛІННЯ БПЛА» здійснено аналіз результатів моделювання децентралізованого управління групою літальних апаратів. Наведено результати математичного моделювання відносних станів. Здійснено розробку архітектури програмного забезпечення для групового управління БПЛА.

У *розділі 4* «РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГРУПОВОГО ПОЛЬОТУ БПЛА» здійснено розробку бази даних для програмного забезпечення децентралізованого управління: аналіз предметної області, інфологічне проектування; даталогічне проектування; фізичне проектування; статуси дронів, групових управлінь, місій; тригери та інструкції для їхніх перевірок; дані за замовчуванням. Розроблено програмне забезпечення та візуалізація: архітектурна модель програмного забезпечення; програмний код; опис графічного інтерфейсу та взаємодії з ним.

У *висновках* відтворено основні результати дисертаційного дослідження, що відображають інформаційну технологію підвищення ефективності управління формуванням та підтримкою заданого положення групи автономних безпілотних літальних апаратів за рахунок розробки методів, алгоритмів та програмного забезпечення децентралізованого



управління, що враховує нелінійний характер структури систем "автопілот-апарат".

У *додатках* наведено Акт про впровадження в навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» наукових положень і результатів дисертаційної роботи; Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в ТОВ Інтехфорвард; Акт про впровадження результатів дисертаційного дослідження в секторі №5 оборони міста Київ; Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації; Лістинг розробленого програмного забезпечення.

#### **Структура та обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків по розділах, загальних висновків, списку використаних джерел 152 найменувань, трьох додатків. Загальний обсяг роботи 206 сторінок. Дисертація містить також 2 таблиці та 31 рисунок.

Дисертація за своїм змістом та оформленням відповідає Наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Вимоги до оформлення дисертації» та задовольняє вимогам Постанови КМУ від 12.01.2022 р. №44 «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» та чинним вимогам МОН України

**Оцінка мови та стилю** викладення дисертації. Мова та стиль дисертації свідчать про вміння автора аргументовано викладати свої думки та, у цілому, відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності та доказовій формі, що значно сприяє усвідомленню думок автора. Всі розділи дисертації мають внутрішню

єдність і завершеність. Змістове наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. В цілому, дисертаційна робота сприймається як кваліфікаційна закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

**Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях.** Наукова новизна безсумнівна та достатня для дисертації на здобуття ступеня доктора філософії. Основні наукові і практичні результати, що отримані в ході дисертаційного дослідження, опубліковано з необхідною повнотою у 12 наукових працях, серед яких 1 стаття у наукометричній базі Scopus, 3 статті у наукових фахових виданнях України, а також 8 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій.

Відмічаю в цілому науково-коректний стиль викладення матеріалів дисертації. Назва роботи відповідає самій роботі, яка відповідає спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення, Галузь знань 12 – Інформаційні технології.

### **Недоліки**

У якості недоліків у роботі потрібно відмітити наступне.

1. У якості мети досліджень автором визначено «Метою дисертації є підвищення ефективності управління формуванням та підтримкою заданого положення групи автономних безпілотних літальних апаратів за рахунок розробки методів, алгоритмів та програмного забезпечення децентралізованого управління, що враховує нелінійний характер структури систем "автопілот-апарат"». При цьому предметом досліджень визначено «методи та програмні засоби групового управління автономних безпілотних літальних апаратів». Тому, бажано було б у загальних висновках систематизувати кількісні оцінки саме підвищення ефективності управління



формуванням та підтримкою заданого положення групи автономних безпілотних літальних апаратів. При цьому бажано було б визначити клас автономних безпілотних літальних апаратів, до яких доцільно застосовувати розроблене інформаційне забезпечення.

2. В підрозділі 1.4. «Постановка наукового завдання групового управління БПЛА.» бажано було надати математичну формалізацію задачі досліджень (на рівні відповідних множин, кортежей, з урахуванням обмежень та ресурсів інформаційної безпеки системи управління комплексом об'єктів критичної енергетичної інфраструктури. Для введених так званих «функцій динаміки» кожного рівня  $f_1$  і  $f_2$ , та векторів шумів  $\xi_1$  і  $\xi_2$  бажано було надати їх фізичну інтерпретацію. Запропоновані «Автономне планування шляху», «Динамічний розподіл завдань», «Максимізація загальної корисності» потребують обґрунтування та деталізації.

3. В розділі 2 «Розробка децентралізованого управління для груп БПЛА на основі методу неоднорідного векторного поля» (стор.57) здійснено вибір та обґрунтування моделі групового управління БПЛА. Однак обґрунтування та математичної формалізації вибору методу неоднорідного векторного поля не надано. В основі цієї методології лежить динамічна взаємодія між силами притягання і відштовхування, що спрямовує БПЛА до цілі, зберігаючи при цьому безпечну відстань від перешкод та інших БПЛА. Для управління одиночними БПЛА у роботі було запропоновано метод векторного поля проходження шляху (англ. path following vector field). Аналогічний метод названо методом векторних полів Ляпунова. При цьому передбачається, що одиночний БПЛА підтримує постійну швидкість польоту, тому поле однорідне за величиною. При цьому керування визначається для сценарію польоту БПЛА прямолінійним шляхом. А якщо здійснюється зміна курсового кута (наприклад обгинування висотних споруд)? Як бути в цьому випадку? У наведеному прикладі, для групи у складі чотирьох БПЛА у разі взаємодії (стор. 67) бажано було обґрунтувати наведені елементи матриці  $M_i$ .

4. В роботі окремо визначаються закон управління для швидкостей БПЛА (вираз 2.38), а також закон управління для курсових кутів БПЛА (2.39). Чому не розглядається векторна оптимізація, наприклад аналітичне конструювання регуляторів, або застосування обернених задач динаміки? Тому бажано було б обґрунтувати впровадження змінних векторних полів, які адаптуються до змін у середовищі та задачах (стор. 80): Моделювання Векторного Поля, Удосконалення, Оптимізація Шляху, Вихідний Алгоритм, а також математично формалізувати включення адаптивних сил відштовхування та притягання, які реагують на зміни в динаміці групи та середовища, дозволяють оптимізувати шляхи БПЛА для зниження загального часу місії та витрат енергії.

5. В розділі 3 (Розробка програмного забезпечення для групового управління БПЛА) «бажану геометричну форму групового управління і вектор бажаних відносних положень у цьому випадку» доцільно було б також обґрунтувати, а також надати пояснення «початковим положенням» (рис. 3.1 та вираз (3.2), параметри та значення моделювання (табл. 3.1)).

6. Висновок до розділу 4 «Розробка програмного забезпечення для управління та візуалізації групового польоту БПЛА», що «Система здійснює оновлення даних кожну секунду, враховуючи точність локацій в реальному часі, що ідеально підходить для динамічних місій» математично не обґрунтовано.

7. В роботі мають місце окремі математичні некоректності та стилістичні похибки, наприклад:

Відповідно до сучасної теорії автоматичного керування не зовсім коректним є висновок (стор.42), що «Математичним описом теорії оптимального керування є вступ до функції Гамільтоніана та принципу мінімуму Понтрягіна».

Не коректний математичний вираз (1.1, стор.43), (2.11; 2.12, стор.62), не коректна табл.3.1, - параметр -  $v_{max}$  наведено двічі.



ширші тенденції (стор. 29);  
 заглиблення в складну архітектуру систем (стор.34);  
 пом'якшуючи вплив виходу (стор. 35);  
 Ґрунтовний аналіз математичних принципів (стор.43);  
 унікальний внесок в групове управління (стор. 57);  
 Рівняння, що керують групою (стор.57);  
 математичне збагачення не лише підкреслює теоретичну глибину стратегій управління групою БПЛА (стор.. 59);  
 передового рівня алгоритмічного дизайну, (стор. 60);  
 результативності продуктивності парку БПЛА (стор. 60);  
 ретельне імітаційне тестування, (стор.60);  
 легко керувати (стор.84);  
 піднімає дисципліну програмної інженерії (стор.104);  
 Алгоритмічна надійність (стор.104);  
 Система навігації та керування повітряним простором (стор.132);  
 просте та зрозуміле керування (стор.152);

Вказані недоліки не знижують науковий рівень дисертації “Методи та програмне забезпечення децентралізованого управління груповим польотом безпілотних літальних апаратів на основі теорії неоднорідного векторного поля” та не впливають на позитивне враження від дисертації, як кваліфікаційну роботу, в цілому, завершеність якої не викликає сумніву. Робота містить висунуті автором науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, наукові положення, особистий внесок здобувача в науку.

### **Висновок.**

Вивчення дисертаційної роботи та опублікованих здобувачем наукових праць дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота виконана на актуальну тему, представляє собою логічне завершене наукове дослідження, що містить наукові положення, нові науково обґрунтовані теоретичні та

експериментальні результати проведених здобувачем досліджень, що мають істотне значення для певної галузі знань та підтверджуються документами, які засвідчують проведення таких досліджень, а також свідчать про особистий внесок здобувача в науку та характеризується єдністю змісту, що в сукупності вирішують наукове завдання розробки методів та архітектури програмного забезпечення для децентралізованого групового управління безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з урахуванням особливостей їх динаміки, а також розробки математичної моделі для експериментального дослідження ефективності управління груповим польотом БПЛА.

Дисертація відповідає вимогам Постанови КМУ № 44 від 12.02.2022 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії ...», а її автор КИР'ЯНОВ Артемій Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення, Галузь знань 12 – Інформаційні технології.

**Офіційний опонент**

**Професор кафедри екологічної безпеки**

**Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління**

**доктор технічних наук, професор,**

**Заслужений діяч науки і техніки України,**

**Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки**

02.08.2024р.

Підпис Машкова О.А. засвідчую

Машков О.А. кадр. забезп.

02.08.2024р

О.А.Машков



Машков О.А.