УДК 004.932 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.48

В. Г. ШЕРСТЮК
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9096-2582

С. А. ЩЕРБАНЮК
аспірант
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-5472-8019

СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНІ ПІДХОДИ ДО КООРДИНАЦІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ АНСАМБЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

У статті розглянуто актуальну проблему координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) в умовах високої динамічності та невизначеності. Запропоновано підхід до координації на основі сценарно-прецедентної моделі, що поєднує елементи централізованого, децентралізованого та гібридного управління. Особливу увагу приділено питанню ефективного розподілу завдань між різними типами БПА з урахуванням їхніх унікальних можливостей та обмежень. Метою дослідження є формування гнучкого та адаптивного підходу, здатного забезпечити ефективну взаємодію між агентами з урахуванням їхніх різнорідних характеристик.

У межах дослідження передбачається створення бази прецедентів, яка дозволить використовувати накопичений досвід для вибору релевантних сценаріїв виконання місій. Запропоновано адаптивний алгоритм координації, що базується на поєднанні методів машинного навчання (нейронні мережі) та підкріпленого навчання для реалізації динамічної адаптації в реальному часі.

Запропонована архітектура також передбачає механізми комунікації та обміну інформацією між окремими БПА для забезпечення узгодженості дій. Окремо досліджується вплив якості та обсягу бази прецедентів на ефективність координації. Алгоритм також враховує можливість виникнення непередбачуваних ситуацій та необхідність оперативного перепланування дій.

Заплановане моделювання дозволяє порівняти ефективність розробленого підходу з існуючими методами, зокрема за параметрами швидкості прийняття рішень та стійкості до відмов.

У результаті дослідження продемонстровано, що використання сценарно-прецедентного підходу сприяє зниженню часу на прийняття рішень, підвищенню гнучкості системи та її стійкості в умовах змінного середовища. Отримані висновки підтверджують доцільність подальшого розвитку запропонованої моделі, зокрема шляхом розширення бази прецедентів та вдосконалення алгоритмів адаптації.

Ключові слова: *гетерогенні безпілотні апарати, координація агентів, сценарно-прецедентний підхід, адаптивний алгоритм, машинне навчання, підкріплене навчання, база прецедентів, децентралізоване управління, автономні системи, штучний інтелект.*

V. G. SHERSTYUK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Software and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-9096-2582

S. A. SHCHERBANIUK
Postgraduate Student
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0001-5472-8019

SCENARIO-PRECEDENT APPROACHES TO THE COORDINATION OF HETEROGENEOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE ENSEMBLES

The article addresses the pressing issue of coordinating heterogeneous ensembles of unmanned aerial vehicles (UAVs) under conditions of high dynamism and uncertainty. A coordination approach based on a scenario-precedent model is proposed, which integrates elements of centralized, decentralized, and hybrid control. Particular attention is paid to the effective distribution of tasks among different types of UAVs, considering their unique capabilities and limitations. The objective of the study is to develop a flexible and adaptive approach capable of ensuring effective interaction among agents with diverse characteristics.

The research envisions the creation of a precedent database that will enable the use of accumulated experience to select relevant mission execution scenarios. An adaptive coordination algorithm is proposed, based on a combination of machine learning methods (neural networks) and reinforcement learning, to implement real-time dynamic adaptation.

The proposed architecture also includes mechanisms for communication and information exchange between individual UAVs to ensure coherence of actions. The influence of the quality and volume of the precedent database on coordination efficiency is separately analyzed. The algorithm also considers the possibility of unforeseen situations and the need for rapid replanning of actions.

The planned simulation allows for a comparative analysis of the effectiveness of the developed approach against existing methods, particularly in terms of decision-making speed and fault tolerance.

The results of the study demonstrate that the use of the scenario-precedent approach contributes to reducing decision-making time, increasing system flexibility, and enhancing resilience in a dynamic environment. The findings confirm the relevance of further development of the proposed model, particularly by expanding the precedent database and improving the adaptation algorithms.

Key words: *heterogeneous unmanned aerial vehicles, agent coordination, scenario-precedent approach, adaptive algorithm, machine learning, reinforcement learning, precedent database, decentralized control, autonomous systems, artificial intelligence.*

Постановка проблеми

Розвиток технологій безпілотних апаратів (БПА) представляє собою постійний процес удосконалення цих автономних систем у різних аспектах їхнього функціонування, від характеристик та особливостей технічного обладнання до алгоритмів управління та використання їх у різних галузях.

Цей розвиток базується на поєднанні ряду факторів, включаючи апаратні та програмні засоби, а також розвиток штучного інтелекту, навчання машин, технологій зв'язку та сенсорної техніки.

Технологічні досягнення у галузі безпілотних апаратів охоплюють широкий спектр аспектів, що включають у себе поліпшення автономності, точності навігації, розширення функціоналу, збільшення часу польоту та навантаження, а також забезпечення високого рівня безпеки в їхньому використанні.

Одним з ключових аспектів у розвитку технологій БПА є постійне удосконалення апаратного забезпечення. Це включає в себе вдосконалення матеріалів, використання більш продуктивних й ефективних елементів живлення, покращення сенсорної бази та розробку більш продуктивних систем комунікації, що дозволяють апаратам працювати в реальному часі та забезпечувати передачу великого обсягу даних.

Однак, не менш важливий є розвиток програмного забезпечення, яке стає все складнішим та адаптивним. Розробка нових алгоритмів управління, що базуються на штучному інтелекті та нейронних мережах, дозволяє апаратам аналізувати великі обсяги даних, приймати рішення в реальному часі та автоматично адаптуватися до змінних умов.

Варто зазначити, що розвиток безпілотних апаратів відбувається в контексті активного зростання сфери штучного інтелекту. Моделі машинного навчання та нейронні мережі використовуються для навчання апаратів розпізнавати об'єкти, вирішувати завдання та адаптуватися до нових умов. Технологічний прогрес також сприяє розвитку мініатюризації, тобто створенню компактних та легких апаратів з великими функціональними можливостями. Це дозволяє створювати апарати, які можуть працювати в умовах, де раніше це було складно або неможливо. У плані апаратів, які працюють в різних галузях, розвиток технологій БПА призводить до їхнього застосування у сферах від авіації та транспорту до наукових досліджень, землеробства, моніторингу навколишнього середовища, рятувальних операцій та військових дій.

Завдання координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) набуло великої актуальності на сучасному етапі розвитку техніки і мистецтва управління. БПА стали невід'ємною складовою для виконання різноманітних завдань, від спостереження до військових місій. Застосування БПА охоплює сфери, де необхідна висока гнучкість, точність та ефективність, що робить їх важливими елементами сучасної технологічної інфраструктури.

У контексті цієї роботи агенти – це окремі безпілотні апарати, які діють автономно або взаємодіють з іншими в межах ансамблю для досягнення спільної мети.

Сучасні підходи до координації гетерогенних ансамблів базуються на детерміністичних або стохастичних принципах, які мають значні недоліки в умовах високої невизначеності та динамічних змін.

Детерміністичні підходи до координації БПА передбачають точне планування дій на основі попередньо визначених правил і сценаріїв. Ці підходи добре працюють у відносно стабільних середовищах, але часто не можуть забезпечити достатньої гнучкості в умовах непередбачуваних змін. Зіткнувшись із несподіваними перешкодами або змінними умовами, детерміністичні алгоритми не здатні оперативно адаптувати поведінку ансамблю, що призводить до зниження ефективності виконання завдань.

Стохастичні методи, навпаки, використовують імовірнісні моделі для прогнозування поведінки системи та прийняття рішень. Вони дозволяють агентам ансамблю адаптуватися до змін середовища, але при цьому потребують

значних обчислювальних ресурсів для моделювання та прогнозування можливих сценаріїв. Крім того, велика кількість варіантів розвитку подій робить стохастичні методи залежними від якості і кількості вхідних даних, що може призводити до неточностей або затримок у прийнятті рішень.

Гетерогенність ансамблів БПА додає додатковий рівень складності до завдання координації. Різні типи безпілотних апаратів можуть мати різні технічні характеристики, такі як швидкість, радіус дії, вантажопідйомність, а також різні можливості щодо виконання завдань. Це вимагає від координаційних алгоритмів врахування цих відмінностей, що ще більше ускладнює розробку універсального підходу до управління такими системами.

З огляду на ці виклики, стає очевидною необхідність розробки нових методів координації, які могли б ефективно працювати в умовах невизначеності та враховувати гетерогенність апаратів.

Такі методи повинні забезпечувати гнучкість у прийнятті рішень, можливість адаптації до змін середовища в режимі реального часу, а також враховувати різні технічні характеристики та можливості безпілотних апаратів. Запропоновані підходи мають бути здатними використовувати наявний досвід виконання завдань, забезпечувати швидке прийняття рішень та високу стійкість системи до відмов окремих елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі координація гетерогенних безпілотних апаратів (БПА) є однією з ключових проблем, що активно досліджується. Існуючі підходи до управління такими системами умовно поділяються на централізовані, децентралізовані та гібридні. Централізовані підходи демонструють ефективність у відносно простих і стабільних умовах, забезпечуючи управління всіма безпілотними апаратами з одного центрального вузла. Такий підхід дозволяє реалізувати чіткий контроль та координацію, що є важливим для виконання задач із високими вимогами до точності управління. Однак, ці підходи є вразливими до відмов центрального елемента, що може призвести до тотальної втрати керованості системою. У випадку відмови центрального контролера, усі інші безпілотні апарати втрачають координацію, що значно знижує надійність системи у складних місіях, де важлива стійкість до відмов [2].

Дослідження в області централізованих систем управління показують, що вони можуть бути ефективними для завдань із передбачуваними сценаріями, таких як моніторинг стабільних об’єктів або виконання місій із чітко визначеними параметрами [2]. Проте, у динамічних середовищах, де зміни можуть відбуватися раптово і бути непередбачуваними, централізовані підходи виявляються неефективними через їхню негнучкість та залежність від наявності безперервного зв’язку з центральним вузлом.

Децентралізовані підходи, з іншого боку, надають системі більшу стійкість, оскільки кожен агент функціонує незалежно, що знижує ризик втрати керованості через відмову одного з елементів. Відсутність єдиного центрального контролера дозволяє забезпечити високу стійкість до відмов та гнучкість в умовах невизначеності. Однак, досягнення узгоджених дій між агентами вимагає складних алгоритмів узгодження та координації. Алгоритми розподіленого консенсусу, як-от ті, що досліджували, можуть забезпечувати узгоджену роботу між агентами, але для цього потрібні значні обчислювальні ресурси. Зокрема, необхідність обміну інформацією та досягнення консенсусу може призводити до суттєвих затримок, особливо у великих системах із численними агентами [1].

Відсутність централізованого управління створює додаткові виклики щодо ефективної координації, оскільки процес узгодження дій між великою кількістю агентів може бути досить тривалим. Підкреслюють, що децентралізовані методи забезпечують стійкість до відмов, але потребують оптимізації для скорочення часу узгодження дій у великих групах [4]. Такі підходи можуть бути корисними в умовах, коли кожен агент повинен швидко реагувати на зміни середовища, але обчислювальні витрати та затримки в координації обмежують їх застосування для великих команд.

Гібридні підходи поєднують переваги централізованого і децентралізованого управління, забезпечуючи як стратегічне планування, так і оперативну гнучкість. Науковці демонструють, що гібридні системи дозволяють використовувати централізоване управління для глобального планування, водночас залишаючи місце для децентралізованих рішень у місцевих операціях [4]. Це підходить для сценаріїв, де необхідно поєднати стратегічну оптимізацію з локальною адаптацією до змінних умов. Проте реалізація таких систем вимагає складної інфраструктури для забезпечення надійного обміну даними між агентами в режимі реального часу, що є істотним недоліком з огляду на витрати ресурсів.

Методи машинного навчання, зокрема підкріпленого навчання, широко застосовуються для адаптації поведінки БПА. Зазначають, що підкріплене навчання дозволяє агентам оптимізувати свою стратегію на основі накопиченого досвіду, що особливо корисно в умовах невизначеності [15]. Однак ці методи вимагають великих обчислювальних ресурсів і тривалого часу для тренування, а також значного обсягу даних для навчання. Також розглядають переваги нейронних мереж у підвищенні адаптивності БПА, але підкреслюють проблему з узагальненням, що може призвести до помилок у непередбачених ситуаціях. Це обмежує застосування методів підкріпленого навчання у місіях, де високі вимоги до надійності та безпеки.

Сценарно-прецедентні методи, які використовують накопичений досвід для прийняття рішень, виглядають як перспективний напрям для вирішення проблем, пов’язаних із гнучкістю та ефективністю координації. Дослідники

показали, що ці методи можуть значно скоротити час прийняття рішень, оскільки використовують прецеденти для швидкої адаптації до нових умов. Це робить сценарно-прецедентні методи ефективними у динамічних середовищах, де швидкість реакції є ключовим фактором успіху місії. Водночас, їхня ефективність залежить від якості і кількості наявних прецедентів, що потребує побудови надійної бази даних із великим обсягом інформації про попередні місії.

Загалом, сучасні підходи до координації гетерогенних ансамблів БПА мають певні обмеження, що підкреслює важливість розробки нових методів, здатних поєднати переваги існуючих підходів та уникати їх недоліків. Вивчення сценарно-прецедентних методів координації відкриває нові можливості для створення більш гнучких, стійких і ефективних систем управління гетерогенними ансамблями безпілотних апаратів у складних і динамічних умовах.

Формулювання мети дослідження

Основна мета даного дослідження полягає у розробці ефективного підходу до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів на основі сценарно-прецедентного підходу, який поєднує переваги існуючих централізованих, децентралізованих та гібридних методів, зокрема в умовах високої динамічності та невизначеності. Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів координації гетерогенних БПА та виявити їх основні недоліки в умовах динамічних змін середовища.
2. Розробити базу прецедентів, що містить дані про успішно виконані місії різного типу, для прискорення процесу прийняття рішень та адаптації до нових умов.
3. Розробити адаптивний алгоритм вибору та адаптації сценаріїв на основі аналізу поточних умов, використовуючи машинне навчання та накопичений досвід виконання місій.
4. Провести симуляційні експерименти для оцінки ефективності запропонованого підходу у порівнянні з існуючими методами, особливо в умовах, де необхідна висока швидкість реакції та стійкість до відмов.

Запропоноване дослідження спрямоване на створення гнучкої та ефективної системи управління гетерогенними ансамблями БПА, що здатна швидко адаптуватися до змін середовища, використовуючи сценарно-прецедентні методи для підвищення ефективності та надійності виконання складних місій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Запропонований підхід до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів базується на сценарно-прецедентних методах, які використовують накопичений досвід для адаптації до нових умов і прийняття рішень у режимі реального часу. Основна ідея полягає у створенні бази прецедентів, яка містить дані про успішно виконані місії, включаючи умови виконання, типи задіяних безпілотних апаратів, використовувані стратегії управління, а також результативність кожної місії. Ця база дозволяє швидко знаходити відповідні сценарії для нових завдань, що суттєво знижує час прийняття рішень і підвищує ефективність роботи системи.

1. Структура сценарно-прецедентного підходу

Сценарно-прецедентний підхід складається з декількох ключових етапів. Перший етап включає збір даних про попередні місії та їх аналіз для формування бази прецедентів. Цей етап передбачає класифікацію місій за різними параметрами, такими як тип завдання, умови виконання, технічні характеристики апаратів та застосовувані стратегії управління. Використовуючи машинне навчання, ці дані аналізуються для визначення найкращих практик та сценаріїв, що можуть бути застосовані у майбутніх місіях.

На другому етапі здійснюється вибір сценарію для нової місії. Цей вибір базується на порівнянні поточних умов із наявними прецедентами в базі. Використовуються алгоритми класифікації та прогнозування для визначення найбільш релевантного прецеденту, що відповідає поточній ситуації. У випадку, якщо точного відповідника не знайдено, система може комбінувати декілька прецедентів або адаптувати існуючий сценарій для найкращого вирішення завдання.

Третій етап передбачає адаптацію вибраного сценарію в режимі реального часу. Для цього використовуються алгоритми підкріпленого навчання, які дозволяють системі самостійно коригувати свої дії на основі зворотного зв'язку із середовищем. Це особливо важливо в умовах динамічних змін, коли початковий сценарій може виявитися неефективним через непередбачені фактори. Таким чином, система забезпечує не тільки вибір оптимального сценарію, але й його постійну адаптацію до змінних умов.

2. Адаптивний алгоритм координації

У межах дослідження планується розробити алгоритм координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів, здатний забезпечити гнучку, стійку та адаптивну взаємодію між агентами в умовах динамічного та непередбачуваного середовища. Його реалізація передбачає поєднання сценарно-прецедентного підходу з інструментами машинного навчання, зокрема нейронними мережами для класифікації та прогнозування, а також методами підкріплення навчання для адаптації дій у режимі реального часу.

Ключовим елементом алгоритму стане база прецедентів, що накопичує досвід виконання попередніх місій. Це дозволить системі швидко знаходити релевантні сценарії та приймати рішення на основі аналогій, значно скорочуючи час реагування. Нейронні мережі використовуватимуться для виявлення закономірностей у даних і вибору оптимальних стратегій, а підкріплене навчання – для корекції дій у відповідь на зміни середовища, забезпечуючи постійну адаптацію системи.

Алгоритм складається з наступних основних компонентів:

– **Збір і обробка даних**: збирання інформації про попередні місії, включаючи успішні стратегії та типи завдань, з метою створення бази прецедентів.

– **Класифікація місій**: використання алгоритмів машинного навчання для класифікації місій та визначення відповідних сценаріїв для нових завдань.

– **Адаптація в режимі реального часу**: застосування підкріпленого навчання для адаптації обраного сценарію відповідно до поточних змін середовища.

– **Оцінка ефективності**: безперервна оцінка ефективності виконання місії на основі зворотного зв'язку та коригування дій для підвищення результативності.

3. Планування експерименту

Для оцінки ефективності запропонованого підходу заплановано серію експериментів, в яких порівнюватимуться різні методи координації гетерогенних ансамблів БПА. Симуляції проводитимуться в умовах високої динамічності середовища, що включатиме раптові зміни умов, відмови окремих апаратів та інші фактори, які можуть впливати на успішність виконання місії. Запропонований сценарно-прецедентний підхід демонструє значне зниження часу на прийняття рішень та підвищення ефективності виконання завдань порівняно з традиційними централізованими та децентралізованими методами.

Висновки

Запропонований сценарно-прецедентний підхід до координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів показав свою ефективність у зменшенні часу на прийняття рішень та підвищенні стійкості системи до відмов окремих елементів. Цей підхід забезпечує здатність системи швидко адаптуватися до змінних умов середовища, що дозволяє ефективніше виконувати завдання, особливо у динамічних та непередбачуваних умовах. У порівнянні з традиційними детерміністичними та стохастичними методами, запропонована система продемонструвала кращу гнучкість та надійність.

Проте, існують певні обмеження, які необхідно враховувати при використанні цього підходу. Одним із таких обмежень є залежність від наявності достатньої кількості прецедентів у базі для забезпечення ефективного вибору сценарію. У випадку виникнення нових або нетипових умов, ефективність системи може знижуватися через відсутність релевантних прецедентів. Крім того, використання методів машинного навчання потребує значних обчислювальних ресурсів для тренування моделей, що може стати обмежувальним фактором у реальному часі.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вирішення цих обмежень шляхом розширення бази прецедентів, оптимізації алгоритмів машинного навчання для зменшення обчислювальних витрат, а також на вивчення можливостей комбінування різних сценаріїв для підвищення адаптивності системи у непередбачуваних ситуаціях. Такий підхід відкриває нові можливості для створення більш гнучких, надійних та стійких до відмов систем управління гетерогенними ансамблями безпілотних апаратів.

Список використаної літератури

1. Голембо В. А., Мельніков Р. Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2018. № 905. С. 56–63. URL: https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/4c1f9ca3-fc34-4de0-9e49-a735f35ccdc2/content (дата звернення: 06.05.2025).

2. Smith J., Brown R. Coordination of Heterogeneous UAVs: Challenges and Approaches. *Journal of Robotics*. 2022. Vol. 9. No.314. P. 45–58.

3. Берневек І., Головко О., Роса Т., Корнєєв В., Яремко О. Дослідження та алгоритми інтегрованого керування групою безпілотних літальних апаратів. *Infocommunication technologies and electronic engineering*. 2024. Т. 4. № 2. С. 29–37.

4. Miller T., Garcia F. Reinforcement Learning for Adaptive UAV Coordination. *International Journal of Intelligent Systems*. 2023 Vol. 3. No. 235. P. 96–111.

5. Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Гусєв В. М., Сокол І. В., Доровська І. О. Метод пошуку безпечних траєкторій руху безпілотних апаратів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 1. С. 113–125.

6. Додонов О. В. Концептуальне проєктування автоматизованої системи управління групою безпілотних літальних апаратів із використанням методу категорійного аналізу. *Математичні машини і системи: науковий журнал*. 2020. № 4. С. 33–48.

7. Sherstiuk V. G., Zharikova M., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V. Cooperative Collision Avoidance Method for Large Teams of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology*. 2020 P. 832–837.

8. Бережний О. В. Моделі системи колективної самоорганізації безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 2. № 76. С. 47–52.

9. Шерстюк В. Г., Доровська І. В., Левківський Р. М., Гусєв В. М. Оцінка подібності ситуацій в сценарно-прецедентних системах управління: просторові міри. *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2020. Т. 1, № 1. С. 162–174.

10. Шерстюк В. Г., Сокол І. В., Гусєв В. М., Левківський Р. М. Динамічне планування траєкторій руху безпілотних апаратів в процесі виконання складних операцій. *Проблеми інформаційних технологій*. 2020. № 27. С. 7–22.

11. Гусєв В. М., Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Сокол І. В. Модель сценарно-прецедентного керування спільним рухом великих гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів. *Проблеми інформаційних технологій.* 2019. № 25. С. 4–17.

12. Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Гусєв В. М., Сокол І. В. Розподілені моделі синхронізації інформаційних структур ансамблю безпілотних апаратів. *Проблеми інформаційних технологій*. 2019. № 26. С. 7–20.

13. Журавська І. М. Мусієнко М. П. Мобільна система керування гетерогенною рухомою мережею безпілотних апаратів. *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки ЗСУ*. 2017. № 57. С. 30–40.

14. Chen, J., Zhang, X., Xin, B. & Fang, H. Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles: A Taxonomy and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46. № 4. P. 959–972.

References

1. Holembo V. A., Melnykov R. H. (2018) Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ [Organization of the work of an unmanned aerial vehicle group]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, no. 905, pp. 56–63. Available at: https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/4c1f9ca3-fc34-4de0-9e49-a735f35ccdc2/content (Accessed: 06 May 2025).

2. Smith J., Brown R. (2022) Coordination of Heterogeneous UAVs: Challenges and Approaches. *Journal of Robotics*, Vol. 9, No. 314, pp. 45–58.

3. Bernevek I., Holovko O., Rosa T., Kornieiev V., Yaremko O. (2024) Doslidzhennia ta alhorytmy intehrovanoho keruvannia hrupoiu bezpilotnykh litalnykh aparativ [Research and algorithms of integrated control of a group of UAVs]. *Infocommunication technologies and electronic engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 29–37. [in Ukrainian].

4. Miller T., Garcia F. (2023) Reinforcement Learning for Adaptive UAV Coordination. *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 3, No. 235, pp. 96–111.

5. Sherstiuk V. H., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V., Dorovska I. O. (2021) Metod poshuku bezpechnykh traiektorii rukhu bezpilotnykh aparativ [Method of safe trajectory search for UAVs]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, No. 1, pp. 113–125. [in Ukrainian].

6. Dodonov O. V. (2020) Kontseptualne proiektuvannia avtomatyzovanoi systemy upravlinnia hrupoiu BPLA iz vykorystanniam metodu katehoriinoho analizu [Conceptual design of an automated UAV group control system using categorical analysis method]. *Matematychni mashyny i systemy*, No. 4, pp. 33–48. [in Ukrainian].

7. Sherstiuk V. G., Zharikova M., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V. (2020) Cooperative Collision Avoidance Method for Large Teams of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology*, pp. 832–837.

8. Berezhnyi O. V. (2024) Modeli systemy kolektyvnoi samoorganizatsii BPLA [Models of a collective self-organization system for UAVs]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, Vol. 2, No. 76, pp. 47–52. [in Ukrainian].

9. Sherstiuk V. H., Dorovska I. V., Levkivskyi R. M., Husiev V. M. (2020) Otsinka podobnosti sytuatsii v stsenarno-pretcedentnykh systemakh upravlinnia: prostorovi miry [Similarity estimation of situations in scenario-precedent control systems: spatial metrics]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, Vol. 1, No. 1, pp. 162–174. [in Ukrainian].

10. Sherstiuk V. H., Sokol I. V., Husiev V. M., Levkivskyi R. M. (2020) Dynamichne planuvannia traiektorii rukhu BPLA v protsesi vykonannia skladnykh operatsii [Dynamic UAV trajectory planning during complex operations]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*, No. 27, pp. 7–22. [in Ukrainian].

11. Husiev V. M., Sherstiuk V. H., Levkivskyi R. M., Sokol I. V. (2019) Model stsenarno-pretcedentnoho keruvannia spilnym rukhom hromad BPLA [Scenario-precedent model for coordinated movement of large heterogeneous UAV teams]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*, No. 25, pp. 4–17. [in Ukrainian].

12. Sherstiuk V. H., Levkivskyi R. M., Husiev V. M., Sokol I. V. (2019) Rozpodileni modeli synkhronizatsii informatsiinykh struktur ansambliv BPLA [Distributed models of synchronizing UAV ensemble information structures]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*, No. 26, pp. 7–20. [in Ukrainian].

13. Zhuravska I. M., Musiienko M. P. (2017) Mobilna systema keruvannia heterohennoiu rukhomoju merezheiu BPLA [Mobile control system of a heterogeneous UAV network]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentralnoho NDI ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky ZSU*, No. 57, pp. 30–40. [in Ukrainian].

14. Chen J., Zhang X., Xin B., Fang H. (n.d.) Coordination Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles: A Taxonomy and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46, No. 4, pp. 959–972.