
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 519.6:004.8: 574.08:681.78: 378.147

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.4>

НАУКОВІ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ «РОЮ» БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Бондар О.І., Артюшин Л.М., Машков О.А., Присяжний В.І., Оводенко Т.С.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

mashkov_oleg_52@ukr.net

Розглянуті наукові проблеми щодо створення та застосування штучного інтелекту з метою забезпечення ефективного застосування «рою» безпілотних апаратів екологічного моніторингу. Означено характеристику алгоритмів керування «роєм» (методи та критерії оптимізації) під час розв'язання завдань екологічного моніторингу. Першою науковою проблемою є обґрунтування структури розподіленої системи керування групою безпілотних літальних апаратів та розроблення алгоритмів координації їх взаємодії для максимальної цільової ефективності всього «рою» в автономному режимі. Друга проблема – необхідність розроблення теорії функціонування системи керування групою безпілотних літальних апаратів, що дозволяє організувати їх узгоджену дію в автономному режимі на основі теорії мультиагентних систем, а також розроблення інтегрального показника якості оцінки групових дій безпілотних літальних апаратів. Третя проблема пов'язана з можливістю застосування технологій мультиагентних систем до задачі управління «роями». Четверта проблема стосується аспектів інформаційної безпеки групових мобільних роботизованих комплексів з ройовим інтелектом. Розглянути проблеми пов'язані з розробкою та реалізацією самих алгоритмів управління «роєм» (методів і критеріїв оптимізації) для найбільш специфічних прикладних завдань в умовах екологічного моніторингу довкілля та природних ресурсів, об'єктів критичної інфраструктури. З цієї метою можуть застосовуватися наступні «роєві» алгоритми: метод «рою» частинок, алгоритм мурашок, алгоритм штучної бджолоїної колонії, штучна імунна система, алгоритм сірої вилки, алгоритм гравітаційного пошуку, алгоритм альтруїзму, алгоритм інтелектуальних крапель води, пошук стохастичної дифузії, багата оптимізація роїв. Розширення функціональних можливостей системи штучного інтелекту «рою» забезпечується з урахуванням принципів відкритості, комплексності та конкуренції в рамках концепції м'якого обчислення. Такий підхід передбачає використання теоретичних положень, які дозволяють раціонально організувати обчислювальну технологію обробки даних, а також формалізувати потік інформації в багатопроцесорному обчислювальному середовищі. На розглянутих принципах базується парадигма обробки інформації в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень, використання якої орієнтоване на нові покоління багатопроцесорних обчислювальних середовищ з урахуванням реальних даних про ситуацію в зоні застосування «рою»: принцип відкритості та комплексності, принцип конкуренції, принцип формалізації нечіткої інформації в багатопроцесорному обчислювальному середовищі, принцип комплексності, принцип нелінійної самоорганізації. Для визначення рекомендацій та перспектив подальшого розвитку штучних інтелектуальних «ройових» систем слід зазначити, що отримані результати можуть бути використані для забезпечення ефективного управління багаторойовими мобільними комплексами екологічного моніторингу (наземні, повітряні, морські). *Ключові слова:* багатопроцесорне обчислювальне середовище, екологічний моніторинг, захист довкілля та природних ресурсів, принципи управління «роєм», рій безпілотних літальних апаратів, технологія мультиагентних систем, штучний інтелект.

Scientific problems of creation and application of artificial intelligence to ensure the effective application of a swarm of unmanned devices for environmental monitoring. Bondar O., Artyushin L., Mashkov O., Prisyazhnyi V., Ovodenko T.

The work examines the scientific problems of creating and using artificial intelligence to ensure the effective operation of a swarm of unmanned environmental monitoring devices. Characteristics of the algorithms for environmental monitoring (methods and optimization criteria) are given in connection with the task of environmental monitoring. The first scientific problem is the organization of the structure of a distributed keratinization system by a group of unmanned aerial vehicles and the development of algorithms for coordinating their interaction for maximum target efficiency of the entire swarm in an autonomous mode. Another problem is the need to develop a theory of the functioning of the caravan system for a group of unmanned aerial vehicles, which allows them to organize their work in an autonomous mode based on the theory of multi-agent systems, as well as the development an integral indicator of the assessment of group activities of unmanned aircraft. The third problem is related to the possibility of stagnating the technology of multi-agent systems before the task of managing swarms. The fourth problem concerns the information security aspects of group mobile robotic systems with swarm intelligence. The problems associated with the development and implementation of the swarm control algorithms themselves (methods and optimization criteria) for the most specific applied tasks in the minds of environmental monitoring of wastewater and natural resources are considered. resources, critical infrastructure facilities. As a result, the following swarm algorithms may be involved: the particle swarm method, the goosebump algorithm, the piecemeal colony algorithm, the piecemeal immune system, the gray fork algorithm, the gravitational search algorithm, the altruism algorithm, the intelligent algorithm drops of water, the sound of stochastic diffusion, a lot of optimization of swarms. Expansion of the functional capabilities of the artificial intelligence system will be ensured by maintaining the principles of openness, complexity and competition within

the framework of the concept of soft calculation. This approach conveys a number of theoretical principles that allow one to rationally organize the computing technology of data processing, as well as formalize the flow of information in a multi-processor computing environment. The paradigm of information processing in an intelligent system is based on these principles in support of decision-making, which is oriented towards a new generation of rich-processor computing systems with the understanding of real data about the situation in the stagnant swarm zone: the principle of transparency and complexity, the principle of competition, the principle of formalization of fuzzy information in a multi-processor computing environment, principle of complexity, principle of nonlinear self-organization. For significant recommendations and prospects for the further development of piecemeal intelligent swarm systems, it is important to note that the results can be obtained as a means of ensuring effective management of a large number of mobile environmental monitoring systems (ground-based, wind, sea). *Key words:* multiprocessor computing environment, environmental monitoring, protection of the environment and natural resources, principles of swarm management, swarm of unmanned aerial vehicles, technology of multi-agent systems, artificial intelligence.

Постановка проблеми. 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 є широким спектром застосування та мають переваги під час 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 змога застосовувати різноманітну апаратуру екологічного спостереження (в оптичному, радіолокаційному, інфрачервоному діапазонах тощо). Результатом будуть більш достовірні потоки даних, що будуть сформовані після комплексції (об'єднання) різних фізичних даних спостереження. Окрім того, з'являється можливість застосування «рою» агентів БПЛА на різних висотах та швидкостях, щоб здійснювати екологічний моніторинг з різних напрямів [1]–[7]. На рис. 1 зображена мережева схема керування польотом ««роєм» БПЛА.

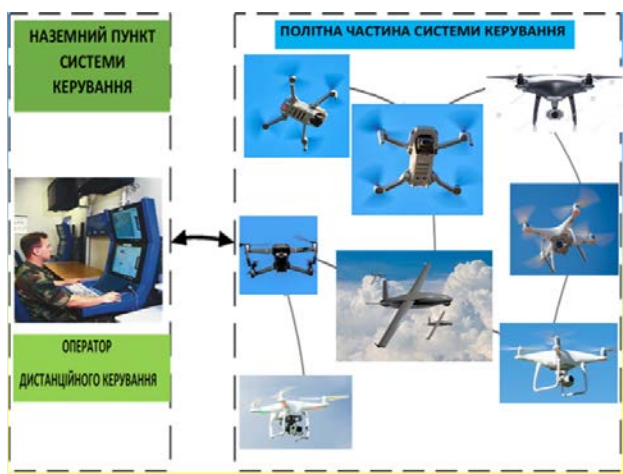


Рис. 1. Мережева схема керування польотом «роєм» БПЛА

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 спо-

стереження великомасштабних явищ та надзвичайних ситуацій таких як повені, пожежі, техногенні аварії та катастрофи [3]. При цьому такі операції як пошуково-рятувальна місія (SAR) можуть вимагати залучення кількох агентів [3].

Систему з декількома транспортними засобами можна описати як ефективну, результативну, гнучку та більш толерантну до несправностей, ніж один агент [8]. 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 [3], [7], [9].

Непередбачені події, зокрема, несприятлива 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 [4]. Тому потрібні наукові розробки, спрямовані на підвищення стійкості роїв БПЛА.

На сьогодні, 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, яким притаманна колективна поведінка 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 [5], [6], [10].

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 [3], [4], [11].

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.

У статті розглядаються проблеми управління групою («роєм») безпілотних літальних апаратів з використанням штучного інтелекту.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. 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 [4], [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми створення та застосування штучного 'ройового' інтелекту для забезпечення ефективного використання «роєм» роботизованих систем розглядалися в роботах багатьох авторів [1]–[12].

Питання формування та розпізнавання зображень у системах штучного інтелекту обговорюється в роботах [4], [5]. Генетичні та еволюційні алгоритми, інструменти нечіткого багатокритеріального прийняття рішень розглядаються в роботах [9], [10]. У роботах [7], [11], [12] наведено обґрунтування побудови експертної системи підтримки прийняття рішень в інтелектуальній системі моніторингу довкілля, а також наведено результати екологічного прогнозування та управління

екологічною безпекою запланованої діяльності з використанням управлінської інформації систем підтримки прийняття екологічних рішень. дані.

Проведений аналіз показує, що на даний час залишаються невирішеними питання наукового обґрунтування створення та застосування штучного інтелекту для забезпечення ефективного застосування «рою» безпілотних апаратів екологічного моніторингу.

Невирішена раніше частина загальної проблеми.

Пропонується підвищити ефективність керування ««роєм» безпілотних літальних апаратів шляхом впровадження в систему управління сучасних інформаційно-телекомунікаційних технологій, використання систем штучного інтелекту при отриманні, обробці, візуалізації інформації та переміщенні кожного елемента «рою». Запропонований підхід дає змогу визначити парадигму обробки інформації в інтелектуально-інформаційній системі «рою» для забезпечення ефективного використання групи безпілотних літальних апаратів екологічного моніторингу.

Мета дослідження – науково обґрунтувати застосування штучного 'ройового' інтелекту для забезпечення ефективного використання «рою» безпілотних літальних апаратів екологічного моніторингу.

Результати досліджень.

1. Алгоритми керування ««роєм» (методи та критерії оптимізації) при розв'язанні завдань екологічного моніторингу.

Необхідність вирішення наукової проблеми керування польотом зграї БПЛА зумовлена технологією створення та методикою застосування 'ройового' інтелекту для керування групами малогабаритних БПЛА екологічного моніторингу. Розробка методології 'ройового' інтелекту передбачає врахування тенденцій розвитку малих БПЛА, зокрема перехід від використання одиничних БПЛА до груп і комплексів БПЛА. Основні проблеми управління групою БПЛА екологічного моніторингу пов'язані з використанням методів 'ройового' інтелекту для вирішення практичних завдань, що підтверджується комп'ютерним моделюванням [12].

Розробка штучного 'ройового' інтелекту передбачає визначення предмета дослідження – інформаційної взаємодії елементів групи безпілотних літальних апаратів та їх уразливості до деструктивного інформаційного впливу.

Проведений аналіз показав, що інформаційна взаємодія групи безпілотних літальних апаратів потребує забезпечення їх функціональної стійкості в умовах деструктивного інформаційного впливу.

Результати проведеного аналізу свідчать, що можливо визначити та формалізувати наступні нау-

кові проблеми створення та застосування штучного інтелекту для забезпечення ефективного застосування «рою» безпілотних апаратів екологічного моніторингу.

Першою науковою проблемою є обґрунтування структури розподіленої системи керування групою безпілотних літальних апаратів та розробка алгоритмів координації їх взаємодії для максимальної цільової ефективності всього «рою» в автономному режимі. При обґрунтуванні структури системи керування групою безпілотних літальних апаратів та розробці алгоритму координації їх взаємодії запропоновано використовувати методи системного аналізу [1], [2]. Метод аналізу ієрархій та методи лінійного програмування можуть бути використані для синтезу показника ефективності скоординованих дій БПЛА, а метод імітаційного моделювання – для оцінки ефективності алгоритму для координації дій безпілотних літальних апаратів у різних ситуаціях [7].

Другою проблемою є необхідність розробки теорії функціонування системи керування групою безпілотних літальних апаратів, що дозволяє організувати їх узгоджену дію в автономному режимі на основі теорії мультиагентних систем, а також розробки інтегрального показника якості оцінки (ефективності) групових дій безпілотних літальних апаратів. Рішення даної проблеми передбачає використання розподіленої системи управління групою БПЛА з метою суттєвого підвищення ефективності групових дій БПЛА. Розподілена мережецентрична система управління групою безпілотних літальних апаратів та алгоритми її роботи можуть бути використані розробниками безпілотних літальних апаратів при проектуванні нових зразків авіаційної техніки.

Третя проблема пов'язана з можливістю застосування технологій мультиагентних систем до задачі управління «роями» БПЛА. На основі опису ключових особливостей 'ройового' контролю та локального протоколу голосування доцільне побудувати стратегію адаптивного керування в умовах невизначеності. При цьому алгоритм управління ««роєм» БПЛА формується з урахуванням досягнення консенсусу агентів.

Четверта проблема стосується інформаційної безпеки групових мобільних роботизованих комплексів з ройовим інтелектом. Доцільне враховувати методи впливу факторів завад, помилок та протидії на ройовий алгоритм. Чисельне моделювання можливих деструктивних інформаційних впливів на роботу – технічні системи «рою» вказує на зможу усунення загроз групі динамічних об'єктів – втручання в управління ««роєм» з боку порушників. Це дозволяє обґрунтувати нові вимоги щодо перспективних механізмів забезпечення інформаційної безпеки ройових систем.

Системи ройового інтелекту, як правило, складаються з багатьох агентів (елементів «рою»), які локально взаємодіють один з одним і з навколишнім середовищем. Ідеї такої взаємодії, як правило, походять від природи, а особливо від біологічних систем. У ройовій системі немає централізованої системи управління, яка б вказувала кожному з агентів, що робити. При цьому кожен агент (елемент) дотримується простих правил, а локальні і, певною мірою, випадкові взаємодії з іншими агентами призводять до виникнення розумної групової поведінки.

Варто зазначити, що точного (математично формалізованого) визначення ройового інтелекту досі не сформульовано. Однак при цьому ройовий інтелект розглядається як мультиагентна система, що має властивості самоорганізації та здатність демонструвати деяку інтелектуальну поведінку.

Ця проблема пов'язана з розробкою та реалізацією самих алгоритмів управління ««роєм» (методів і критеріїв оптимізації) для найбільш специфічних прикладних завдань в умовах екологічного моніторингу довкілля та природних ресурсів, об'єктів критичної інфраструктури. З цією метою можуть застосовуватися наступні роеві алгоритми: метод «рою» частинок, алгоритм мурашок, алгоритм штучної бджолоїної колонії, штучна імунна система, алгоритм сірої вилки, алгоритм гравітаційного пошуку, алгоритм альтруїзму, алгоритм інтелектуальних крапель води, пошук стохастичної дифузії, оптимізація роїв та ін.

1. Метод «рою» частинок (Particle Swarm Optimization) є методом чисельної оптимізації, для якого немає необхідності знати точний градієнт функції, яка оптимізується відповідно до висновків Кеннеді, Еберхарта та Шіі. Цей метод в першу чергу призначений для моделювання соціальної поведінки. У цьому випадку алгоритм пробачення було визначено придатним для успішної оптимізації. У книзі Кеннеді та Еберхарта описано багато філософських аспектів цього методу, так званого 'ройового' інтелекту. Були проведені великі дослідження методу роїв частинок у Філді [7]. Метод «рою» частинок оптимізує попередньо сформульовану функцію, де можливі рішення можуть бути вирішені за допомогою простої формули, яка дає змогу визначити найбільш ефективний спосіб розміщення частинок у рої.

2. Алгоритм мурахи – один з ефективних поліноміальних алгоритмів для знаходження наближених розв'язувань задачі комівояжера, а також подібних задач пошуку маршрутів на графах. Такий підхід пропонує бельгійський дослідник Марко Доріго. Суть підходу полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, які шукають шляхи від колонії до їжі. Алгоритм заснований на поведінці колонії мура-

шок – позначення хороших доріг великою кількістю феромонів. Робота починається з розміщення мурах у вершинах графа, потім починається рух мурах. Напрямок визначається імовірнісним методом, який враховує: ймовірність переходу на графі, довжину відповідних переходів, кількість феромонів на кожному з переходів та ефективність алгоритму.

3. Алгоритм штучної бджолоїної колонії – це ройовий алгоритм, заснований на мета-евристичному алгоритмі, представленому Карабогом у 2005 році [5]. Він імітує поведінку медоносних бджіл, що шукають корм. Алгоритм створення штучної бджолоїної колонії складається з трьох етапів: робоча бджола, бджола-наглядач і бджола-розвідник. Бджоли використовують алгоритм для пошуку рішень, вибраних на основі детермінованого відбору робочими бджолами та ймовірнісного відбору бджолами-наглядачами. Бджола-розвідниця забезпечує відмову від виснажених джерел їжі в процесі пошуку їжі. За цією аналогією рішення, які більше не потрібні для пошуку рішення, відкидаються. Далі додаються нові рішення (за аналогією з дослідженням нових регіонів та об'єктів).

4. Штучна імунна система – це адаптивна розподілена обчислювальна система, що використовує моделі, принципи, механізми та функції, описані в теоретичній імунології, які використовуються для вирішення прикладних задач [6, 8]. Незважаючи на те, що природні імунні системи ще далеко не до кінця вивчені, сьогодні існує принаймні три теорії, які пояснюють функціонування імунної системи та описують взаємодію її елементів, а саме: теорія негативного відбору, теорія клонального відбору та теорія імунної мережі. Вони стали основою для створення трьох алгоритмів функціонування штучної імунної системи.

5. Алгоритм «сірих вовків» – це метаевристичний алгоритм оптимізації, запропонований С. Мірамунічем та Дж. Р. Мірамунічем у 2014 році [7]. Цей алгоритм заснований на імітації соціальної поведінки та ієрархії вовків у природі. Алгоритм використовує чотири типи вовків: альфа, бета, дельта і омега. Альфа-вовки домінують і визначають напрямки полювання, бета-вовки підкоряються та допомагають альфа-вовкам, дельта-вовки допомагають іншим вовкам і слідує за лідерами, а омега-вовки зазвичай слідує за іншими та виконують більшу частину роботи. Ця ієрархія використовується в алгоритмі відновлення положення вовків і пошуку глобального оптимуму. У кожній ітерації алгоритму альфа-, бета- та дельта-вовки оновлюють свої позиції в просторі рішень, використовуючи власні найкращі рішення та найкращі рішення інших вовків. Вовки Омега покращують свої позиції, переслідуючи найкращих вовків. Як і інші алгоритми, алгоритм опти-

мізації сірого вовка використовує поведінку та взаємодію тварин у природі для створення ефективних методів вирішення складних завдань оптимізації робототехнічних комплексів.

6. Алгоритм гравітаційного пошуку – це алгоритм пошуку, заснований на законі всесвітнього тяжіння та поняттях взаємодії фізичних тіл. Алгоритм заснований на теорії гравітації з фізики Ньютона. В алгоритмі в якості агентів пошуку використовуються гравітаційні маси (функціональна вага). Важливою особливістю даного алгоритму є можливість пошуку найбільш ефективних рішень при розгляді різноманітних задач оптимізації нелінійних функцій.

7. Алгоритм альтруїзму. Дослідники зі Швейцарії розробили алгоритм, заснований на правилі сімейного відбору Гамільтона. Алгоритм показує, як альтруїзм особини в рої може розвиватися з часом і призводити до більш ефективної поведінки «рою» [12].

8. Алгоритм інтелектуальної краплі води – це ройовий алгоритм, заснований на алгоритмі оптимізації, який використовує методи природних річок і те, як вони знаходять майже оптимальні шляхи до місця призначення. Алгоритм знаходить оптимальні або майже оптимальні шляхи в результаті реакцій, що відбуваються між краплями води, коли вода тече руслом річки. У цьому алгоритмі кілька штучних крапель води залежать одна від одної та здатні змінювати своє оточення таким чином, щоб знаходити оптимальний шлях по шляху найменшого опору. Отже, даний алгоритм є конструктивним алгоритмом оптимізації, орієнтованим на сукупність [12].

9. Стохастичний дифузійний пошук. Цей алгоритм передбачає застосування методів Монте-Карло в роботі «рою» в реальному часі.

10. Багатоступенева оптимізація. Це новий, ще не достатньо розроблений підхід до створення та використання ройових груп для завдань екологічного моніторингу.

2. Інформаційна модель інтегрованого середовища штучно інтелектуальної роєвої системи екологічного моніторингу.

Для створення інформаційної моделі, як основи для створення технології системи штучного 'ройового' інтелекту застосовуємо наступні твердження.

Твердження 1. Формалізація знань під час обробки інформації в ройовій системі при управлінні ройовими елементами складає основу предметної області, виокремленої із загальної проблемної області теорії управління.

Твердження 2. Структурування знань у системі штучного 'ройового' інтелекту здійснюється шляхом вивчення багатьох об'єктів (зовнішнього середовища, елементів «рою», динаміки інформаційно-механічної взаємодії) та виявлення структури причинно-наслідкових зв'язків між ними.

Твердження 3. Інформаційна модель знань у системі штучного інтелекту «рою» реалізована на основі формалізованих моделей, які визначають елементи «рою» та зв'язки між ними. Така модель дає змогу за допомогою системи критеріїв оцінити відповідність динаміки поточної ситуації процесам, які існують у реальній системі.

У системі штучного інтелекту «рою» інформація обробляється в режимі реального часу в розподіленому багатопроекторному обчислювальному середовищі на основі інформаційної моделі, яка враховує наступні компоненти: C – концептуальна модель; S – система моделювання (об'єкт); $S1(M), \dots, Sm(M)$ і $D1(M), \dots, Dn(M)$ – статичні та динамічні моделі прогнозування та оперативного управління; U – компонент керування, що забезпечує перехід до статичної та динамічної моделей; L – мова моделювання, яка характеризує типові математичні схеми та структури; A – алгоритм поведінки системи; $K(N)$ і $K(I)$ – критеріальні співвідношення, що визначають локальні та глобальні системи.

Організація процесу керування в ройовій системі штучного інтелекту базується на «моделі моделей», що отримала назву «репромодель». Репромодель – це спрощений прототип алгоритмів прийняття рішень, створених у системі штучного інтелекту. Така інтерпретація дає змогу ефективно використовувати апіорну та оперативну інформацію в системі S під час її функціонування.

Перехід від моделі $S(M)$ до моделі $D(M)$ здійснюється через опис концептуальної моделі системи C . При виборі схеми моделювання поведінки ройових елементів вводиться поняття середовища W , що дозволяє використовувати інформацію прикладного характеру J про цілі управління, закони управління ройовими елементами, наявний математичний апарат для дослідження методів управління ««роєм»» і алгоритми.

Серед статичних моделей $S1(M), \dots, Sm(M)$, інтегрованих у репромодель, слід виділити ансамбль моделей, за допомогою яких інтерпретується поточна ситуація. Динамічні моделі $D1(M), \dots, Dn(M)$ забезпечують прогноз та оперативне керування поведінкою елементів «рою» в процесі їх поведінки під впливом зовнішніх збурень.

В якості динамічних ройових моделей доцільно використовувати модифіковані моделі Даффінга та Мат'є, а також системи диференціальних рівнянь, що описують поведінку елементів «рою» та динамічного об'єкта спостереження в екстремальних ситуаціях [11].

3. Принципи організації ройової інтелектуальної системи безпілотних літальних апаратів екологічного моніторингу.

Підвищення ефективності функціонування, достовірності оцінки та прогнозу досліджуваної

ситуації в ройовій інтелектуальній системі екологічного моніторингу досягається використанням принципів обробки інформації в ройовому багатопроекторному обчислювальному середовищі (рис. 2).

Розширення функціональних можливостей системи штучного інтелекту «рою» забезпечується з урахуванням принципів відкритості, комплексності та конкуренції в рамках концепції м'якого обчислення. Опишемо ці принципи, використання яких спрямоване на керування ««роєм»» БПЛА з урахуванням реальних даних про обстановку в районі застосування (планованої діяльності) [7].



Рис. 2. Принципи організації системи управління керування ««роєм»» безпілотних апаратів на основі технології інтелектуальних систем

Принцип відкритості та комплексності. Практичні застосування методів штучного інтелекту пов'язані з концепцією відкритих систем, які включають велику кількість різноманітних елементів.

Відкритість ройової системи штучного інтелекту відкриває нові можливості для керування поведінкою елементів «рою» в умовах невизначеності та неповноти вихідної інформації. Як один із напрямків вирішення таких завдань доцільно використовувати еволюційно-когнітивний контроль у вигляді набору правил.

Теоретична основа для створення інтелектуальних ройових систем формується на основі ефективного поєднання накопиченої системи знань з новими підходами та парадигмами штучного інтелекту. Серед них важлива роль належить методам і моделям, які забезпечують формалізацію та інтеграцію знань, механізм логічного висновку, пошук рішень і видачу практичних рекомендацій. Поряд із традиційними методами «інженерії знань» тут використовується поняття «soft computing» [11], [12].

Підвищення ефективності управління ««роєм»» досягається за рахунок впровадження методів і засобів системної технології штучного інтелекту при управлінні елементами «рою» в складних, особливо нестандартних (нестандартних і екстремальних) ситуаціях.

Принцип змагальності.

Реалізація принципу змагальності дозволяє забезпечити раціональну організацію штучно інтелектуальної ройової системи в задачі практичного застосування «рою», а також формалізувати потік інформації між елементами «рою» та зовнішніми точками обробки інформації в багатопроцесорне обчислювальне середовище «рою» [9], [12]. Принцип змагальності під час виборі обчислювальної техніки передбачає порівняльний аналіз результатів оцінки ситуації за допомогою традиційних алгоритмів та нейромережових моделей. Використовувані процедури паралельної обробки інформації під час реалізації цього принципу передбачають виконання процедур отримання інформації, логічного висновку, формування практичних рекомендацій щодо дій та руху.

Принцип формалізації нечіткої інформації в багатопроцесорному обчислювальному середовищі «рою» дозволяє обмінюватися нечіткою інформацією в умовах динаміки «рою» та постійно мінливого зовнішнього середовища. Використання цього принципу в ройовій системі зі штучним інтелектом дає наступні переваги:

- відкриває перспективи реалізації штучної інтелектуальної ройової системи в умовах обробки систем нечітких знань;

- забезпечує функціонування штучно інтелектуальної ройової системи в режимі реального часу та знижує витрати на розробку апаратного забезпечення ройової системи;

- усуває складність розв'язування задач під час розпаралелювання обчислювального процесу зі значною нерегулярністю обчислень, характерною для задач керування ройовими елементами.

Принцип комплексності. Управління ««роєм»», як складною системою, передбачає інтерпретацію динамічних ситуацій, моделювання з урахуванням вимог не тільки до адекватності, але й до складності самої моделі. Розв'язання такої проблеми передбачає розробку методів та алгоритмів, що забезпечують пошук оптимальних моделей. На основі принципу комплексності створено загальну теорію складності систем, яка потребує конкретизації її положень щодо задач моделювання поведінки окремих елементів «рою». При цьому складність моделі розглядається як показник, що відображає реалізацію обчислювальної техніки та забезпечує досягнення мети на заданому рівні управління якістю та інтерпретацією отриманих даних [8].

Принцип нелінійної самоорганізації. Функціонування системи штучного інтелекту «рою»

передбачає моніторинг ситуації та прогнозування розвитку подій в умовах безперервних змін динаміки ройових елементів та зовнішнього середовища. З метою оптимізації ефективного управління використовуються адаптивні алгоритми, що здатні змінювати структуру інформації під час зміни поведінки елементів «рою». За синтезу таких алгоритмів використовуються різні підходи – детермінований підхід, стохастичний підхід і підхід на основі принципів самоорганізації. Перші два підходи припускають наявність вихідних даних повної інформаційної бази, тобто всіх визначальних параметрів і факторів, які необхідно враховувати при управлінні ««роєм»».

Реалізація принципу нелінійної самоорганізації під час управління ««роєм»» потребує мінімальної кількості апріорної інформації. Методологічною основою цього принципу є припущення, що вся інформація про структуру і поведінку «рою» та його елементів міститься в даних вимірювань і критеріальних співвідношеннях, які визначають вибір структури «рою».

Принцип нелінійної самоорганізації найбільш ефективний у задачах контролю та прогнозування екстремальних (нештатних, аварійних, катастрофічних) ситуацій, пов'язаних із раптовими (стрибоподібними) змінами задачі екологічного моніторингу. Штучна інтелектуальна ройова система на основі прогнозованих даних виробляє дієві рекомендації таким чином, щоб уникнути цієї небезпеки. Перевірка правильності алгоритмів управління ««роєм»» та прийняття управлінських рішень щодо розподілу завдань між елементами «рою» здійснюється формально на основі загальних вимог до алгоритмічного забезпечення системи штучного інтелекту.

Висновки. У праці означені наукові проблеми щодо створення та застосування штучного 'ройового' інтелекту для забезпечення ефективного використання роя безпілотних літальних апаратів. Алгоритми управління ««роєм»» (методи та критерії оптимізації) формалізовані під час розв'язання конкретних прикладних задач використання «рою» рухомих об'єктів: метод «рою» частинок, алгоритм мурахи, алгоритм бджоли, штучна імунна система, алгоритм сірого вовка, алгоритм пошуку гравітації, алгоритм альтруїзму, інтелектуальний алгоритм. краплинний алгоритм води, стохастичний дифузійний пошук, багато-роєва оптимізація. Запропоновано парадигму обробки інформації в ройовій системі штучного інтелекту для забезпечення керування ««роєм»» безпілотних літальних апаратів. Підвищення достовірності оцінки та прогнозу ситуацій під час управлінні 'роями' на основі систем штучного інтелекту досягається за допомогою нового підходу до обробки інформації на основі розвитку концепції «м'яких обчислень». Такий підхід передбачає використання теоретичних положень, які дозволяють раціонально організувати

обчислювальну технологію обробки даних, а також формалізувати потік інформації в багатопроекторному обчислювальному середовищі. На розглянутих принципах базується парадигма обробки інформації в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень, використання якої орієнтоване на нові покоління багатопроекторних обчислювальних середовищ з урахуванням реальних даних про ситуацію в зоні застосування «рою»: принцип відкритості та комплексності, принцип конкуренції, принцип фор-

малізації нечіткої інформації в багатопроекторному обчислювальному середовищі, принцип комплексності, принцип нелінійної самоорганізації.

Для означення рекомендацій та перспектив подальшого розвитку штучних інтелектуальних ройових систем слід зазначити, що отримані результати можуть використовуватися з метою забезпечення ефективного управління багаторойовими мобільними комплексами екологічного моніторингу (наземні, повітряні, морські).

Література

1. Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І., Оводенко Т.С., Печений В.Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень у галузі екологічної безпеки. Екологічні науки: науково-практичний журнал. Київ ДЕА, -Випуск 4(49), 2023, с.144-152.
2. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у галузі екологічної безпеки. Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І., Оводенко Т.С., Печений В.Л. / Екологічні науки: науково-практичний журнал. Київ, ДЕА, -Випуск 3(48), 2023, с.7-16.
3. Машков О.А., Іващенко Т.Г., Мухіна К.Є., Печений В.Л. Інтеграція аерокосмічних технологій в систему управління екологічною безпекою: оцінка ефективності застосування системи підтримки прийняття управлінських інформаційних екологічних рішень. Екологічна безпека та технології захисту довкілля: науковий журнал, №4, 2023, с. 20-27.
4. Aboul E. H. Swarm Intelligence: Principles, Advances, and Applications. Aboul Ella Hassanien, Eid Emary. – CRC Press, 2016. 210 p.
5. Alyoubi B.A. Decision support system and knowledge-based strategic management. ELSEVIER. 2015. № 65 C. 278-284.
6. Khodashahri N.G, Sarabi M.H. Decision support system (DSS). Singaporean journal of business economics and management studies. 2013. № 6. C. 94-102.
7. Mashkov O.A., Abidov S.T., Ivashchenko T.G., Ovodenko T.S., Pechenyi V.L. Peculiarities of ecological forecasting with the help of artificial intelligent management decision support systems/ Ecological sciences: scientific and practical journal. K.: DEA, Issue 1(46), 2023, No. 5(44), p. 168-174.
8. Mashkov V.A., Mashkov O.A.. Interpretation of diagnosis problem of system level self-diagnosis. Mathematical Modeling and Computing, 2(1), pp. 71-76, 2015.
9. 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, №. 1/2. P. 71-79.
10. Tripathi K.P. Decision support system is a tool for making better decisions in the organization. Indian Journal of Computer Science and Engineering. 2017. № 21. C. 112-117.
11. Xin-She Yang Nature-Inspired Optimization Algorithms. Yang Xin-She. – London: Elsevier, 2014. 265 p.
12. Synopsis of the lecture “Linear models: statistical view” [Course “Training on Marked Data”]. URL: <https://www.coursera.org/learn/supervised-learning/supplement/Dw3Ws/konspiet> (date of application 01.03.2017) – Name from the screen.