

М. Ю. Войтех¹
О. П. Кравченко¹

КОНЦЕПЦІЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ

¹Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Запропоновано комплексний аналіз сучасних багатоагентних систем моніторингу, зосереджуючи увагу на їхніх архітектурних рішеннях, алгоритмах керування та ключових функціональних можливостях. Багатоагентні системи, що складаються з автономних агентів, які взаємодіють один з одним та з навколишнім середовищем для досягнення індивідуальних або колективних цілей, стали перспективною парадигмою для моніторингу складних та розподілених середовищ. Ці системи пропонують децентралізований та кооперативний підхід до збору, обробки та ухвалення рішень даних, завдяки чому вони є високоадаптивними та ефективними для динамічних застосувань.

У дослідженні розглянуто останні досягнення в багатоагентних системах, зокрема в протоколах зв'язку, координації агентів та інтеграції методів машинного навчання. Механізми координації, такі як алгоритми консенсусу та ройовий інтелект, сприяють синхронізованим операціям між розподіленими агентами, підвищуючи надійність та масштабованість системи. Впровадження машинного навчання дозволяє агентам динамічно адаптувати свою поведінку, оптимізуючи стратегії моніторингу в непередбачуваних умовах.

Критичним аспектом дослідження є вивчення проблем, що перешкоджають ефективному розгортанню багатоагентних систем. Енергоефективність залишається значною проблемою, особливо для мобільних агентів, таких як безпілотні літальні апарати, що вимагає інноваційних рішень, таких як гібридні системи живлення та оптимізовані алгоритми маршрутизації. Проблеми масштабованості виникають зі збільшенням кількості агентів, що вимагає надійних комунікаційних структур та децентралізованих протоколів прийняття рішень. До того ж, забезпечення якості даних та стійкості системи в динамічних середовищах створює постійні виклики, вимагаючи використання передових механізмів перевірки та відмовостійких архітектур.

Висвітлено різноманітні застосування багатоагентних систем у різних сферах, зокрема моніторинг навколишнього середовища, управління дорожнім рухом, промислову автоматизацію та охорону здоров'я. В інтелектуальних транспортних системах алгоритми на основі роя дозволяють адаптивне керування дорожнім рухом, зменшуючи затори та підвищуючи ефективність. Промислові застосування використовують багатоагентні системи для моніторингу обладнання та виявлення відмов, підвищуючи безпеку та продуктивність експлуатації.

Майбутні напрямки досліджень підкреслюють необхідність повністю децентралізованих комунікаційних протоколів, вдосконалених розподілених алгоритмів прийняття рішень та методів оптимізації енергії для мобільних агентів. Стандартизація протоколів сумісності та розробка безпечних, заснованих на довірі систем обробки даних також визначені як критично важливі для ширшого впровадження.

Отже, багатоагентні системи є трансформаційним підходом до моніторингу, пропонуючи масштабованість, адаптивність та стійкість. Усуваючи наявні обмеження та використовуючи новітні технології, багатоагентні системи можуть розкрити свій повний потенціал як незамінні інструменти для управління складними реальними середовищами з мінімальним втручанням людини.

Ключові слова: мультиагентна система; мобільний агент; моніторинг; алгоритми управління; енергоефективність; IoT; БПЛА.

Вступ

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА, дронів) для екологічного моніторингу, який включає моніторинг навколишнього середовища та охорону природи, є перспективною сучасною технологією [1]. Ці літальні апарати, оснащені камерами високої роздільної здатності та

відповідними сенсорами, мають величезний потенціал для широкої сфери застосувань, зокрема моніторинг популяцій диких тварин [2], відстеження змін в екосистемах [3] та виявлення екологічних загроз [4]. Використовуючи можливості БПЛА у цих сферах, можна значно підвищити точність та надійність даних, які отримуються під час моніторингу, виявити суттєві чинники, що кардинально впливають на загальні параметри екологічної безпеки. Інформація, яка отримується при цьому, дає змогу розробляти та впроваджувати ефективні стратегії, щодо охорони довкілля, забезпечуючи його довготривале збереження та надійний захист [5]. Варто також зазначити, що саме дрони можуть ефективно здійснювати детальне геоморфологічне картографування та моніторинг рослинності на великих ділянках місцевості.

Швидке зростання інтересу до БПЛА та їх широке застосування завдяки універсальності та ефективності цих пристроїв, породжують потребу у систематичному та досконалому вивченні теоретичних та практичних питань, пов'язаних з ними. Саме з цієї причини дослідницька область таких задач набуває міждисциплінарного характеру, тобто потребує використання знань з різних дисциплін, зокрема аерокосмічну інженерію, комп'ютерні науки, робототехніку та дистанційний моніторинг. Взаємодія між цими дисциплінами зумовлює виникнення ефективних стратегій і є критично важливою для розвитку технологій, що стосуються насамперед практичного застосування БПЛА [6].

Важливою концепцією для ефективного функціонування БПЛА та розв'язання практичних задач на їхній основі є концепція мультиагентної системи (МАС). Мультиагентні системи, що застосовуються в екологічному моніторингу, базуються на взаємодії автономних агентів, які можна поділити на два основні типи: стаціонарні та мобільні (рис. 1).

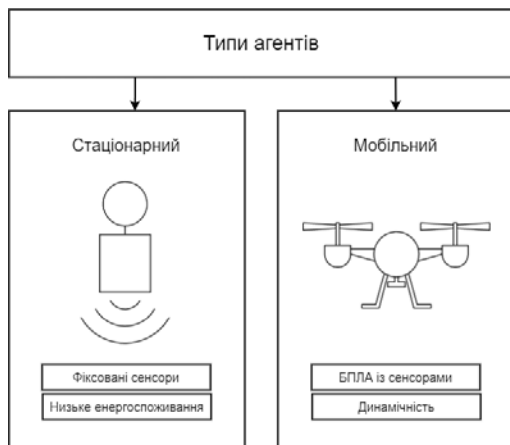


Рис. 1. Типи агентів у МАС

Стаціонарні агенти характеризуються визначеним розташуванням, простотою конструкції та включають в себе базові модулі збору (передачі) даних. Їхня перевага полягає у стабільності функціонування та низьких витратах на експлуатацію, проте вони обмежені фіксованим розташуванням, що значно знижує їхню адаптивність. Мобільні агенти є складнішими системами, оскільки, крім базових функцій, вони містять модуль переміщення, який дозволяє їм змінювати своє положення в просторі. Поєднання стаціонарних та мобільних агентів призводить до формування МАС, де стаціонарні агенти забезпечують базове покриття та енерго-ефективність, а мобільні — динамічність та можливість адаптації. МАС демонструє високу відмовостійкість та забезпечує ефективне виконання складних завдань за рахунок

оптимального розподілу функцій між агентами [7],

Концепція МАС бере свій початок у теоретичних розробках комп'ютерних наук та їх практичній реалізації в інформаційних технологіях. В основі МАС лежить сукупність автономних агентів, які взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем, керуючись принципом «стимул-реакція». Агенти можуть проявляти проактивну поведінку, тобто ініціювати дії для досягнення власних цілей (наприклад, виконання завдань), або реактивну, тобто відповідати на зовнішні подразники, отримані через сенсори та актуатори. Кожен агент функціонує як незалежний модуль, здатний спостерігати, обробляти дані та приймати рішення, що забезпечує гнучкість і адаптивність усієї системи.

Кожен агент у МАС здатний виконувати визначені функції, а саме:

1) спостерігати за середовищем; 2) обробляти отримані дані; 3) ухвалювати рішення на основі власних цілей, що забезпечує автономність його дій без прямого зовнішнього керування [8].

Керівним принципом для агентів є раціональність, яка ґрунтується на виборі дій, що максимізують ефективність. Основне завдання агента полягає в досягненні локальних цілей відповідно до призначених функцій і доступної інформації. Незважаючи на орієнтацію кожного окремого агента в напрямку виконання індивідуальних цілей, їх сукупні дії впливають на продуктивність усієї системи. Середовище, в якому діють агенти, може змінюватися внаслідок їхньої діяльності. Для збору інформації використовуються сенсори, методи прогнозування та обчислювальні засоби. Для належної роботи системи необхідні відповідні алгоритми управління, які забезпечують ефективну координацію через канали зв'язку та обмін даними.

МАС за характеристичним критерієм поділяються на гомогенні МАС, де агенти характеризуються наявністю однакових можливостей, та гетерогенні МАС, де агенти мають різні, і водночас, взаємодоповнювальні характеристики. Успішна взаємодія між агентами необхідна для реалізації таких складних процесів, як вирішення конфліктів, кооперації, організації, колективного навчання, планування, управління та оптимізації [9].

МАС стали перспективною парадигмою для моніторингу складних та розподілених середовищ, пропонуючи децентралізований та кооперативний підхід до збору, обробки даних та прийняття відповідних рішень [10]. Ці системи, що характеризуються взаємодією автономних агентів для досягнення спільної мети, знаходять застосування в різних галузях, наприклад, в робототехніці, для управління трафіком, спостереженні та, як вже зазначалося вище, в екологічному моніторингу [8], [11].

Завдяки властивостям МАС, таких як ефективність, економічність, адаптивність і надійність, вони придатні для вирішення складних завдань з розбиттям задач на менші підзадачі, кожна з яких доручається окремому агенту. Тому агенти в цих системах здатні виконувати комплексні задачі, наприклад, сприймати навколишнє середовище, обробляти інформацію, приймати обґрунтовані рішення відповідно до своїх цілей та діяти автономно без зовнішнього контролю. Функція безперервного моніторингу відіграє вирішальну роль у забезпеченні досягнення поставлених цілей. Вона має ключове значення в таких сферах, як промислове виробництво, екологічний нагляд та охорона здоров'я. Варто особливо зазначити, що розробка та координація МАС залишаються складними завданнями через високий рівень організаційної складності, проте інтеграція таких систем полегшується завдяки розвитку Інтернету речей, штучного інтелекту, машинного навчання та мережних технологій. Агенти спільно розв'язують задачі й забезпечують гнучкість завдяки здатності навчатися та приймати автономні рішення. Ефективна координація є передумовою узгодженої роботи та досягнення колективних цілей [8], [12].

Ефективне застосування МАС для виконання задач екологічного моніторингу стикається з низкою викликів, серед яких необхідно особливо виокремити обмеження потужності та необхідність подовження часу роботи від батареї. Також виникає проблема, яка пов'язана зі зростанням кількості функціональних агентів, що призводить до ускладнення системи. Вирішення проблеми подолання обмежень швидкості переміщень мобільних агентів (БПЛА) може бути здійснено відповідними дозволами регуляторних органів для роботи БПЛА на більших висотах, що, в свою чергу, надасть агентам перевагу під час збору даних та здійсненні моніторингу [13].

До того ж забезпечення безперебійної комунікації та координації між агентами, особливо в динамічних та непередбачуваних середовищах, залишається стійким викликом, що потребує розроблення складних протоколів зв'язку та механізмів координації.

Розвиток і впровадження розподілених схем управління зумовили потребу в збільшенні потужностей обчислювальних можливостей за рахунок використання децентралізованих алгоритмів прийняття рішень за рахунок реалізації децентралізованого шару комунікації між агентами в системі [14], [15]. Забезпечення якості даних також має вирішальне значення для гарантування надійності функціонування МАС моніторингу, що вимагає ефективних механізмів валідації даних, виявлення помилок та кількісного оцінювання невизначеності [16]. Більше того, складність динамічних середовищ, де агентам потрібно адаптуватися до непередбачуваних подій, умов та цілей, які безперервно змінюються, створює суттєві виклики щодо оптимального використання МАС. Необхідність вирішення проблем обчислювальної складності, пов'язаної з координацією та управлінням агентами в великомасштабних МАС залишається важливою задачею, яка потребує розробки ефективних алгоритмів та масштабованих архітектур.

Метою цієї статті є висвітлення елементів концепції МАС для потреб екологічного моніторингу, зокрема архітектурних рішень, процесів управління та ключових функціональних можливостей за рахунок використання розширених протоколів, алгоритмів консенсусу та інтеграції машинного навчання.

Основним завданням дослідження є:

1. Систематизація підходів до проектування МАС, з акцентом на їхню структуру та механізми взаємодії.
2. Визначення ключових аспектів функціонування МАС, зокрема таких як енергоефективність, масштабування та забезпечення якості даних, з описом підходів для їх оптимальної реалізації.
3. Оцінка факторів ефективного функціонування МАС на основі інтеграції стаціонарних та мобільних агентів, управління їх трафіком та забезпечення надійної роботи системи.

Аналіз останніх досліджень

Останні досягнення в МАС зосереджені на покращенні функціональних можливостей у таких аспектах, як комунікація, координація та прийняття рішень. Ці вдосконалення мають вирішальне значення для ефективного моніторингу в динамічних та непередбачуваних середовищах, підвищуючи надійність і адаптивність систем.

Ключовими напрямками розвитку досліджень в МАС є [8]:

1. Впровадження передових протоколів, які забезпечують надійний обмін інформацією між агентами, дозволяючи системі оперативно реагувати на зміни в середовищі.

2. Інтеграція методів машинного навчання для адаптації поведінки агентів до змінних умов, що є особливо цінним в динамічних середовищах, де відбувається постійне коригування стратегій моніторингу.

3. Обробка даних та оцінка стану системи на основі інформації, що отримується з фізичного шару та шару синхронізації для визначення поточного стану агентів та середовища. Оцінка базується на математичних моделях і непрямих вимірюваннях, що дозволяє виявляти відхилення або помилки в роботі системи.

4. Розробка алгоритмів консенсусу, які можуть забезпечити досягнення згоди між агентами шляхом постійного обміну даними між ними, що дозволяє організовувати спільну роботу, узгоджувати дії та синхронізувати завдання

5. Покращення механізмів управління, направлених на регулювання поведінки агентів, використовуючи порівняльні, гістерезисні та ПІД-регулятори, вибір яких обумовлюється простотою реалізації, а ефективність — здатністю отримувати інформацію про агентів та формувати оцінки станів системи.

Варто зазначити, що, використання таких інноваційних підходів значно підвищує ефективність функціонування МАС в рамках екологічного моніторингу, завдяки чому вони є адаптивнішими та стійкішими до змін навколишнього середовища, де перебувають як стаціонарні, так і мобільні агенти.

Моніторинг є безперервною функцією, яка дозволяє оцінити стан та прогрес системи і навколишнього середовища для забезпечення досягнення поставлених цілей. Проектування таких систем залишається складним завданням, що стимулює розвиток пов'язаних з ними технологіями, зокрема Інтернету речей, штучного інтелекту, машинного навчання та індустрії 4.0 [8].

Сучасні екологічні виклики вимагають ефективного, постійного та масштабованого моніторингу. Інтеграція бездротових сенсорних мереж, БПЛА та краудсенсингу, яка посилена технологіями збору та обробки даних, відкривають нову еру в області екологічного моніторингу [17]. Проте варто зауважити, що використання персональних пристроїв, що використовуються для моніторингу, обумовлене певними труднощами, зокрема обмеженим залученням цих пристроїв та проблемами конфіденційності у разі їх використання, що вимагає створення мотиваційних та безпечних механізмів участі [18]. Використання МАС відкриває нові можливості, які дозволяють реалізовувати масштабований, автономний та високоточний моніторинг навколишнього середовища, усуваючи багато обмежень традиційних підходів. Агенти здатні сприймати інформацію, приймати рішення на основі цілей, проявляти проактивну та реактивну поведінку, які є, як відомо, ключовими компонентами соціальної поведінки, тобто МАС у разі реалізації всіх її можливостей, поступово перетворюється в свого роду соціальну систему. Це також сприяє оперативнішому реагуванню на екологічні події, прогнозуванню та прийняттю рішень в режимі реального часу.

МАС характеризуються високим потенціалом у кардинальній трансформації екологічного моніторингу, з можливістю інтеграції багатьох джерел даних за допомогою розподілених сенсорних мереж з використанням комерційних технологій з використанням безперервного екологічного нагляду та взаємодії з зовнішніми метеостанціями, що забезпечує основу для ефективного екологічного менеджменту, поєднуючи реальний моніторинг, аналіз та адаптивність. [18], [19]. Модульність та здатність розподіленого розміщення МАС дозволяє легко інтегрувати їх з наявними системами, знижуючи витрати та підвищуючи масштабованість і гнучкість екологічного менеджменту [21], [21]. МАС також демонструють високу стійкість до збоїв завдяки здатності груп агентів до самовідновлення, адаптації та перерозподілу завдань, що, в свою чергу, сприяє зниженню витрат та підвищенню ефективності екологічного моніторингу. Координація елементів в системі забезпечує підвищений рівень узгодженості, що особливо важливо для виконання завдань у складних та непередбачуваних умовах [22], [23].

Виклад основного матеріалу

Сучасні МАС, що використовуються в задачах екологічного моніторингу, базуються на п'ятишаровій архітектурі (рис. 2), яка забезпечує ефективний збір, обробку та аналіз даних у розподілених середовищах:

1. Фізичний шар відповідає за збір даних через сенсори та первинну обробку сигналів [18], [21].

2. Шар синхронізації координує взаємодію агентів, оптимізує часові параметри та комунікаційні потоки [8].

3. Мережевий контролер виконує маршрутизацію, управління навантаженням та розподіл ресурсів [15].

4. Оціночний шар аналізує стан системи, приймає рішення щодо стратегій реагування, зокрема за допомогою алгоритмів машинного навчання [8], [12].

5. Шар відмовостійкості виявляє аномалії, забезпечує резервування та відновлення роботи МАС після збоїв [8], [21].

П'ятишарова структура дозволяє системі адаптуватися до динамічних умов (це можуть бути, наприклад, зміни в навколишньому середовищі або відмови окремих агентів) завдяки надмірності компонентів та гнучким механізмам перерозподілу завдань [22]. Прикладом застосування МАС в екологічному моніторингу є реалізація такої архітектури через комбінацію статичних сенсорних мереж та мобільних БПЛА для забезпечення надійного покриття великих площ території, на якій виконується відповідний моніторинг [18].

Ефективність МАС значною мірою залежить від алгоритмів взаємодії розподілених агентів (рис. 3), які забезпечують їхню узгоджену роботу. Основні підходи включають:

1. Алгоритми консенсусу, які дозволяють агентам досягати узгоджених рішень шляхом постійного обміну даними та ітеративного оновлення станів, зокрема у системах моніторингу повітря для синхронізації даних від різних сенсорних вузлів [8], [9], [20].

2. Роеві алгоритми, що запозичують принципи колективної поведінки з природи (пташині зграї, мурашники) для динамічного розподілу завдань при управлінні трафіком мобільних агентів адаптивно змінювати вектори переміщень на основі аналізу сукупності потоків [8].

3. Теорія ігор, яка використовується для вирішення конфліктів між агентами з різними завданнями [9], [18].

Що стосується потреб сучасного екологічного моніторингу, концепція МАС може бути використана для: а) моніторингу якості повітря, де мобільні агенти поєднуються з сенсорами при зборі даних, що стосуються параметрів оточуючого середовища у промислових зонах та міських ділянках; б) виявлення осередків загоряння лісових пожеж шляхом координації маршрутів польоту дронів у реальному часі; в) контролю за станом водних ресурсів; г) моніторингу біорізноманіття з використанням масиву дронів для обліку популяцій тварин і змін у рослинності; д) геоморфологічного картографування та виявлення ерозійних процесів та зміни ландшафту.

Ключовими перевагами цих алгоритмів є відсутність єдиної точки відмови, можливість швидко реагувати на зміни середовища, здатність функціонувати при збільшенні кількості агентів [8], [15]. Прикладом такої реалізації алгоритмів для взаємодії та координації агентів між собою є застосування МАС для моніторингу лісових пожеж, де алгоритми консенсусу дозволяють БПЛА координувати маршрути обльоту, мінімізуючи дублювання зусиль [18]. Проте варто зауважити, що недо-

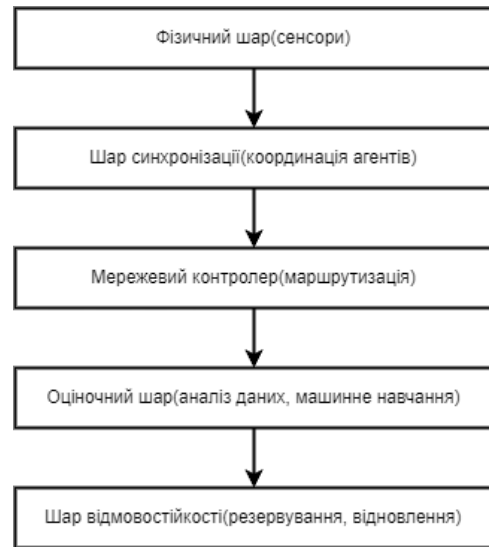


Рис. 2. Схема п'ятишарової архітектури МАС

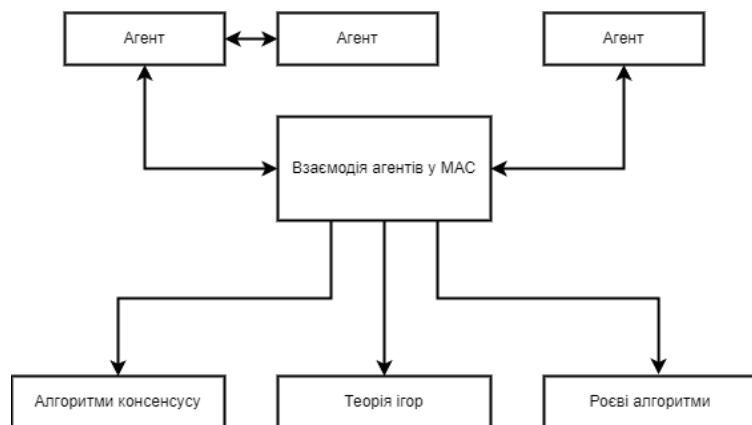


Рис. 3. Схема взаємодії агентів

ліком в такій взаємодії є затримки у зв'язку при великій кількості агентів [15], енергетичні витрати на комунікацію [13], необхідність створення балансу між локальними та глобальними цілями [9].

В МАС, що використовуються для задач екологічного моніторингу спостерігається тенденція до більшого використання методів машинного навчання для підвищення ефективності моніторингу та ухвалення рішень. Основні напрямки такої інтеграції включають в себе:

1. Прогнозування та аналіз тенденцій за рахунок використання алгоритмів часових рядів, наприклад, LSTM-мережі для прогнозування параметрів середовища [8].
2. Забезпечення адаптивної поведінки агентів завдяки навчанню з підкріпленням (Reinforcement Learning), що дозволяє агентам оптимізувати стратегії у реальному часі [12]. Прикладом такої реалізації адаптація маршрутів патрулювання дронів моніторингу на основі історичних даних [18].
3. Використання алгоритмів обробки природної мови (NLP-алгоритмів) для аналізу текстових повідомлень від людей для виявлення екологічних інцидентів з метою інтеграції так званих «людських сенсорів» в систему моніторингу [18].

Зауважимо, що серйозними технічними викликами є обмежені обчислювальні ресурси на периферійних пристроях [15], необхідність розподілених архітектур навчання (Federated Learning) [8] та проблеми з інтерпретацією складних моделей [12]. Яскравим прикладом роботи щодо впровадження машинного навчання є гібридна система моніторингу якості води, яка поєднує дані стаціонарних сенсорів з прогнозуючими моделями для раннього виявлення забруднень [20].

Також однією з найважливіших проблем використання МАС для задач моніторингу є оптимізація енергоспоживання, особливо це стосується мобільних агентів (БПЛА). Сьогодні, для вирішення цієї проблеми, застосовуються підходи, що включають в себе оптимізацію маршрутів (завдань), гібридні системи живлення та адаптивні стратегії моніторингу.

Для оптимізації маршрутів та завдань застосовуються генетичні алгоритми для планування ефективних траєкторій руху та диференційний підхід до призначення завдань на основі рівня заряду батарей агентів. Прикладом такої реалізації є застосування роїв БПЛА, що змінюють маршрути патрулювання для мінімізації споживання енергії. Гібридні системи живлення передбачають поєднання акумуляторів з сонячними панелями для подовження автономності роботи та використання енергоефективних протоколів зв'язку (наприклад, LoRaWAN) [13], [17], [18]. Серед адаптивних стратегій моніторингу виокремленим є динамічне регулювання частоти збору даних залежно від значущості подій та ієрархічна обробка даних (периферійні обчислення) для зменшення обсягів переданої інформації [8], [15].

Проте зауважимо, що використання цих підходів породжують інші виклики, зокрема можна виокремити: 1) компроміс між енергоефективністю та якістю моніторингу, 2) необхідність індивідуального підходу для різних типів агентів, 3) обмеження, пов'язані з вагою та габаритами джерел живлення. Покращити енергоефективність в МАС можна шляхом збору енергії з навколишнього середовища, розвитком та впровадженням нових матеріалів для акумуляторів та вдосконаленням алгоритмів прогнозування енергоспоживання [8], [13], [17], [18].

Не менш важливим аспектом сучасних МАС в контексті моніторингу є здатність підтримувати функціонування в умовах збоїв та несправностей. Для розв'язання цих задач пропонується використовувати децентралізовану архітектуру, яка дозволяє виключити єдину точку відмови. Також для покращення надійності роботи МАС застосовується дублювання агентів як стаціонарних, так і мобільних [15]. Для забезпечення безперебійного функціонування системи використовуються адаптивні механізми відновлення, що дозволяють автоматично перерозподілити завдання при виході агентів з ладу, динамічне планування маршрутів для мобільних агентів у разі виявлення збоїв та використання алгоритмів самодіагностики для передбачення можливості виведення з ладу конкретного агента [8], [12], [18]. Для передбачення виведення з ладу компонентів системи доцільно застосовувати протоколи виявлення аномалій, а саме: 1) аналіз ключових показників життєвості системи (health monitoring); 2) використання нейронних мереж для передбачення потенційних збоїв; 3) системи тривожного сповіщення в реальному часі [8], [15], [20].

Також потрібно зауважити, що крім застосування МАС в екологічному моніторингу, вони знаходять все більше практичного використання для виконання інших комплексних задач, демонструючи свою високу ефективність, зокрема для:

1. Реалізації інтелектуальних транспортних систем, де здійснюється адаптивне управління дорожнім рухом на основі даних від розподілених агентів, оптимізація маршрутів громадського транспорту з урахуванням пасажиропотоку та моніторинг стану дорожнього покриття [8], [11];
2. Промислового моніторингу, де відбувається віддалений контроль стану обладнання на виро-

бництвах, системи виявлення аварійних ситуацій на нафтогазових об'єктах [10], [21];

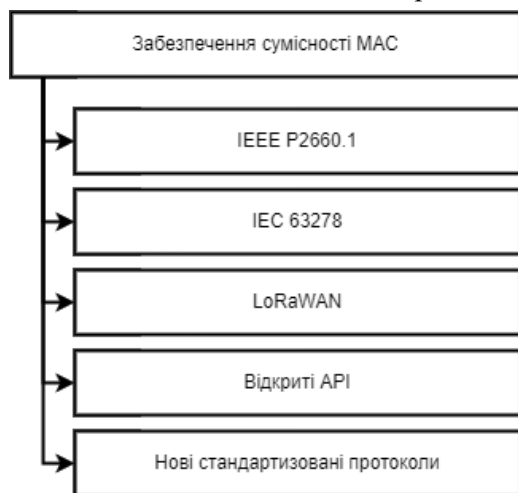


Рис. 4. Способи забезпечення сумісності MAC

3. Медичного моніторингу, який включає в себе системи спостереження за станом пацієнтів у реальному часі, розподілені системи епідеміологічного моніторингу та моніторингу екологічних факторів, що впливають на здоров'я [12], [20].

Останнім критичним аспектом впровадження MAC для задач моніторингу є забезпечення їх сумісності з наявними інфраструктурами та міжнародними стандартами (рис. 4). Проблеми сумісності полягають у різноманітності апаратних платформ та протоколів зв'язку, відсутності єдиних інтерфейсів для обміну даними та несумісності формату даних між різними виробниками. Для збільшення сумісності різних систем рекомендується дотримуватись міжнародних стандартів, наприклад, таких як стандарт IEEE P2660.1 для інтерфейсів MAC або стандарт IEC 63278 для IoT-інтеграції. Іншим способом підтримки сумісності з системою є створення відкритих API для взаємодії з хмарними платформами [24].

Висновки

Концепція MAC для задач екологічного моніторингу значно стимулює розвиток розподілених систем, пропонує інноваційні можливості для спостереження, аналізу та управління складними динамічними середовищами.

Відмовостійкість та надмірність виступають ключовими характеристиками, що забезпечують стабільну роботу систем навіть за наявності зовнішніх збурень або внутрішніх збоїв. Архітектурні рішення, які включають надмірність компонентів та гнучкі механізми управління, дозволяють системам адаптуватися до непередбачених ситуацій і підтримувати ефективність роботи навіть у разі часткових відмов. Тому розробка відповідних адаптивних алгоритмів забезпечує можливість динамічної зміни поведінки агентів у відповідь на зміни в навколишньому середовищі в процесі розв'язання складних задач в умовах непередбачуваності та можливої нестабільності функціонування моніторингової системи.

В межах цього дослідження проведено огляд теоретичних основ концепції мультиагентних систем для практичного використання в екологічному моніторингу. Описано архітектурні рішення MAC, зокрема п'ятишарова модель та ключові алгоритми оптимального функціонування системи на основі консенсусу, своєї поведінки та теорії ігор. Визначено ключові виклики, пов'язані з енергоефективністю, масштабуванням та забезпеченням якості даних. Наведено конкретні приклади застосування MAC в різних напрямках екологічного моніторингу.

MAC поступово стають ключовим компонентом сучасних інтерактивних середовищ, здатних координувати складні процеси з мінімальним людським втручанням, і подальші дослідження варто спрямовувати на подолання наявних обмежень та повну реалізацію потенціалу, який надає концепція MAC для широкого кола практичних застосувань. Перспективою розвитку MAC в екологічному моніторингу можуть стати: розробка повністю децентралізованих комунікаційних протоколів, вдосконалення алгоритмів розподіленого прийняття рішень, оптимізація енергоспоживання мобільних агентів та інтеграція передових методів аналізу даних, зокрема онлайн аналітику та гібридні нейромережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] D. Ventura, A. Bonifazi, M. F. Gravina, and G. D. Ardizzone, "Unmanned aerial systems (UASs) for environmental monitoring: A review with applications in coastal habitats," *Aerial Robots—Aerodynamics, Control and Applications*, Rijeka, Croatia: Intech, 2017, c. 165-184.
- [2] R. H. Kabir, and K. Lee, "Wildlife monitoring using a multi-UAV system with optimal transport theory," *Applied Sciences*, vol. 11, pp. 4070, 2021.
- [3] A. Tiwary, B. Rimal, Y. Himeu, and A. Amira, "Monitoring nature-based engineering projects in mountainous region incorporating spatial imaging: Case study of a hydroelectric project in Nepal," *CITIES 20.50 – Creating Habitats for the 3rd Millennium: Smart–Sustainable–Climate Neutral (REAL CORP 2021)*, Vienna, Austria, 7–10 .09.2021, pp. 535–538.

- [4] Y. Himeur, B. Rimal, A. Tiwary, and A. Amira, "Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring: A review and future perspectives," *Information Fusion*, vol. 86-87, pp. 44-75, 2022.
- [5] Y. Himeur, et al., "AI-big data analytics for building automation and management systems: a survey, actual challenges and future perspectives," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, pp. 4929-5021, 2022.
- [6] C. Chen, et al., "YOLO-based UAV technology: A review of the research and its applications," *Drones*, vol. 7, p. 190, 2023.
- [7] М. Ю. Войтех, і О. П. Кравченко, «Гібридні мультиагентні системи для ефективності місії», *Шевченківська весна – 2025, тези XXIII міжнар. наук.-практ. конф.*, Київ, Україна, 10 квітня 2025, с. 68.
- [8] D. Maldonado, E. Cruz, J. A. Torres, P. J. Cruz, and S. Gamboa, "Multi-agent systems: A survey about its components, framework and workflow," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 80950-80974, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3409051>.
- [9] M. Herrera, M. Pérez-Hernández, A. Kumar Parlikad, and J. Izquierdo, "Multi-agent systems and complex networks: Review and applications in systems engineering," *Processes*, vol. 8, no. 3, p. 312, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8030312>.
- [10] A. Dheedan, and Y. Papadopoulos, "Multi-agent safety monitor," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 4, pp. 84-89, 2010. <https://doi.org/10.3182/20100701-2-PT-4011.00016>.
- [11] D. Vallejo, F. J. Villanueva, J. Albusac, C. Glez-Morcillo, and J. J. Castro-Schez, «Intelligent surveillance for understanding events in urban traffic environments», *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, no. 8, pp. 723819, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/723819>.
- [12] A. Dorri, S. S. Kanhere, and R. Jurdak, "Multi-agent systems: A survey," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28573-28593, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228>.
- [13] K. Telli, et al., "A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (UAVs)," *Systems*, vol. 11, no. 8, pp. 400, 2023. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>.
- [14] J. Xie, and C. Liu, "Multi-agent systems and their applications," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 188-195, 2017. <https://doi.org/10.1080/22348972.2017.1348890>.
- [15] N. Patrinoopoulou, I. Daramouskas, D. Meimetis, V. Lappa, and V. Kostopoulos, "A multi-agent system using decentralized decision-making techniques for area surveillance and intruder monitoring," *Drones*, vol. 6, no. 11, pp. 357, 2022. <https://doi.org/10.3390/drones6110357>.
- [16] S. L. Ull, and G. R. Sinha, "Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors," *Sensors*, vol. 20, no.11, pp. 3113, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20113113>.
- [17] M. K. Habib, and C. I. Chukwuemeka, "Development of IoT-based hybrid autonomous networked robots," *Technologies*, vol. 13, no. 5, p. 168, 2025. <https://doi.org/10.3390/technologies13050168>.
- [18] A. Fascista, "Toward integrated large-scale environmental monitoring using WSN/UAV/crowdsensing: A review of applications, signal processing, and future perspectives," *Sensors*, vol. 22, no. 5, pp. 1824, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22051824>.
- [19] K. Nandagiri, and B. R. M., "A review on smart environment monitoring systems using sensors," *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 8, no. 1, 2021. [Electronic resource]. Available: <https://www.jetir.org/papers/JETIREK06036.pdf>. Accessed: 1.04.2025.
- [20] A. Papaleonidas, and L. Iliadis, "Hybrid and reinforcement multi-agent technology for real-time air pollution monitoring," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, 2012, pp. 274-281. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33409-2_29.
- [21] R. Li, G. Wang, W. Dai, X. Zan, and T. Zhang, "Design of distribution equipment monitoring system based on Internet of Things and multi-agent," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2093, no. 1, pp. 012040, 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2093/1/012040>.
- [22] H. Uppaluru, and H. Rastgoftar, "Multi-layer continuum deformation optimization of multi-agent systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 10222-10227, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.901>.
- [23] A. D. Saravanos, Y. Li, and E. Theodorou, "Distributed hierarchical distribution control for very-large-scale clustered multi-agent systems," in *Proc. Robotics: Science and Systems*, 2023. <https://doi.org/10.15607/RSS.2023.XIX.110>.
- [24] E. Roccatello, A. Pagano, N. Levorato, and M. Rumor, "State of the art in Internet of Things standards and protocols for precision agriculture with an approach to semantic interoperability," *Network*, vol. 5, no. 2, p. 14, 2025. <https://doi.org/10.3390/network5020014>.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.06.2025

Войтех Микола Юрійович — аспірант кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, e-mail: kolyavojteh2@gmail.com ;

Кравченко Ольга Петрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, e-mail: olgakravchenko111@gmail.com .

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ

M. Yu. Voitekh¹
O. P. Kravchenko¹

The Concept of a Multi-Agent System in Environmental Monitoring

¹State University “Kyiv Aviation Institute”

This article provides a comprehensive analysis of modern multi-agent systems for monitoring, focusing on their architectural solutions, control algorithms, and key functional capabilities. Multi-agent systems, which consist of autonomous agents interacting with each other and their environment to achieve individual or collective goals, have become a promising paradigm for monitoring complex and distributed environments. These systems offer a decentralized and cooperative approach to data collection, processing, and decision-making, making them highly adaptable and efficient for dynamic applications.

The study systematically examines the latest advancements in multi-agent systems, particularly in communication protocols, agent coordination, and the integration of machine learning techniques. Coordination mechanisms, such as consensus algorithms and swarm intelligence, facilitate synchronized operations among distributed agents, improving system reliability and scalability. The incorporation of machine learning allows agents to adapt their behavior dynamically, optimizing monitoring strategies in unpredictable conditions.

Critical aspect of the research is the exploration of challenges hindering the effective deployment of multi-agent systems. Energy efficiency remains a significant concern, especially for mobile agents like unmanned aerial vehicles, necessitating innovative solutions such as hybrid power systems and optimized routing algorithms. Scalability issues arise as the number of agents increases, requiring robust communication frameworks and decentralized decision-making protocols. Additionally, ensuring data quality and system resilience in dynamic environments presents ongoing challenges, demanding advanced validation mechanisms and fault-tolerant architectures.

The article highlights diverse applications of multi-agent systems across various domains, including environmental monitoring, traffic management, industrial automation, and healthcare. In intelligent transportation systems, swarm-based algorithms enable adaptive traffic control, reducing congestion and improving efficiency. Industrial applications leverage multi-agent systems for equipment monitoring and failure detection, enhancing operational safety and productivity.

Future research directions emphasize the need for fully decentralized communication protocols, improved distributed decision-making algorithms and energy optimization techniques for mobile agents. Standardization of interoperability protocols and the development of secure, trust-based data processing frameworks are also identified as critical for broader adoption.

In conclusion, multi-agent systems represent a transformative approach to monitoring, offering scalability, adaptability and resilience. By addressing existing limitations and leveraging emerging technologies, multi-agent systems can unlock their full potential, becoming indispensable tools for managing complex, real-world environments with minimal human intervention.

Keywords: multi-agent system, mobile agent, monitoring, control algorithms, energy efficiency, IoT, UAV.

Voitekh Mykola Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Intellectual Cybernetic Systems, e-mail: kolya-vojteh2@gmail.com ;

Kravchenko Olga P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Intellectual Cybernetic Systems, e-mail: olgakravchenko111@gmail.com