

В.А. Таршин¹, О.М. Компанієць¹, С.Є. Котляренко², Р.В. Дужий³

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

³ Національний університет оборони України, Київ

РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ РОЯМИ БПЛА НА ОСНОВІ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

Актуальність дослідження зумовлена виникненням нових проблем організованого масованого (ройового) застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) під час нанесення розподілених у просторі високоточних ударів по військових і критично важливих об'єктах противника у тактичній і оперативній глибині побудови бойових порядків. Визначена потреба у розробленні (розвитку) методології управління роями БПЛА. Обґрунтована доцільність у застосуванні підходу розподіленого ієрархічного управління БПЛА з ройовим інтелектом. Використання такого підходу управління забезпечить ефективне використання роїв БПЛА (в тому числі, різномірних) в операціях міжвидових угруповань військ Збройних Сил України та інших складових Сил безпеки і оборони України під час відбиття збройної агресії російської федерації. Розподілене ієрархічне управління є комплексним підходом і забезпечує посідання переваг централізованого та децентралізованого управління і компенсує їх недоліки при управлінні роєм БПЛА. За результатами дослідження визначено протиріччя та здійснено постановку наукової проблеми, висунуто гіпотезу дослідження та визначено наукові завдання дослідження із розроблення методології управління роїв БПЛА на основі ройового інтелекту, яка включає стратегії застосування, теоретичні основи, науково-методичний апарат і результати дослідження.

Ключові слова: БПЛА, методологія, рій БПЛА, ройовий інтелект, розподілене ієрархічне управління, управління ройовим інтелектуальними системами, централізоване і децентралізоване управління.

Вступ

Постановка проблеми. Практика застосування БПЛА у сучасній війні підтверджує інноваційність та великий потенціал їх використання з метою ефективного вирішення завдань угрупованнями військ (сил) і підрозділами Збройних Сил (ЗС) України. Для нанесення розподілених у просторі високоточних ударів по військових об'єктах противника, ведення розвідки та моніторингу, корегування вогню, постановки радіоелектронних завад актуалізується організоване ройове (колективне) застосування БПЛА. Інфільтрація на територію ворога, подолання його систем протиповітряної оборони (ППО), засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) стає більш можливим із застосуванням ройових систем озброєння. Як правило, ці завдання вирішуються різними БПЛА, що мають різні джерела управління і застосовуються в тактичній глибині побудови бойових порядків ворога.

У сфері робототехніки колективність дій різних роботів використовується для вирішення промислових завдань. Проте у військовій сфері залишаються не вирішені деякі проблеми формування роїв як роботизованої структури літаючих платформ військового призначення. Ройове застосування БПЛА у робототехніці на сьогодні, обумовлене зростанням попиту до систем

управління та функціонування роїв. Переважна кількість проектів із застосування ройових систем все ще спирається на централізоване управління і навіть тоді, коли використовуються кілька роботів. Слід зазначити що, технологія розподіленого прийняття рішень, яка характерна для ройової робототехніки залишається невивченою в повній мірі для забезпечення ефективного бойового застосування роїв БПЛА. До певних проблем функціонування, які виникають під час застосування роїв БПЛА відносяться такі:

- зниження згуртованості дій у поведінці рою, як цілісного об'єкту, внаслідок порушення локальної взаємодії між БПЛА. На цій основі виникають відповідні труднощі щодо координації управління окремими БПЛА у великій групі (колективі) відповідно до покладених різномірних завдань, як під час польоту рою, так і при виконанні основного завдання в умовах впливу зовнішніх факторів та протидії ворога;

- невідповідність сучасних вимог до управління роїв БПЛА, відсутність стійких комунікаційних архітектур роїв, що обумовлює переважне застосування в умовах бойових дій централізованої організації системи управління;

- невідповідність існуючих інформаційних технологій управління роями БПЛА сучасним умовам ведення високотехнологічних бойових дій.

Перші не дають змогу забезпечити інтелектуалізацію процесів використання роїв БпЛА (у тому числі, гетерогенних) в операціях міжвидових угруповань військ ЗС України та інших складових Сил безпеки та оборони України при протидії збройній агресії російської федерації.

Недосконалість технологій управління роями БпЛА при виконанні бойових і спеціальних завдань актуалізує проблему розробки та розвитку відповідної методології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі робототехніки існує визначення роїв, які трактуються, як велика кількість гомогенних або гетерогенних роботів, взаємопов'язаних між собою, які функціонують самостійно задля досягнення загальної мети [1, с. 7].

В окремих дослідженнях українських науковців є різні підходи та методології щодо зазначеної вище проблематики. У їх межах представлені різні моделі та методи функціонування і управління роїв (груп) БпЛА. Так, існує реалізована методика керування кількома БпЛА за принципом “ведучий – ведомий” БпЛА [2, с. 14]. У науковій роботі [3, с. 1154], запропоновано методологію використання флоту квадрокоптерів для моніторингу території. У роботі [4, с. 90...91] розглянуто деякі підходи до створення ройової зброї на основі БпЛА, що об'єднані в рій та керуються як одне ціле. Розроблені також моделі групових польотів БпЛА з використанням теорії графів, які описані в праці [5, с. 71]. У деяких роботах описується застосування гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування на основі роїв та зграй БпЛА [6, с. 25...30]. Корпоративними моделями для колективного управління пілотованими літальними апаратами і БпЛА в єдиному повітряному просторі в умовах ризику і невизначеності висвітлені у дослідженні [7, с. 1...120]. Дослідженням групового польоту БпЛА з інтелектуальною складовою агентної системи рою присвячено роботу [8, с. 1...219]. Сумісна робота групи БпЛА, яка здатна до самоорганізації із застосуванням теорії ройового інтелекту описана в науковій публікації [9, с. 56...63]. Централізоване управління при груповому застосуванні БпЛА у місіях з пошуку та впливу на наземний об'єкт розглянуто авторами в роботі [10, с. 94...96].

Підходи та моделі, в яких використовують рої БпЛА для різних завдань військового застосування, розглядаються в роботах іноземних науковців [11...22]. Проаналізовані джерела дають змогу зробити попередні висновки, а саме представлені результати науковцями вирішують певні вибіркові завдання застосування роїв (колективів) БпЛА для бойових завдань, але не використовують цілісності методології в управлінні роями.

Таким чином, залишається сукупність невирішених наукових задач певного напрямку. Сучасні підходи управління засновані, як правило, на класичних методах централізованого і децентралізованого управління, повною мірою не враховують особливості застосування роїв БпЛА для виконання бойових і спеціальних завдань.

Мета статті полягає в обґрунтуванні наукової проблеми дослідження, висуненні гіпотези та визначенні наукових завдань із розроблення методології управління роями БпЛА на основі ройового інтелекту.

Виклад основного матеріалу

Рій, як правило, складається з великої кількості БпЛА, які співпрацюють між собою у межах рою. Тільки через їх внутрішню взаємодію виникає колективна поведінка, що сприяє вирішенню певних складних завдань. Перевагами ройового застосування БпЛА є адаптивність, надійність і масштабованість. Вимогою до системи управління роями виступає чітка координація окремих БпЛА у рою відповідно до покладених на них часткових завдань під час польоту та завдань основної місії рою в антагоністичному середовищі.

На практиці, управління групами (роями) БпЛА переважно здійснюється централізованим або децентралізованим способом.

Недоліками застосування централізованого управління роями БпЛА є:

- низька масштабованість, яка призводить до складнощів в управлінні великою кількістю апаратів через обмеження каналів зв'язку та обчислювальних потужностей єдиного пункту (центру) управління;
- вразливість пунктів управління, що характеризує відмови або фізичне ураження центру управління, яке може призвести до втрати контролю над усім роєм;
- обмежена адаптивність рою, яка виникає внаслідок ускладнень швидкої реакції на зміни ситуації через ієрархічну структуру.

До недоліків децентралізованого управління роями БпЛА можна віднести:

- складність забезпечення узгодженості дій між апаратами для виконання бойових і спільних завдань;
- неможливість реалізації складних стратегій у поведінці рою через обмеженість “кругозору” окремих апаратів;
- нестабільність та схильність до розпаду рою через відсутність єдиного пункту (центру) управління;
- складність оцінки оператором поточного стану та поведінки усього рою.

Компенсацією зазначених недоліків, у відповідних підходах управління, може слугувати використання комплексного (гібридного) управління роями БпЛА (рис. 1). Відповідно, переваги централізованого управління у поєднанні

з елементами децентралізації та інтелектуалізації системи значно підвищують ефективність застосування роїв БПЛА при вирішенні бойових і спеціальних завдань. Комплексне управління доцільно представити як розподілене ієрархічне управління на основі ройового інтелекту, яке забезпечує поєднання переваг централізованого та децентралізованого підходів щодо реалізації системи управління роєм в цілому та окремими БПЛА у складі рою. Централізоване управління може здійснювати координацію рою БПЛА через центральний вузол (пункт управління, оператора), який визначає загальну стратегію та визначає

завдання окремим БПЛА, регулюючи їх дії з урахуванням поточних умов. Децентралізоване управління дає змогу кожному БПЛА самостійно реагувати на зміни ситуації та адаптувати свою тактику, взаємодіяти з іншими БПЛА та об'єктами. Рій БПЛА повинен мати спільну мету місії, що встановлюється централізованим управлінням, але БПЛА можуть автономно виробляти та реалізувати раціональні рішення відповідно до своєї ролі. БПЛА в рою спроможні оцінювати "результати" своєї діяльності та передавати цю інформацію центральному вузлу для аналізу та прийняття рішень щодо подальших їх дій.

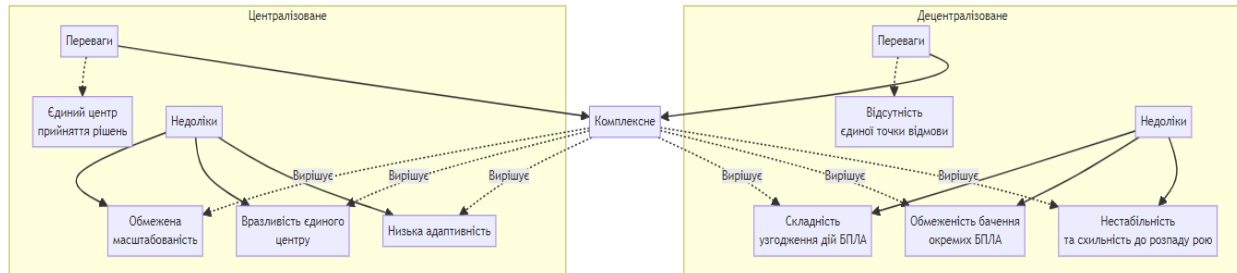


Рис. 1. Комплексне управління роями БПЛА.

Джерело: розроблено автором О.М. Компанієць.

Розподілене ієрархічне управління БПЛА на основі ройового інтелекту дає змогу рою бойових БПЛА бути пристосованими до зміни умов місії, використовувати як централізовані команди, так і децентралізовану поведінку. Відповідне управління дозволяє побудувати систему із сукупності автономних інтелектуальних БПЛА для досягнення колективних цілей, яких не може досягти окремі БПЛА або для яких колективне виконання поставленого завдання є більш ефективним. У колективі БПЛА, що взаємодіють на основі ройового інтелекту, кожен апарат здійснює взаємодію з невеликою кількістю найближчих до

нього апаратів. БПЛА самостійно ухвалюють рішення щодо поточної поведінки, спираючись на зібрані ними дані про умови навколишнього середовища, а також на дані, отримані від сусідніх БПЛА, які діють відповідно до локальних правил (local rules) [23].

Існуючі наукові підходи та наукові результати не дають змоги вирішити виявлені у ході дослідження сучасні проблеми управління роями БПЛА. Це обумовлює формулювання наукової проблеми досліджень у новій постановці (рис. 2).

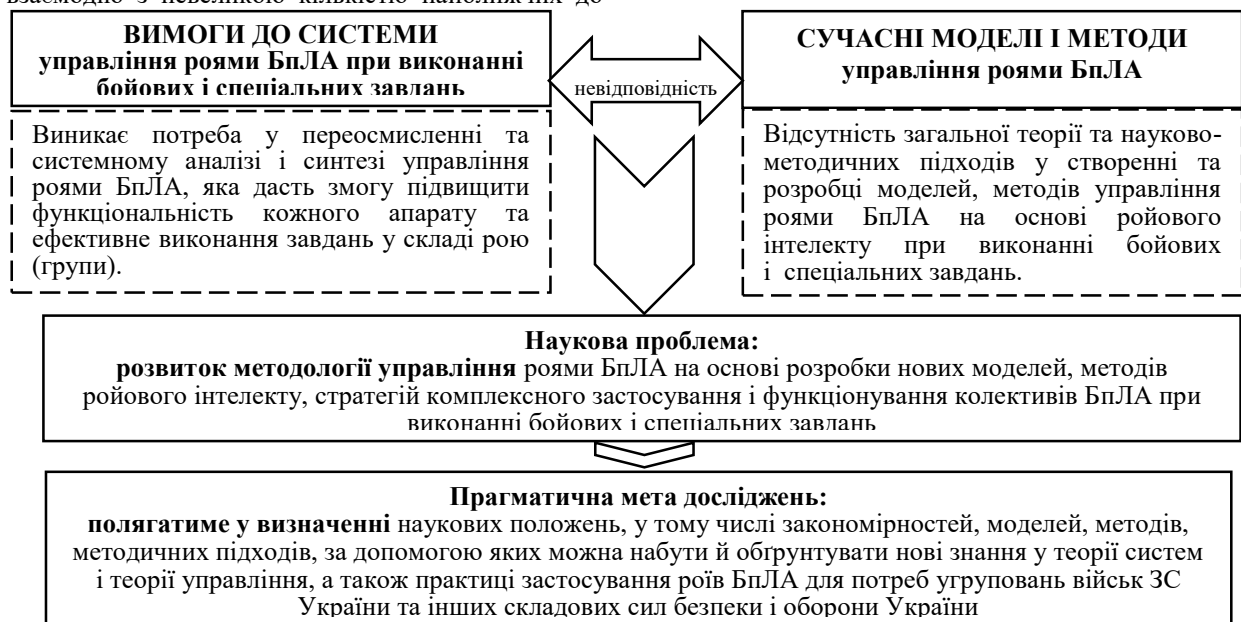


Рис. 2. Схема постановки наукової проблеми досліджень.

Джерело: розроблено автором О.М. Компанієць.

Прагматичною метою дослідження є визначення наукових положень, у тому числі закономірностей, моделей, методів, методичних підходів, за допомогою яких можна набути й обґрунтувати нові знання у теорії систем і теорії управління, а також практиці застосування роїв БпЛА для потреб угруповань військ ЗС України та інших складових Сил безпеки і оборони України.

Наукове дослідження представлено (рис. 3) у вигляді структурно-логічної схеми, яка складається з наукової і практичної складової та відображає внесок у теорію систем і теорію управління розроблюваної методології управління роями БпЛА на основі ройового інтелекту

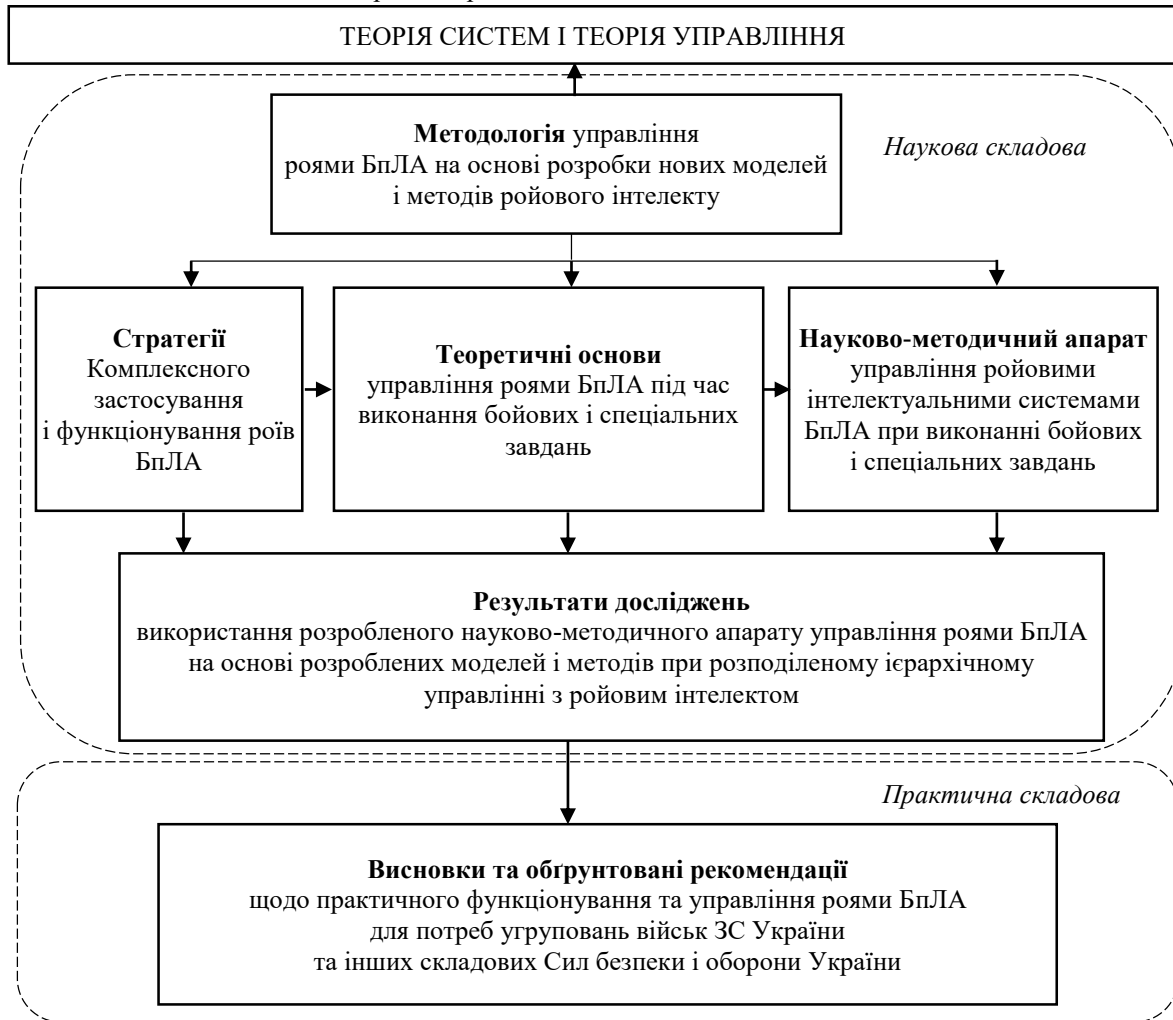


Рис.3. Методологія управління роєм БпЛА на основі ройового інтелекту.
Джерело: розроблено автором О.М. Компанієць.

Для досягнення прагматичної мети дослідження постає необхідність у вирішенні наступних наукових завдань:

- провести аналіз існуючих методичних підходів управління та функціонування роїв БпЛА;
- обґрунтувати науково-методичний апарат управління ройовими інтелектуальними системами БпЛА;
- розробити та дослідити моделі й методи управління роями БпЛА;
- удосконалити методи управління та взаємодії БпЛА в роях (групах);
- розробити інформаційну технологію управління роями БпЛА;

- оцінити ефективність розроблених моделей і методів.

Для вирішення поставленої наукової проблеми висунуто гіпотезу дослідження – очікуваний позитивний ефект від застосування комплексного управління роєм БпЛА можна досягти за рахунок побудови стратегій комплексного застосування і функціонування роїв БпЛА, теоретичних основ формування і управління роями БпЛА і розробленні науково-методичного апарату управління ройовими інтелектуальними системами БпЛА під час виконання бойових і спеціальних завдань.

Виконання наукових завдань дасть змогу досягти прагматичної мети дослідження – визначити наукові положення, у тому числі

закономірності, моделі, методи, методичні підходи, за допомогою яких можна набути й обґрунтувати нові знання у теорії систем і теорії управління.

У подальшому вирішення завдань дослідження можливе за рахунок розробки моделей і методів ієрархічного управління БПЛА на основі ройового інтелекту, що використовує колективну поведінку децентралізованої складової, яка здатна до самоорганізації. Це в свою чергу дасть змогу поліпшити показники стійкості та якості управління численними роботизованими засобами на полі бою. Технологія управління роєм роботизованих засобів у спрощеному розумінні має забезпечити реалізацію принципів спільних дій груп БПЛА, які можуть обмінюватися інформацією та виконувати спільну місію, користуючись «колективним розумом», доповнюючи один одного і не заважаючи один одному в процесі виконання бойових і спеціальних завдань. Поведінка рою БПЛА щодо побудови бойових порядків залежно від ситуації, характеру завдання, маневреності всередині рою та інше, вирішуватиметься формалізованими моделями відповідно до бойових і спеціальних завдань.

Висновки

Аналіз наукових досягнень за напрямом управління роями БПЛА показав що, незважаючи на суттєвий розвиток алгоритмів, моделей, методів

у галузі ройового управління, залишається невирішеною проблема розвитку методології управління роями БПЛА під час виконання бойових і спеціальних завдань. Показано, що існуючі класичні підходи на основі централізованого і децентралізованого управління не дають змоги повною мірою задовольнити необхідний рівень управління роями БПЛА в сучасних умовах, що в свою чергу обумовлює їх комплексне застосування як розподілене ієрархічне управління з ройовим інтелектом.

На підставі аналізу наукових напрямків, результатів досліджень та відповідних вимог до існуючих систем управління роями БПЛА обґрунтовано наукову проблему дослідження, висунуто гіпотезу та визначенні наукові завдання із розроблення методології управління роями БПЛА на основі ройового інтелекту.

Напрями подальших досліджень. Розвиток методології сприятиме розробці нових концепцій, топологій і алгоритмів для ройових інтелектуальних систем БПЛА, а також інтеграції передових інформаційних технологій у практику військ. Подальші наукові дослідження будуть ґрунтуватися на вирішенні визначених наукових завдань із розроблення анонсованої методології та досягненні прагматичної мети досліджень.

Список літератури

1. Schranz M., Umlauf M., Sende M., Elmenreich W. Swarm robotic behaviors and current applications. *Frontiers in Robotics and AI*, 2020, 36.
2. Пікенін О.О. Мариношенко, О.П., Прохорчук О.В. Реалізація польоту групи безпілотних літальних апаратів. *Механіка гіроскопічних систем*. 2016. Вип. 31. – С. 12–26.
3. Kharchenko V., Kliushnikov I., Rucinski A., Fesenko H., Illiashenko O. UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application. *Smart Cities*. 2022. 5(3). 1151–1178.
4. Лупандін В.А., Мегельбей Г.В., Мацько О.Й., Куртсеїтов Т.Л., Міроненко П.О. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. (2). С. 88–96.
5. Бондарев Д.І., Кучеров Д.П., Шмельова Т.Ф. Моделі групових польотів безпілотних літальних апаратів з використанням теорії графів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. (3). – С. 68–74.
6. Журавська І. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА: монографія. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. – 192 с.
7. Методологія ситуаційного колективного управління пілотованими і безпілотними літальними апаратами в єдиному повітряному просторі: наукові матеріали. В 3-х томах. Том 2. Інтегровані корпоративні моделі для колективного управління пілотованими і БПЛА в єдиному повітряному просторі в умовах ризику і невизначеності / Харченко В.П., Шмельова Т.Ф., Знаковська Є.А., Бугайко Д.О., Луппо О.Є., Лазоренко В.А., Аргунов Г.Ф. Мухіна М.П., Малютенко Т.Л., Кузьменко Н.С., Бондарев Д.І., Петрушевський А.О., Шостак О.В., Благая Л.В./ Под ред. Харченко В.П.: – К.: НАУ, 2017. – 120 с.
8. Методологія формування інтелектуальної складової агентної системи рою безпілотних літальних апаратів: монографія / О. К. Погудін, Д. М. Крицький, А. М. Биков, Т. А. Пластун, М. В. Пивовар, М. О. Бичок, О. В. Каратанов, А. В. Погудін, О. С. Крицька – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського “Харк. авіац. ін-т”, 2021. – 219 с
9. Голембо В.А., Мельников Р.Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Комп'ютерні системи та мережі*. 2018. 905. – С.56–63.
10. Тристан А.В., Матющенко О.Г. Групове застосування БПЛА у місіях з пошуку та впливу на наземний об'єкти. *Повітряна міць держави*. 2021. №1(1). – С. 94–96.
11. Chung T. Offensive swarm-enabled tactics (offset). DARPA Tactical Technology Office. Proposers Day, Arlington, VA, Accessed January. 2017. T. 30.

12. Brown R., Adams J.A. Congestion Analysis for the DARPA OFFSET CCAST Swarm Field Robotics Journal, Field Robotics, Special Issue: Dynamic Large-Scale Swarm Systems in Urban Environments: Results from the DARPA OFFSET Program. 2023.3. P.190–221.
13. Mizokami K. The Pentagon's autonomous swarming drones are the most unsettling thing you'll see today. Popular Mechanics. 2017. T. 9.
14. Liu B., Wang S., Li Q., Zhao X., Pan Y., Wang C. Task Assignment of UAV Swarms Based on Deep Reinforcement Learning. Drones. 2023, 7, 297.
15. Zhou Y., Rao B., Wang W. Uav swarm intelligence: Recent advances and future trends. IEEE Access. 2020, 8, P. 183856–183878.
16. Khelifi M., Butun I., Swarm Unmanned Aerial Vehicles (SUAVs): A Comprehensive Analysis of Localization, Recent Aspects, and Future Trends. 2022, 8600674.
17. Champion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV swarm communication and control architectures: A review. J. Unmanned Veh. Syst. 2018, 7, P. 93–106.
18. Puente-Castro A., Rivero D., Pazos A., Fernandez-Blanco E. A review of artificial intelligence applied to path planning in UAV swarms. Neural Comput. Appl. 2022, 34, P. 153–170.
19. Champion M., Ranganathan P., Faruque S. A review and future directions of UAV swarm communication architectures. In Proceedings of the IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), Rochester, MI, USA, 3–5 May 2018. P. 0903–0908.
20. Telli K., Kraa O., Himeur Y., Ouamane A., Boumehraz M., Atalla S., Mansoor, W. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on UAVs. Systems. 2023, 11(8), 400.
21. Bhamu N., Harshit Verma, Akanksha Dixit, Barbara Bollard, and Smruti R. Sarangi. SmrtSwarm: A Novel Swarming Model for Real-World Environments. Drones. 2023. 9. 573.
22. Varun K.A., Kumar R., Priyadarshini P.C., Kathik E.S., Madhan Sonya A. Self-co-ordination algorithm (SCA) for multi-UAV systems using fair scheduling queue. Sensor review, 01 Sep 2023, Vol. 43, Issue 4, p. 233–242.
23. Kernbach S., ed. Handbook of collective robotics: fundamentals and challenges. CRC Press, 2013.

Надійшла до редколегії 30.11.2023

Схвалена до друку 28.12.2023

Відомості про авторів:

Таршин Володимир Анатолійович

доктор технічних наук
професор
заступник начальника університету
з навчальної роботи
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7059-6354>

Компанієць Олег Миколайович

кандидат технічних наук
докторант
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7472-0869>

Котляренко Сергій Євгенович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0001-7060-5847>

Дужий Роман Володимирович

заступник начальника
навчально-наукового центру іноземних мов
Національного університету оборони України,
Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-8064-1312>

Information about the authors:

Volodymyr Tarshyn

Doctor of the Technical Sciences
Professor
Deputy Head
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University
for Educational Work,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7059-6354>

Oleh Kompaniets

Candidate of Technical Sciences
Doctoral Candidate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7472-0869>

Serhii Kotlyarenko

Candidate of Technical Science
Senior Researcher
Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-7060-5847>

Roman Duzhyi

Deputy Head
of the Foreign Languages Education and Research Centre
of National Defence University of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-8064-1312>

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CONTROLLING UAV SWARMS BASED ON SWARM INTELLIGENCE

V. Tarshyn, O. Kompaniets, S. Kotlyarenko, R. Duzhyi

The relevance of the study is due to the emergence of new problems of organized massive (swarm) use of UAVs in the course of high-precision strikes on military and critical enemy targets distributed in space in the tactical and operational depth of the construction of combat orders. The expediency of applying the approach of distributed hierarchical control of UAVs with swarm intelligence is substantiated. The use of such a control approach will ensure the effective use of UAV swarms (including heterogeneous ones) in the operations of interspecies groups of troops of the Armed Forces of Ukraine and other components of the Security and Defense Forces of Ukraine in repelling the armed aggression of the enemy. Distributed hierarchical control is an integrated approach and provides a combination of the advantages of centralized and decentralized control and compensates for their disadvantages in control a UAV swarm. Based on the results of the study, the contradictions were identified and the scientific problem was formulated, and partial scientific tasks of the study were identified to develop a methodology for controlling UAV swarms based on swarm intelligence, which includes application strategies, theoretical foundations, scientific and methodological apparatus, and research results. The research hypothesis is put forward that the conditions for achieving a positive effect from approaches to UAV swarm control can be achieved by building strategies for the integrated use and operation of UAV swarms, the theoretical foundations for the formation and control of UAV swarms, and the development of a scientific and methodological apparatus for controlling UAV swarm intelligence systems in the performance of combat and special missions. The development of the methodology will contribute to the development of new concepts, architecture and algorithms for swarm intelligent UAV systems, as well as the integration of advanced information technologies into military practice.

Keywords: unmanned aerial vehicle, methodology, UAV swarm, swarm intelligence, distributed hierarchical control, control of swarm intelligent systems, centralized and decentralized control.