

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

ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОЇ КООРДИНАЦІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ АНСАМБЛІВ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ ТА АЛГОРИТМ ЇЇ АДАПТАЦІЇ У ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті розглянуто задачу координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) у динамічних та невизначених умовах із застосуванням сценарно-прецедентного підходу. На відміну від попередніх досліджень, де основний акцент робився на концептуальній моделі системи та загальних принципах її роботи, у даній роботі зосереджено увагу на формальній математичній специфікації ключових елементів підходу. Зокрема, запропоновано формальну модель сценарію виконання місії, структуру прецеденту та організацію бази прецедентів, що дозволяє систематизувати накопичений досвід виконання типових завдань гетерогенними групами БПА.

У межах дослідження розроблено модель, орієнтовану на три базові типи апаратів – мікроквадрокоптери, середні мультикоптери та літакові БПА, що відрізняються своїми технічними характеристиками, стійкістю до умов середовища та функціональними можливостями. Модель спрямована на забезпечення ефективної координації при виконанні місії розвідки, спостереження та моніторингу, які потребують узгодженого розподілу ролей, оперативної зміни траєкторій та адаптації поведінки агентів.

У статті введено метрику подібності, що дає змогу визначати рівень відповідності між поточним станом середовища, параметрами апаратів та умовами виконання місії, зафіксованими у прецедентах. На її основі запропоновано алгоритм вибору релевантного сценарію з бази прецедентів та механізм його адаптації в реальному часі з використанням принципів підкріпленого навчання. Такий підхід забезпечує гнучке коригування сценарію у відповідь на зміни зовнішніх факторів та поведінки окремих агентів.

Результати дослідження демонструють, що формалізована сценарно-прецедентна модель створює передумови для побудови стійких, адаптивних та масштабованих систем координації гетерогенних БПА. Запропоновані рішення формують теоретичну основу для подальшого моделювання, експериментальної перевірки та порівняння з існуючими методами координації в умовах складних, динамічних та непередбачуваних середовищ.

Ключові слова: безпілотні апарати; гетерогенні ансамблі; багатоагентні системи; координація БПА; сценарно-прецедентний підхід; формальна модель; база прецедентів; адаптивні алгоритми; підкріплене навчання; розподілене управління; метрика подібності; автономні системи; розвідка; спостереження; моніторинг території.

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



FORMAL MODEL OF SCENARIO-PRECEDENT COORDINATION OF HETEROGENEOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE ENSEMBLES AND ITS ADAPTATION ALGORITHM IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

This article addresses the problem of coordinating heterogeneous ensembles of unmanned aerial vehicles (UAVs) in dynamic and uncertain environments using a scenario-precedent approach. Unlike previous studies, which primarily focused on the conceptual system model and general architectural principles, this work emphasizes the formal mathematical specification of the key components of the approach. In particular, a formal model of a mission execution scenario, a precedent structure, and the organization of a precedent base are proposed, enabling the systematic representation and reuse of accumulated experience in typical UAV group missions.

The study develops a model oriented toward three basic types of UAVs – micro quadcopters, medium multirotor UAVs, and fixed-wing aircraft – each characterized by distinct technical capabilities, environmental resilience, and functional roles. The model aims to support effective coordination during reconnaissance, observation, and territory monitoring missions, which require synchronized role distribution, rapid trajectory adjustment, and adaptive agent behavior.

The article introduces a similarity metric that allows estimating the correspondence between the current environmental state, UAV parameters, and mission execution conditions recorded in the precedent base. Based on this metric, an algorithm for selecting a relevant scenario from the precedent base is proposed, along with a real-time scenario adaptation mechanism leveraging reinforcement learning principles. This enables flexible scenario correction in response to changes in external conditions and individual agent behavior.

The results of the study demonstrate that the formalized scenario-precedent model provides a foundation for building robust, adaptive, and scalable coordination systems for heterogeneous UAV ensembles. The proposed solutions form the theoretical basis for further simulation studies, experimental validation, and comparative analysis with existing coordination methods in complex, dynamic, and uncertain environments.

Key words: *unmanned aerial vehicles; heterogeneous ensembles; multi-agent systems; UAV coordination; scenario-precedent approach; formal model; precedent base; adaptive algorithms; reinforcement learning; distributed control; similarity metric; autonomous systems; reconnaissance; observation; territory monitoring.*

Постановка проблеми

Координація гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів (БПА) є однією з ключових проблем сучасних автономних систем, особливо в умовах високої динамічності та невизначеності середовища. Гетерогенність таких ансамблів полягає у значних відмінностях між апаратами за технічними характеристиками, функціональними можливостями, енергетичними ресурсами, сенсорним обладнанням та рівнем автономності. У межах однієї місії мікроквадрокоптери можуть виконувати оперативну розвідку на малих висотах, мультикоптери – забезпечувати стабільне спостереження, а літакові БПА – здійснювати моніторинг великих територій на великих дистанціях. Узгоджена взаємодія таких різномірних агентів потребує гнучких механізмів розподілу завдань, адаптації планів та своєчасного реагування на зміни середовища.

У реальних умовах ефективна координація ускладнюється обмеженнями комунікацій, ймовірністю виникнення непередбачуваних перешкод, варіативністю погодних умов і необхідністю оперативної зміни маршрутів або ролей між агентами. У таких системах надзвичайно важливими стають здатність до швидкого прийняття рішень, адаптація до змінних умов та стійкість до відмов окремих елементів, що дозволяє зберегти працездатність усієї групи навіть у разі втрати одного або кількох БПА.

Традиційні централізовані, децентралізовані та гібридні підходи до управління демонструють певну ефективність, проте мають суттєві обмеження. Централізовані системи критично залежать від центрального вузла та можуть втрачати керованість у разі порушення зв'язку. Децентралізовані підходи забезпечують більшу стійкість, проте часто вимагають складних механізмів узгодження між агентами, що підвищує затримки та обчислювальні витрати. Стохастичні методи дозволяють досягти кращої адаптивності, але потребують великих обсягів даних і значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх застосування у часочутливих місіях. Детерміністичні методи, навпаки, можуть бути недостатньо гнучкими, оскільки залежать від попередньо визначених сценаріїв, які часто не враховують усіх можливих змін у середовищі.

Сценарно-прецедентний підхід, запропонований у попередньому етапі дослідження, демонструє значний потенціал завдяки можливості використовувати накопичений досвід виконання подібних місій і приймати рішення на основі аналогій. Він дозволяє скоротити час пошуку оптимального сценарію та забезпечує більш гнучку адаптацію до умов, що змінюються. Водночас для його практичної реалізації недостатньо лише концептуальних засад – необхідна формальна математична модель, яка чітко визначає структуру сценарію, форму прецеденту, правила їх індексації, критерії подібності та механізми вибору релевантного сценарію.

Потреба у такій формалізації зумовлена тим, що відсутність математично описаних компонентів унеможливає побудову ефективних алгоритмів, їх оптимізацію, валідацію та інтеграцію у реальні або симульовані багатоагентні системи. Осмислене та структуроване визначення сценарію та прецеденту є критично важливим

для забезпечення відтворюваності рішень, зниження обчислювальних витрат і підвищення точності вибору. Крім того, відсутні універсальні формальні методи оцінки подібності між умовами місії та даними з попереднього досвіду, що ускладнює автоматизований вибір сценарію.

Таким чином, проблема полягає у створенні цілісної, формально обґрунтованої та алгоритмічно придатної моделі сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів БПА. Така модель повинна забезпечувати структурований підхід до вибору та адаптації сценаріїв у режимі реального часу, враховуючи специфіку апаратів, типи місій, обмеження середовища та вимоги до оперативності роботи автономних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Координація гетерогенних багатоагентних систем, зокрема безпілотних апаратів (БПА), активно досліджується у сучасній науковій літературі, що зумовлено зростанням потреби у використанні автономних платформ у складних, динамічних та непередбачуваних умовах. Залежно від принципів організації взаємодії між агентами, підходи до керування поділяють на централізовані, децентралізовані та гібридні.

У централізованих системах усі рішення приймаються головним контролером, що дозволяє забезпечити високу узгодженість дій та глобальну оптимізацію процесів [4]. Проте така архітектура створює критичну залежність від єдиного центру, що може призводити до втрати керованості у разі відмови комунікацій або переважання центрального вузла. У динамічних середовищах це становить суттєвий ризик для безперервності виконання місії.

Децентралізовані методи дозволяють агентам приймати рішення локально на основі власного стану та інформації від сусідів, що значно підвищує стійкість системи до відмов окремих елементів [2]. У таких підходах широко застосовуються алгоритми консенсусу, розподіленого планування та поведінкового управління (behavior-based control), які забезпечують здатність рою адаптуватися до змін середовища без втрати цілісності [3]. Однак досягнення узгодженості між великою кількістю агентів потребує значної комунікаційної пропускну здатності та обчислювальних ресурсів, що може створювати затримки та обмежувати масштабованість системи.

Гібридні архітектури поєднують централізоване стратегічне планування з децентралізованим тактичним управлінням, що дозволяє збалансувати глобальну оптимізацію та локальну адаптацію [1]. Попри це, інтеграція різних рівнів управління в гетерогенних командах БПА залишається складним завданням через різні можливості апаратів, вимоги до синхронізації та обмеження зв'язку, особливо у місіях з високим рівнем динамічності.

Суттєвого розвитку в останні роки набули методи машинного та підкріпленого навчання, які показали ефективність у задачах автономної навігації, оптимізації траєкторій і розподілу ролей у командах БПА [11]. RL-підходи дозволяють системам адаптувати поведінку на основі зворотного зв'язку, проте залишаються обчислювально дорогими, чутливими до якості навчальних даних і часто не гарантують стабільної роботи в умовах різких змін середовища.

Паралельно набирають поширення методи прецедентного аналізу (case-based reasoning), які надають можливість використовувати накопичений досвід виконання місій для прийняття рішень у схожих ситуаціях [12]. CBR-підходи відзначаються інтерпретованістю, ефективністю та нижчими вимогами до обчислювальних ресурсів при виборі рішення. Проте більшість існуючих моделей не пропонує структурованої формальної моделі для застосування такого підходу саме в гетерогенних ансамблях БПА та не розглядає питання інтеграції прецедентів з адаптивними алгоритмами, що працюють у режимі реального часу.

Таким чином, аналіз наукових джерел засвідчує, що попри значні напрацювання у сфері централізованої, децентралізованої та гібридної координації, а також у використанні машинного навчання та прецедентних методів, все ще відсутня уніфікована формальна модель, яка б поєднувала ці підходи у цілісну систему сценарно-прецедентної координації гетерогенних БПА. Це підкреслює актуальність розробки математично обґрунтованої моделі та алгоритмів, що забезпечать ефективний вибір та адаптацію сценаріїв у реальному часі.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка формальної моделі сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів та створення алгоритмів вибору й адаптації сценаріїв у динамічних умовах. Така модель має забезпечити систематизований підхід до використання накопиченого досвіду виконання місій та підвищити ефективність взаємодії між різними типами БПА у складних і невизначених середовищах. Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

1. Формалізувати структуру сценарію виконання місії, включаючи визначення початкових умов, цілей, послідовностей дій, обмежень та критеріїв успішності.
2. Розробити формальне представлення прецедентів, що охоплює контекст місії, параметри середовища, характеристик БПА та результати виконання завдань.
3. Створити модель бази прецедентів, яка забезпечує класифікацію, зберігання, індексацію та ефективний пошук релевантних записів.
4. Запропонувати метрику подібності між поточним станом середовища та прецедентами, що включає оцінку відповідності умов місії, характеристик агентів та очікуваних результатів.

5. Розробити алгоритм вибору релевантного сценарію на основі бази прецедентів із урахуванням параметрів гетерогенних апаратів і типу місії.

6. Створити адаптивний алгоритм корекції сценарію у реальному часі, що дозволяє коригувати дії БПА в умовах динамічних змін середовища з використанням механізмів підкріпленого навчання.

7. Визначити модель комунікації та розподілу завдань у гетерогенному ансамблі, яка забезпечує узгодженість дій і стійкість системи до відмов окремих елементів.

Виконання цих завдань дозволить сформувати цілісний формальний апарат сценарно-прецедентної координації та створить основу для подальших етапів моделювання та експериментального аналізу.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Формальна постановка задачі координації гетерогенних БПА

Гетерогенний ансамбль БПА визначимо як множину агентів:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

де кожен агент характеризується типом $t_i \in T$, технічними параметрами та набором доступних дій.

Множина типів БПА у даній роботі охоплює три категорії:

$$T = \{t_{micro}, t_{medium}, t_{wing}\}, \quad (2)$$

які відповідають мікроквадрокоптеру, середньому мультикоптеру та літаковому БПА.

Кожен агент описується вектором параметрів:

$$a_i = (t_i, v_i, r_i, \sigma_i), \quad (3)$$

де:

- v_i – максимальна швидкість,
- r_i – радіус дії,
- σ_i – сенсорні можливості.

Поточний стан середовища описується множиною змінних:

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_k) \quad (4)$$

що включають погодні умови, наявність перешкод, характеристику території, рівень загрози тощо.

Завдання координації полягає у знаходженні стратегії дій:

$$\Sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots), \quad (5)$$

яка дозволяє агентам виконати поставлену місію типу $M \in \{\text{розвідка, спостереження, моніторинг}\}$.

2. Формальна модель сценарію

Перед викладенням формальної моделі сценарію доцільно зазначити, що сценарій у запропонованому підході розглядається не лише як послідовність дій, а як структурований опис взаємодії гетерогенного ансамблю БПА з динамічним середовищем. Формалізація сценарію дозволяє уніфікувати процес планування місії та створює основу для подальшого накопичення та повторного використання досвіду.

Сценарій визначимо як кортеж:

$$S = (E_0, G, \Sigma, C, R), \quad (6)$$

де:

- E_0 – початковий стан середовища,
- G – ціль місії,
- Σ – план/послідовність дій,
- C – обмеження (часові, енергетичні, просторові),
- R – результат виконання.

Для місій розвідки та спостереження сценарій часто містить:

- зону сканування,
- маршрут обльоту,
- частоту фіксації даних,
- правила зміни траєкторії.

Формалізований сценарій виступає базовим елементом для опису прецедентів, у яких зафіксовано результати виконання місії за конкретних умов. Це дозволяє перейти від статичного планування до сценарно-прецедентного використання накопиченого досвіду.

3. Формальна модель прецеденту

Прецедент – це опис попередньо виконаної місії у вигляді:

$$P = (S, E_{context}, A_{sets}, R_{eval}), \quad (7)$$

де:

- S – сценарій,
- $E_{context}$ – умови, у яких він був застосований,
- A_{set} – типи та параметри задіяних БПА,
- R_{eval} – оцінка результативності.

Це дозволяє зберігати досвід і повторно використовувати його для нових сценаріїв.

4. Структура бази прецедентів

Оскільки ефективність сценарно-прецедентного підходу визначається якістю накопиченого досвіду, необхідним є формальне представлення прецедентів та механізму їх зберігання. Це забезпечує можливість автоматизованого аналізу та вибору релевантних сценаріїв.

Базу прецедентів визначимо як множину:

$$M = (P_1, P_2, \dots, P_m). \quad (8)$$

Кожен прецедент містить:

- класифікацію місії;
- опис середовища;
- типи БПА;
- використані стратегії;
- показники успішності.

Структура бази орієнтована на пошук за ключовими параметрами:

- тип місії,
- подібність середовища,
- відповідність характеристик БПА.

Наявність бази прецедентів зумовлює потребу у кількісній оцінці відповідності між поточними умовами місії та умовами, зафіксованими у прецедентах. Саме для цього вводиться метрика подібності.

5. Метрика подібності

Метрика подібності відіграє ключову роль у процесі вибору сценарію, оскільки дозволяє перейти від якісного порівняння ситуацій до формалізованої процедури прийняття рішень.

Для реалізації вибору прецеденту потрібна функція подібності:

$$d(P, E, A) = (\alpha_1 d_{env} + \alpha_2 d_{mission} + \alpha_3 d_{agents}). \quad (9)$$

Компоненти метрики:

1. Подібність середовища

$$d_{env} = \|E_{context} - E_{current}\|. \quad (10)$$

2. Подібність типу місії

$$d_{mission} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (11)$$

якщо тип місії збігається – 0, інакше – 1.

3. Подібність апаратів

$$d_{agents} = \sum_i \omega_i \|a_i^{context} - a_i^{current}\|. \quad (12)$$

Коефіцієнти $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ задають вагу кожного критерію.

Отримані значення подібності використовуються як критерій для вибору найбільш релевантного сценарію з бази прецедентів, що забезпечує адаптацію системи до поточних умов.

6. Алгоритм вибору релевантного сценарію

Алгоритм вибору сценарію реалізує практичне застосування сценарно-прецедентного підходу, поєднуючи результати оцінювання подібності з механізмом прийняття рішень.

На основі метрики подібності здійснюється пошук найближчого прецеденту:

Алгоритм гарантує, що обраний сценарій:

- відповідає умовам місії,
- враховує можливості апаратів,
- має мінімальне відхилення від оптимальних умов попередніх виконань.

Однак навіть найбільш релевантний сценарій не гарантує оптимального виконання місії в умовах динамічного середовища, що обумовлює необхідність його подальшої адаптації у реальному часі.

7. Адаптивний алгоритм корекції сценарію у реальному часі

7.1. Модель підкріпленого навчання

```

1 Input: E_current, A_current, mission_type
2 best_match = None
3 min_distance = +∞
4
5 For each P in PrecedentBase:
6     d = similarity(P, E_current, A_current)
7     If d < min_distance:
8         min_distance = d
9         best_match = P
10
11 If min_distance > threshold:
12     best_match = adapt(P)
13
14 Return best_match.Scenario

```

Рис. 1. Псевдокод алгоритму пошуку найближчого прецеденту

У межах адаптивного вибору та корекції сценарію використовується модель підкріпленого навчання, яка дозволяє системі приймати рішення на основі зворотного зв'язку. Підкріплене навчання розглядає координацію гетерогенних БПА як процес взаємодії між агентом та середовищем, де кожен агент поступово навчається обирати оптимальні дії у відповідь на зміну умов місії.

Стан системи визначається як:

$$s_t = (E_t, A_t). \quad (13)$$

Це означає, що в момент часу t агент оцінює:

- E_t – поточний стан середовища, включаючи погодні умови, наявність перешкод, рівень радіозв'язку, динаміку об'єктів тощо
- A_t – внутрішній стан апарата, такий як координати, швидкість, заряд батареї, стан сенсорів, відхилення від маршруту.

Це дозволяє агенту сприймати як глобальні, так і локальні зміни, що впливають на виконання місії.

Дія:

$$a_t \in D. \quad (14)$$

Функція винагороди:

$$r_t = f(\text{достовірність даних, швидкість виконання, енергоспоживання}), \quad (15)$$

де r_t – винагорода за крок t

Мета агента:

$$\max_{\pi} E \left[\sum_t \gamma^t r_t \right]. \quad (16)$$

Формальне визначення завдання агента:

- π (policy) – стратегія, за якою агент вибирає дії
- $E[\cdot]$ – математичне очікування (середнє значення)
- $\sum_t \gamma^t r_t$ – сумарна винагорода, де γ – коефіцієнт дисконтування, який показує важливість майбутніх винагород.

Отже, агент намагається знайти таку політику поведінки, яка забезпечить максимальну сумарну користь за всю місію.

7.2. Процедура адаптації

```

1 While mission not completed:
2     s = observe_state()
3     a = select_action(π, Scenario)
4     execute(a)
5     r = evaluate()
6     update_policy(π, s, a, r)

```

Рис. 2. Псевдокод процедури адаптації

Це дозволяє підлаштовувати траєкторію, змінювати частоту збору даних і перебудовувати розподіл ролей між агентами.

8. Модель комунікації та розподілу завдань

Оскільки ансамбль є гетерогенним, ефективність сценарно-прецедентної координації визначається не лише правильним вибором сценарію, а й здатністю агентів узгоджувати свої дії під час виконання місії. Тому необхідною складовою запропонованої моделі є формалізація комунікації між БПА та механізму розподілу завдань, які забезпечують колективну узгодженість, мінімізують дублювання дій і підвищують стійкість системи до відмов.

Використовується модель кооперації:

$$A_i \leftrightarrow A_j : \Delta E, \Delta R. \quad (17)$$

Розподіл завдань визначається за критеріями:

- енергозапас,
- відстань до об'єкта,
- якість сенсорів.

Таким чином, модель комунікації та розподілу завдань забезпечує зв'язок між стратегічним рівнем (вибір сценарію за прецедентами) та тактичним рівнем (виконання локальних дій агентами). Вона також створює інформаційну основу для оперативної корекції сценарію: за рахунок оновлення станів агентів і обміну ключовими повідомленнями система може виявляти відхилення від плану та ініціювати адаптацію рішень у реальному часі.

9. Очікувані властивості моделі

Запропонована формальна модель забезпечує:

- масштабованість – можливість додавати нові типи БПА;
- стійкість – система продовжує працювати при відмові агентів;
- гнучкість – адаптація сценаріїв у режимі реального часу;
- швидкість – скорочення часу прийняття рішень завдяки готовим прецедентам;
- універсальність – модель можна застосувати до різних типів місій.

10. Підтвердження очікуваних властивостей моделі

Підтвердження очікуваних властивостей запропонованої моделі ґрунтується на її формальній структурі та принципах проектування. Модель сценарно-прецедентної координації сформульована у вигляді набору взаємопов'язаних абстракцій – стану системи, сценарію, прецеденту, дій агентів і механізмів адаптації, що дозволяє незалежно розширювати окремі компоненти без порушення загальної логіки управління. Така декомпозиція безпосередньо забезпечує масштабованість моделі, зокрема можливість додавання нових типів безпілотних апаратів і місій.

Стійкість системи до відмов підтверджується децентралізованим характером прийняття рішень та формалізованою моделлю комунікації і розподілу завдань, яка не передбачає єдиного критичного елемента управління. Навіть у разі втрати окремих агентів або каналів зв'язку сценарій може бути скоригований, а ролі – перерозподілені між доступними апаратами.

Гнучкість моделі впливає з використання адаптивного механізму корекції сценаріїв, формалізованого в межах моделі підкріпленого навчання. Наявність зворотного зв'язку між станом середовища та діями агентів забезпечує можливість оперативної перебудови поведінки ансамблю в режимі реального часу.

Швидкість прийняття рішень обґрунтовується використанням бази прецедентів і метрики подібності, що дозволяє здійснювати вибір сценарію на основі аналогій з раніше виконаними місіями, зменшуючи потребу у повному переплануванні.

Таким чином, формальні рішення, закладені в архітектуру моделі, узгоджуються з очікуваними властивостями, сформульованими в пункті 9, і підтверджують доцільність запропонованого підходу як теоретичної основи для подальшої реалізації та експериментальної перевірки.

Висновки

У даній роботі запропоновано формальну модель сценарно-прецедентної координації гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів, орієнтовану на виконання місії розвідки, спостереження та моніторингу території. Розроблена модель надає структуроване представлення сценаріїв, прецедентів і умов їх застосування, забезпечуючи систематизований підхід до використання накопиченого досвіду для прийняття рішень у нових або динамічних ситуаціях.

Було формалізовано ключові елементи системи: структуру сценарію, модель прецеденту, механізми класифікації та пошуку релевантних записів у базі прецедентів. Запропонована метрика подібності дозволяє визначати рівень відповідності між поточним станом середовища, параметрами БПА та даними з попередніх місій. На основі цього розроблено алгоритм вибору сценарію, який мінімізує відхилення від оптимальних умов, зафіксованих у прецедентах.

Окрему увагу приділено розробці адаптивного алгоритму корекції сценарію, що працює у режимі реального часу та використовує принципи підкріпленого навчання. Це забезпечує гнучкість системи та її здатність реагувати на непередбачувані зміни середовища. Модель комунікації та розподілу ролей між агентами дозволяє ефективно

узгоджувати дії БПА різних типів, підвищуючи стійкість системи до відмов та покращуючи загальну продуктивність місії.

Запропонована формальна модель створює цілісну теоретичну основу для подальшої реалізації алгоритмічних рішень, а також для проведення експериментальної перевірки ефективності сценарно-прецедентних методів у моделюванні та реальних застосуваннях. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію розроблених алгоритмів у симуляційне середовище та проведення порівняльного аналізу з існуючими підходами до координації гетерогенних БПА.

Список використаної літератури

1. Гусев 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.
2. Артюшин Л. Аналіз перспектив реалізації групового застосування груп безпілотних літальних апаратів. *Загальні проблеми оборони і автоматизації*. 2023. № 19. С. 42–48.
3. Романюк В. А. Методологічні основи синтезу системи управління групою (роєм) безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні системи та технології*. 2025. № 2. С. 156–172.
4. Компанієць О. М., Ключніков І. М., Касаткін М. В. Моделювання синергетичного безконфліктного руху рою БПЛА метаевристичними підходами. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 3. С. 40–47.
5. Koval D. Метод технічного обґрунтування вимог до виявлення-розділення груп безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології*. 2020. № 3. С. 33–38. 6. Самойленко В. М. Обґрунтування застосування автономних безпілотних літальних апаратів, оснащених оптико-електронною системою навігації, для виконання завдань підрозділами Національної гвардії України. *Честь і Закон*. 2023. № 4. С. 83–91.
7. Guo J., Cao Y. Centralized control strategies for UAV swarm coordination: A survey. *IEEE Signal Processing Letters*. 2020. Vol. 27. P. 1345–1349.
8. Olfati-Saber, R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2006. Vol. 41. P. 483–495.
9. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*. 2013. Vol. 7. P. 1–41.
10. Yan Z., Jouandeau N., Cherif A. A survey and analysis of multi-robot coordination. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10.
11. Zhang K., Yang Z., Basar T. Multi-agent reinforcement learning: A selective overview. *arXiv*. 2021. P. 1–73 URL: <https://arxiv.org/pdf/1911.10635> (дата звернення 18.11.2025).
12. Rahman M., Sarkar N. I., Lutui R. A Survey on Multi-UAV Path Planning: Classification, Algorithms, Open Research Problems, and Future Directions. *Drones*. 2025. P. 1–32. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/4/263> (дата звернення 22.11.2025).

References

1. Husiev V. M., Sherstiuk V. H., Levkivskiy R. M., Sokol I. V. (2019) Model stsenarno-pretседentnoho keruvannya spilnym rukhom velykykh heterohennykh ansambliv bezpilotnykh aparativ [Scenario-precedent model for coordinated movement of large heterogeneous UAV ensembles]. *Problemy informatsiynykh tekhnolohii*, No. 25, pp. 4–17. [in Ukrainian].
2. Artiushyn L. (2023) Analiz perspektyv realizatsii hrupovoho zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ [Analysis of prospects for group application of unmanned aerial vehicles]. *Zahalni problemy obrony i avtomatyzatsii*, No. 19, pp. 42–48. [in Ukrainian].
3. Romaniuk V. A. (2025) Metodolohichni osnovy syntezu systemy upravlinnia hrupoiu (roiem) bezpilotnykh litalnykh aparativ [Methodological foundations of synthesizing a control system for a UAV swarm]. *Suchasni informatsiini systemy ta tekhnolohii*, No. 2, pp. 156–172. [in Ukrainian].
4. Kompaniiets O. M., Kliushnikov I. M., Kasatkin M. V. (2024) Modeliuvannya synerhetychnoho bezkonfliktnoho rukhu roiu BPLA metaevrystychnymy pidkhodamy [Modeling synergistic conflict-free UAV swarm movement using metaheuristic approaches]. *Vyprobuvannya ta sertyfikatsiia*, No. 3, pp. 40–47. [in Ukrainian].
5. Koval D. (2020) Metod tekhnichnoho obgruntuвання vymoh do vyavlennia-rozdilennia hrup bezpilotnykh litalnykh aparativ [Method for technical justification of requirements for detection and separation of UAV groups]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii*, No. 3, pp. 33–38. [in Ukrainian].
6. Samoilenko V. M. (2023) Obgruntuвання zastosuvannya avtonomnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ, osnashchenykh optyko-elektronnoiu systemoiu navihatsii, dlia vykonannya zavdan pidrozdilamy Natsionalnoi hvardii

Ukrainy [Justification of the use of autonomous UAVs equipped with an optoelectronic navigation system for National Guard missions]. Chest i Zakon, No. 4, pp. 83–91. [in Ukrainian].

7. Guo J., Cao Y. (2020) Centralized control strategies for UAV swarm coordination: A survey. IEEE Signal Processing Letters, Vol. 27, pp. 1345–1349.

8. Olfati-Saber R. (2006) Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, pp. 483–495.

9. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. (2013) Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective. Swarm Intelligence, Vol. 7, pp. 1–41.

10. Yan Z., Jouandeau N., Cherif A. A. (2013) A survey and analysis of multi-robot coordination. International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 10.

11. Zhang K., Yang Z., Basar T. (2021) Multi-agent reinforcement learning: A selective overview. arXiv preprint, pp. 1–73. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1911.10635> (Accessed: 18 November 2025).

12. Rahman M., Sarkar N. I., Lutui R. (2025) A survey on multi-UAV path planning: Classification, algorithms, open research problems, and future directions. Drones, pp. 1–32. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/4/263> (Accessed: 22 November 2025).

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026