

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНИХ АСПЕКТІВ ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ В ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

О.Є. Середюк, М.М. Труфан

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна*

### Анотація

Виконаний аналіз концептуальних аспектів побудови мультиагентних систем (MAS). Розглянуто підходи до впровадження MAS. Розроблено MAS на базі централізованої архітектури з широкою автономією інтелектуальних агентів, викладені її переваги. Охарактеризовані особливості практичного застосування розробленого авторами методу подвійного контролю як умови покращення використання MAS.

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальні технології, мультиагентна система, інтелектуальний агент, штучний інтелект, алгоритми машинного навчання, сенсор

### 1. Вступ

В останні роки все більшої уваги приділяється концепції мультиагентних систем, Multi-agent system-MAS (англ.), як перспективного підходу до вирішення проблем в інформаційно-вимірювальних технологіях [1]. Суть таких систем полягає в наявності в їх архітектурі множини автономних, інтелектуальних агентів, які взаємодіють один з одним для досягнення спільної мети. Така архітектура дозволяє підвищити гнучкість, адаптивність та масштабованість інформаційно-вимірювальних систем. MAS застосовують при розв'язанні таких проблем, які складно або неможливо вирішити за допомогою одного агента або монолітної інформаційно-вимірювальної системи.

MAS також належать до систем, що самоорганізуються, тому що за їх допомогою знаходять оптимальне розв'язання задачі без зовнішнього втручання. Під оптимальним розв'язанням для нашої задачі розуміється розв'язання, на яке витрачена найменша кількість енергії в умовах обмежених ресурсів.

Головна перевага MAS — це гнучкість, оскільки система може бути доповнена й модифікована без переписування значної частини програми. Також ці системи мають здатність до самовідновлення й мають стійкість до збоїв, завдяки достатньому запасу компонентів і самоорганізації [1].

Однак, впровадження мультиагентних підходів в інформаційно-вимірювальні технології стикається з низкою проблем та викликів. Зокрема, потребують вирішення питання координації і узгодженості дій агентів, забезпечення ефективного обміну даними та знаннями, оптимізації розподілу ресурсів, управління складністю та динамікою процесів. Крім того, існують технічні та методологічні аспекти, пов'язані з архітектурою, алгоритмами, інтерфейсами та інтеграцією мультиагентних систем в інформаційно-вимірювальні технології.

Відомо, що теоретичні корені парадигми MAS знаходять свій початок в теорії відкритих систем,

застосування розподіленого штучного інтелекту (РШІ), а також в загальній теорії складних систем [1,2].

Інтелектуальні системи на основі MAS складаються з множини автономних модулів або програмних агентів та мають такі властивості:

модулі є відносно автономними, мобільними, самодостатніми в живленні, передачі даних та виконанні функцій;

існує взаємозв'язок між агентами, вони здатні обмінюватись інформацією та “ділитись” знаннями для досягнення спільних цілей;

керування агентами може бути як централізованим так і децентралізованим;

доступ до інформаційних джерел, бази даних і бази знань у інтелектуальних агентів автономний і децентралізований;

діяльність агентів переважно асинхронна, хоча і “командна”.

Поведінки інтелектуальних агентів в динамічних і еволюціонуючих системах досліджують за допомогою методів різних наукових дисциплін. Так, теорія прийняття рішень займається найбільш загальними аспектами колективної поведінки агентів; теорія ігор аналізує стани систем, аналогічних до кооперативних ігор, стратегій ведення переговорів; теорія колективної поведінки автоматів досліджує кооперацію та поведінку автоматів з примітивними функціями, спроможних навчатися за допомогою системи штрафів і заохочень, тощо [1].

Теорія MAS походить від теорії відкритих систем, розподіленого штучного інтелекту (РШІ), загальної теорії складних систем. РШІ пов'язаний з аналізом систем, що складаються з окремих незалежних об'єктів, які взаємодіють один з одним, та механізмів їх координації [2].

При аналізі складних систем важливу роль відіграє метод системної динаміки (systems dynamics) який є надзвичайно потужним інструментом для моделювання, аналізу та проектування мультиагентних інформаційно-вимірювальних систем. Він дозволяє враховувати їх складну динамічну природу та забезпечує математичні основи для

ефективного проектування та оптимізації таких систем, оскільки в основі аналізу системної динаміки закладена методологія, що враховує основні взаємозв'язки між елементами системи та часові аспекти її розвитку. Відповідно до принципів системної динаміки в ході моделювання інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи повинні враховуватися причинно-наслідкові взаємозв'язки між її елементами та міжагентний обмін даними та знаннями, що є найважливішим елементом в машинному навчанні моделей агентів [2-3].

Не можна не відзначити стрімке поширення застосування MAS і в кібер-фізичних системах (КФС) – найбільш розвинутих в інтелектуальному розумінні системах збору і аналізу інформації. Як зазначають О. Ю. Бочкарьов та В. А. Голембо [4] – “одним з ключових у роботі таких систем є використання методів та засобів збору даних, за допомогою яких збирають інформацію про оточення КФС, про відповідні об'єкти управління та про роботу самої КФС, а також виконують попередню обробку зібраної інформації для її подальшого використання системами управління та іншими компонентами КФС”. Внаслідок автономності та розподіленості сучасних КФС виникає потреба у використанні інтелектуальних технологій збору даних, які дозволяють адаптувати вимірювально-обчислювальні процеси до збурень у оточенні КФС.

В [5] йдеться про делегування значної частини повноважень з прийняття рішень окремим інтелектуальним агентам збору даних на основі концепції інтелектуального автономного агента (intelligent autonomous agent) та технологій багатоагентних систем (multi-agent systems).

Почасти, концепцію MAS дедалі частіше використовують в реальних ІВС. Патент зі створення інформаційно-вимірювальної системи [6], суть якого полягає в розробці інформаційно-вимірювальної системи, яка здатна вимірювати фізичні величини шляхом перетворення фізичної взаємодії середовища з сенсорами в електричні сигнали, а потім у цифрові коди, передбачає застосування множинних інтелектуальних давачів з вимірювальними перетворювачами, мікропроцесори з інтерфейсними пристроями та канали міжвузлових зв'язків, що фактично відтворює архітектуру MAS. Також запатентована система дозволяє автоматично виконувати програму вимірювань і передавати результати у вигляді цифрових кодів.

Таким чином задачі моніторингу середовища, вимірювання фізичних величин, контролю заявлених параметрів та управління приладами та системами на основі штучного інтелекту та моделей машинного навчання об'єднуються і кооперуються в одній інтелектуальній системі. Такі системи ефективніші і менш затратні ніж використання розрізнених систем моніторингу, контролю чи управління. А розвиток телеметричних способів передачі даних (як зростання швидкості так і вмістимості інформації) та використання хмарних технологій накопичення і

збереження даних гарантує подальше об'єднання різноманітних функцій в одній системі.

**Метою статті** є розроблення моделі та архітектури MAS для інформаційно-вимірювальних технологій та практичних аспектів їх застосування у сфері моніторингу параметрів різнопланових об'єктів, в тому числі навколишнього середовища.

## 2. Виклад основного матеріалу

Зі зростаючою складністю сучасних інформаційно-вимірювальних технологій можна констатувати, що застосування традиційних математичних алгоритмів в умовах неповноти та суперечливості вихідної інформації про стан системи, а також за необхідності прийняття рішень в реальному часі, є досить проблемним. Зазвичай реалізація евристичних методів передбачає використання різноманітних прикладних систем штучного інтелекту (системи підтримки прийняття рішень, експертні системи, системи аналізу в режимі реального часу тощо). Вказані системи ґрунтуються на тому, що для прийняття рішень в якості обґрунтування виступає експертний досвід дій у подібних ситуаціях у цій предметній області.

Для впровадження MAS у практичні системи необхідно розглянути запропоновані нами підходи, які можна сформулювати у такому, поданому нижче вигляді.

*Агентна архітектура.* Розроблення агентної архітектури є ключовим кроком у впровадженні MAS і включає визначення структури та взаємодії агентів. Методи, які реалізують агентно-орієнтоване моделювання і фреймворки для агентних систем, надають методологію для проектування та розроблення агентів і їх взаємодії.

*Координація агентів.* У MAS агенти повинні співпрацювати та координувати свої дії для досягнення спільних цілей. Алгоритми координації, які передбачають вирішення задач з розподілу завдань, планування та прийняття рішень, повинні бути використані для забезпечення ефективної координації між агентами.

*Методи машинного навчання без учителя та з підкріпленням.* Використання цих методів дозволяє агентам вдосконалювати свої дії на основі взаємодії з середовищем. Це забезпечує можливість самостійно навчитися та адаптуватися до змінних умов. Алгоритми навчання з підкріпленням, наприклад, Q-навчання або алгоритми глибокого навчання, можуть бути використані для навчання агентів у MAS.

*Методи оптимізації.* Переважна більшість MAS потребують оптимізації певних критеріїв або функцій. Алгоритми оптимізації, наприклад, такі як генетичні алгоритми, алгоритми частинок, алгоритми імунної системи тощо, можуть бути використані для покращення роботи MAS та досягнення бажаних результатів.

Згідно [7] архітектура інтелектуальної системи на основі MAS практично може бути реалізованою централізовано або децентралізовано, друга дає можливість агентам більш самостійно діяти (табл.1).

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики архітектур MAS

Аспекти	Централізована архітектура	Децентралізована архітектура
Керівництво	Єдиний центральний контролер або керівник	Розподілене керівництво агентами
Прийняття рішень	Рішення приймаються централізованою системою або керівником	Рішення приймаються децентралізовано кожним агентом
Комунікація	Комунікація відбувається через централізований канал або засоби комунікації, контрольовані централізованою системою	Комунікація відбувається безпосередньо між агентами або через розподілену систему комунікації
Масштабованість	Менш гнучка у відношенні масштабування, оскільки залежить від централізованої системи	Більш гнучка у відношенні масштабування, оскільки може бути розподілена на багато агентів
Надійність	Залежить від надійності центрального контролера або керівника	Більш надійна, оскільки не залежить від єдиного пункту відмови
Обробка інформації	Централізована система отримує і обробляє інформацію	Кожен агент обробляє свою власну інформацію
Адаптивність	Менш адаптивна до зміни умов або збоїв	Більш адаптивна до зміни умов або збоїв, оскільки може реорганізуватись та адаптуватись локально

Відзначимо, що кожна з цих архітектур має свої переваги та обмеження, і її вибір залежить від конкретного контексту та вимог дослідження або застосування.

На підставі аналізу децентралізованої схеми нами пропонується для проектування мультиагентних інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем обрати централізовану архітектуру з широкою автономією інтелектуальних агентів, оскільки практично є неможливим об'єднання двох архітектур поданих в табл.1.

Такий висновок впливає з того, що централізована архітектура MAS передбачає наявність центрального агента або координатора, який відповідає за прийняття рішень та керування всією системою, в той час як агенти займаються збором даних з сенсорів та передачею оброблених даних до центрального агента.

Застосування централізованої архітектури MAS з широкою автономією інтелектуальних агентів при проектуванні інформаційно-вимірювальних систем має значні переваги в порівнянні зі застосуванням класичних архітектур MAS. Так, завдяки централізованому керуванню забезпечується єдина точка керування всією системою, що спрощує процес прийняття рішень та координацію дій агентів. Крім того, централізована обробка даних забезпечує кращий аналіз даних, що дає змогу виявляти тренди чи аномалії та приймати відповідні рішення. Ще однією важливою перевагою є оптимізація ресурсів системи, оскільки централізована архітектура дозволяє ефективно розподіляти агентів та ресурси для оптимального покриття середовища та моніторингу параметрів. Це може допомогти уникнути дублювання агентів або недостатку покриття. Центральний агент забезпечує можливість аналізувати систему в цілому та здійснювати стратегічне управління параметрами

середовища. Це дозволяє виявляти тенденції, проводити довгострокове планування та впроваджувати стратегії для оптимізації ефективності та стійкості системи.

Централізована архітектура сприяє легкій інтеграції системи моніторингу з іншими інформаційними системами, що дозволяє обмінюватися даними, виконувати спільні задачі та забезпечувати взаємодію з іншими технічними системами контролю та управління середовищем.

У контексті інформаційно-вимірювальних технологій для моніторингу параметрів середовища, централізована архітектура з автономними агентами може бути реалізована таким чином.

*Визначення цілей.* Центральний агент визначає цілі та завдання системи моніторингу параметрів середовища. Цілі можуть включати збір, аналіз та відображення даних про різні параметри середовища, такі як температура, вологість, рівень забруднення тощо.

*Вибір та розміщення агентів.* Центральний агент вибирає та розміщує агентів у відповідних місцях середовища для збору даних. Ці агенти можуть бути давачами, пристроями збору даних або програмними модулями, що здійснюють моніторинг параметрів.

*Збір даних.* Агенти збирають дані про параметри середовища, до яких вони прикріплені. Ці дані можуть бути зібрані з використанням сенсорів, передачі даних по мережі або іншими методами, залежно від конкретної реалізації системи.

*Комунікація з центральним агентом.* Агенти взаємодіють з центральним агентом для передачі зібраних даних та отримання вказівок щодо подальших дій. Центральний агент може аналізувати отримані дані, порівнювати їх зі заздалегідь встановленими нормами та вживати заходи в разі виявлення відхилень або проблем.

*Прийняття рішень та керування.* На основі зібраних даних та аналізу центральний агент приймає рішення щодо необхідних заходів. Це може включати сповіщення операторів, автоматичне виконання дій або взаємодію з іншими системами для забезпечення безпеки або оптимізації параметрів середовища.

*Моніторинг та звітність.* Центральна система може також включати функції моніторингу та звітності, які дозволяють відстежувати стан агентів, якість зібраних даних та продуктивність всієї системи моніторингу. Це допомагає виявляти аномалії, проблеми або несправності в системі та забезпечує звіти для аналізу та управління.

В запропонованій нами архітектурі агенти не припиняють свої функції моніторингу, збору та відправки даних. Вони продовжують функціонувати без втрати даних для аналізу, використовуючи блоки пам'яті та паралельні комунікаційні канали (рис. 1).

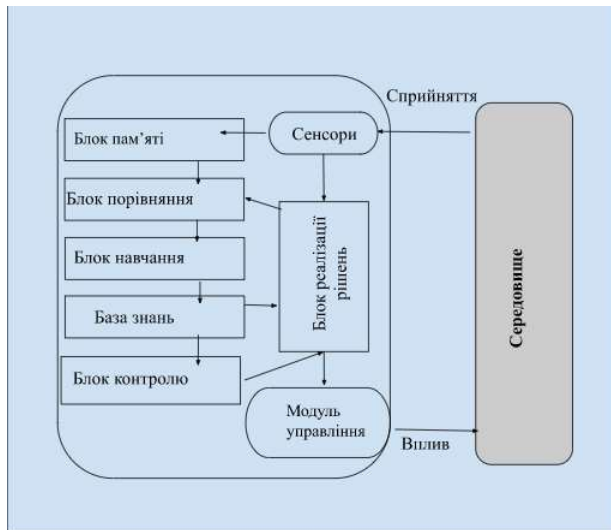


Рис.1. Структурна схема інтелектуального агента в архітектурі MAS

Враховуючи наявні дослідження [8,9] для удосконалення процесу обробки даних в інформаційно-вимірювальних технологіях на архітектурі MAS пропонується використовувати алгоритми неконтрольованого навчання та навчання з підкріпленням.

Алгоритми кластеризації, такі як k-середніх або ієрархічна кластеризація, використовуються для групування подібних даних в MAS. Це дозволяє агентам визначити внутрішню структуру даних та використовувати її для подальшої обробки.

Алгоритми асоціативного навчання, або асоціативні нейронні мережі, використовуються для виявлення зв'язків та залежностей між різними даними в MAS. Це допомагає агентам розуміти інформаційні зв'язки та здійснювати більш ефективну обробку даних.

Алгоритми аналізу головних компонент (PCA) можуть використовуватися для зменшення розмірності даних та виокремлення важливих ознак.

Це дозволяє агентам працювати з меншим обсягом даних, зберігаючи при цьому основну інформацію.

Автоенкодера – нейронні мережі, що використовуються для відтворення вхідних даних на виході. Вони можуть використовуватися для виявлення складних залежностей у вхідних даних та забезпечення ефективного представлення даних.

Генеративні згорткові моделі (DCGAN) або варіаційні автоенкодера (VAE), які використовуються для генерації нових зразків даних. Це може бути корисним, наприклад, для доповнення недостатніх даних або генерації синтетичних даних для тестування MAS.

Залежно від поставлених завдань агенти використовуючи експертні знання будуть використовувати відповідні алгоритми для формування повних, точних і безперервних даних про стан середовища та інші стани моніторингу і контролю.

Як один з практичних аспектів реалізації MAS нами запропонований метод подвійного контролю [10]. Метод передбачає використання двох незалежних систем вимірювання для перевірки точності отриманих даних. Перша система вимірювання є основною та забезпечує збір інформації з оточуючого середовища. Друга система вимірювання, що працює паралельно з основною, використовує незалежні сенсори або алгоритми для проведення аналогічних вимірювань. Порівняння результатів двох систем дозволяє виявляти можливі помилки або відхилення вимірювань. Удосконалення методу призводить до можливості застосування його не лише для перевірки і порівняння отриманих вимірювань з сенсорів та давачів, а також при виборі алгоритмів машинного навчання інтелектуальним агентом, вибору формування експертних правила для бази знань, безпеці та захисті передачі даних тощо. Метод подвійного контролю може бути застосований на двох рівнях: апаратному та інтелектуальному. На апаратному рівні можуть бути застосовані такі методи, як паралельні вимірювання, збільшення частоти вимірювання, перевірка вимірювальних приладів на точність, автокалібрування або самокалібрування сенсорів. На інтелектуальному рівні метод подвійного передбачає застосування складних і багаторівневих алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, таких як моделі без навчання та з підкріпленням.

Використання подвійного контролю на апаратному та інтелектуальному рівнях забезпечує істотні переваги в точності та надійності вимірювань, запобігає потенційним проблемам, пов'язаним зі збоями обладнання та помилками вимірювань, завдяки застосуванню комплексних алгоритмів та методів перевірки значно зростає ефективність системи за рахунок адаптивного навчання та самовдосконалення, що забезпечує високу точність вимірювань, надійність системи, адаптивність та ефективність у різних сферах застосування.

### 3. Висновки

Застосування моделі MAS в інформаційно-вимірювальних технологіях є новим підходом для моніторингу стану об'єктів і середовища, контролю їх параметрів та управління виконавчими приладами в реальному часі.

Запропонована базова схема проектування мультиагентної інтелектуальної системи вирішує основні проблеми застосування агентних технологій при проектуванні інформаційно-вимірювальних

систем, удосконалює технології збору, обробки та передачі даних, демонструє свої переваги в практичному застосуванні.

В той же час, перспективним і необхідним є продовження роботи над удосконаленням методів практичної реалізації інформаційно-вимірювальних технологій, зокрема в області розроблення відповідних алгоритмів машинного навчання для моделей. Це буде напрямком наших подальших наукових досліджень.

### Список літератури

1. Плєскач В.Л., Рогошина Ю.В. Агентні технології: Монографія. Київ: Київський національний торговельно-економічний університет, 2005. 344 с.
2. Wooldridge M., Jennings N.R. Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey. In: Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages. Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994, *Proceedings. Springer Verlag*: 3-39, 1994
3. Shoham Yoav, Kevin Leyton-Brown. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations: Cambridge University Press, 2009. 496 p.
4. Бочкар'юв О. Ю., Голембо В. А. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". *Комп'ютерні системи та мережі*. 2015. № 830. С. 7-11.
5. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor): MIT Press, 2000. – 648 p.
6. Патент 73792 С2 Україна; МПК (2012.01) G06Q 50/02. Інформаційно-вимірювальна система для контролю якості мінеральної сировини/ А.А.Азарян, О.С.Ахтямов, А.С.Карачабан, І.М.Кознін, В.В.Дрига: № u201203089: заявл. 16.03.2012р.; опубл. 10.10.2012; бюл. №19.
7. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / Під заг. ред. С. О. Субботіна. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.
8. Luck M. Multi-Agent Systems and Applications. *Springer-Verlag*: Berlin, 2001. 452 p.
9. Choi, W.-H.; Kim, J. Unsupervised Learning Approach for Anomaly Detection in Industrial Control Systems. *Appl. Syst. Innov.* 2024. №7. P.18-27. doi.org/10.3390/asi7020018.
10. Середюк О.Є., Труфан М.М., Винничук А.Г. Метод подвійного контролю в інформаційно-вимірювальних системах і перспективи його застосування. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи*: збірник тез та доповідей VI-а міжнар. наук.-практ. конф. м. Львів, 16–17 листопада 2023 р. Львів: НУ "Львівська політехніка", 2023. С.270-271.

Надійшла (Received) 17.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 17.11.2024

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

**Середюк Орест Євгенович** – д.т.н., професор, виконуючий обов'язки завідувача кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: mivt@nung.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8539-2693

**Orest Serediuk** – DSc, professor, Acting Head of the department of information and measurement technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; e-mail: mivt@nung.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8539-2693

**Труфан Михайло Михайлович** – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: mykhailo.trufan-a175-23@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7924-7170

**Mykhailo Trufan** – postgraduate student of the Department of Information and Measurement Technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine; e-mail: mykhailo.trufan-a175-23@nung.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7924-7170

### Research on the Practical Aspects of Using Multi-Agent Systems in Information Measurement Technologies

O.Y. Serediuk, M.M. Trufan

#### Abstract

The conceptual aspects of building multi-agent systems (MAS) are analyzed. Approaches to implementing MAS are considered. MAS is developed based on a centralized architecture with broad autonomy of intelligent agents, its advantages are outlined. The features of the practical application of the dual control method developed by the authors as a condition for improving the use of MAS are characterized.

**Key words:** information and measuring technologies, multi-agent system, intelligent agent, artificial intelligence, machine learning algorithms, sensor