

Intelligent Control and Systems

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt216.02.041>

ГЛАДУН А.Я., канд.техн.наук, доцент,
провід. наук. співроб. відд. комплексних досліджень
інформаційних технологій та систем
<https://orcid.org/0000-0002-4133-8169>, e-mail: glanat@yahoo.com

ХАЛА К.О.,
наук. співроб. відд. комплексних досліджень інформаційних технологій та систем
<https://orcid.org/0000-0002-9477-970X>, e-mail: cecetongreat@ukr.net

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України та МОН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

ОНТОЛОГО-ОРІЄНТОВАНА МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БПЛА

Вступ. БПЛА сьогодні стають усе важливішим інструментом для виконання складних завдань у різних сферах застосування, як цивільних (народногосподарських), так і військових, оскільки вони є особливо ефективними у динамічно невизначених середовищах з важкодоступними районами. Крім того, досягнення в таких галузях технологій як блокчейн, штучний інтелект (ШІ) і машинне навчання уможливили розроблення оновлених та вдосконалених систем БПЛА. Для створення та розгортання рою БПЛА, координування дій, керування та обмінювання даними запропоновано модель мультиагентної системи (МАС) заснованої на онтологічному поданні знань, яка дає змогу рою БПЛА ефективно приймати рішення в різних ситуаціях під час виконання поставлених завдань. Такий підхід уможливорює безпечність, надійність і ефективність виконання завдань групи БПЛА.

Мета. Метою статті є подальший розвиток теоретичних і практичних основ інтегрування мультиагентної системи (МАС) базованої на онтологічному поданні знань з мережею БПЛА. Це передбачає розроблення архітектури МАС та ієрархічного набору онтологій різних рівнів для створення спільної мови опису даних, визначення семантики даних для забезпечення однозначності та узгодженості даних, забезпечення підтримки прийняття рішень під час керування роєм БПЛА та живучості рою у разі збоїв або втрати апарату. Необхідно розробити алгоритми та метод розподілення складного завдання на підзавдання в рої БПЛА між усіма агентами МАС, забезпечити надійне обмінювання повідомленнями (даними) між агентами під час спільного виконання поставленого завдання та можливість динамічного перерозподілу ролей між агентами БПЛА за потреби.

© ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Методи. Під час виконання досліджень застосовано загальну теорію інтелектуальних інформаційних технологій; методи теорії агентів, зокрема інтелектуальних BDI-агентів; методи аналізування продуктивності бездротових мереж обмінювання даними; теорію комбінаторної оптимізації для розподілу завдань на підзавдання; методи онтологічного аналізу та дескриптивної логіки для створення онтологічної ієрархічної моделі предметної області; методи збагачення онтологічних моделей із зовнішніх семантично розмічених інформаційних ресурсів.

Результати. В результаті виконаного наукового дослідження запропоновано архітектуру МАС та визначено її основні функції для децентралізованого керування роєм БпЛА, сформовано набір агентів з призначеними ролями, які сумісно (кооперативно) виконують завдання, обмінюються між собою повідомленнями та інформацією, що забезпечує живучість системи (у разі збою або втрати апарату його завдання має бути розподілено між іншими дронами). Для виконання місії роєм БпЛА розроблено плани і сценарії дій МАС для різних ситуацій та засоби координування дій між агентами. Розроблено ієрархічну онтологічну модель предметної області пов'язану з роботою рою БпЛА, алгоритми та методи базовані на інтегруванні семантичних технологій, які підтримують МАС під час виконання місії рою БпЛА, прийняття рішень, оцінювання динамічного навколишнього середовища і реагування на його зміни.

Висновки. Запропоновано оригінальний підхід, алгоритми та метод удосконалення системи децентралізованого керування групою БпЛА та розширення функціоналу системи для підтримання взаємодії рою безпілотних систем на основі штучного інтелекту мультиагентної системи базованої на онтологічних моделях. Ці моделі описують знання предметної області, процеси функціонування рою БпЛА, сценарії дій в складних ситуаціях, розподілення ролей агентам, принципи планування та координування. Запропонована МАС інтегрується з програмною платформою рою БпЛА, що дає змогу покращити ефективність функціонування системи децентралізованого керування та адаптування БпЛА до динамічних змін навколишнього середовища. Практичним результатом роботи буде прототип програмної агентної системи, що взаємодіє з онтологіями під час виконання простих завдань. Економічна значимість роботи полягає в орієнтуванні на створення нових інтелектуальних інформаційних технологій, які ґрунтуються на ШІ та знаннях про предметну область, а це значно підвищує ефективність функціонування сучасних систем.

Ключові слова: мультиагентна система, онтологія, формалізування знань, БпЛА, дрон, децентралізоване керування, розподіл завдань.

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БпЛА або дрони) революціонізують багато галузей і стають сьогодні усе важливішим інструментом для вирішення багатьох складних завдань. БпЛА можуть виконувати завдання, які раніше виконували люди (наприклад, в агресивних небезпечних середовищах, у зонах бойових дій, під час стихійних лих тощо), але з вищою точністю, швидкістю та безпекою для людини. БпЛА не потребують такого обслуговування, як пілотовані літаки, а отже є значно економічнішими. Це робить їх дуже цінними для виконання широкого кола завдань, оскільки їх легка адаптованість робить БпЛА універсальним інструментом. Сьогодні БпЛА є невідомою частиною військової сфери, і з кожним роком винаходять все більше нових способів застосування у цивільних сферах.

У військовій сфері БпЛА виконують такі важливі завдання як розвідка та спостереження, коригування артилерійського вогню, радіоелектронна боротьба, ураження цілі, доставка боєприпасів, евакуація поранених, розмінування небезпечних ділянок, роль базової станції мобільного зв'язку тощо.

У цивільній сфері БпЛА набули більшої популярності та поширеності: огляд стану об'єктів критичної інфраструктури (енергетика, огляд ліній електропередач, інспекція вітрових турбін, контроль за витоком газу); логістика (доставка посилок, моніторинг транспортних потоків, картографування маршрутів, спостереження за міським трафіком); сільське господарство [1, 2] (моніторинг посівів, оприскування полів, картографування земель, збір даних про стан ґрунту); будівництво (моніторинг будівельних майданчиків, 3D-картографування, доставка будівельних матеріалів); нафтогазова галузь (моніторинг трубопроводів, огляд нафтових та газових вишок, пошук витоків); лісове господарство [3] (моніторинг лісів, пошук пожеж, картографування лісових масивів); охорона природи [3] (моніторинг дикої природи, пошук бракон'єрів, дослідження екосистем); пошуково-рятувальні роботи [4] (пошук людей, моніторинг стихійних лих, доставка медикаментів); картографія та геодезія (3D-картографування, створення ортофотопланів, геодезичні вимірювання) [5]; фото- та відеозйомка; доставка їжі; розваги тощо.

Використання одного БпЛА є певним обмежувальним фактором, наприклад, для пошуково-рятувальних або розвідувальних операцій, зважаючи на широту охоплення території пошуку. Розгорнута група дронів у такому разі може мати вагоміші переваги ніж окремі БпЛА, вони можуть рухатися та працювати з обмеженим втручанням людини, а також можуть розділити та розпаралелити завдання, які раніше виконував один дрон. Використання групи БпЛА [6] має ряд переваг:

- економічність: вартість придбання та обслуговування кількох малих БпЛА нижча за вартість одного великого;
- краща масштабованість, що має значення для виконання завдань великої складності та розмірності і є ключовою властивістю групи БпЛА;
- краща відмовостійкість: несправність одного або кількох дронів обмежено впливає на групу, яка може продовжити свою роботу далі;
- краща гнучкість: група БпЛА може легко адаптуватися до різних умов та завдань;
- ефективність: значно швидше та точніше виконання операції завдяки розподілу робіт між членами групи.

Таким чином, група автономних дронів із самокоординацією та адаптацією до навколишнього середовища може виконувати надійний, масштабований і гнучкий спосіб локалізації об'єктів у недослідженому, небезпечному середовищі [7]. Група БпЛА окрім переваг має низку викликів для вирішення:

- складність координації — координація дій групи потребує значних обчислювальних ресурсів;
- складність комунікації — забезпечення надійного обміну даними між БпЛА в групі може бути складним завданням, враховуючи можливі наявні перешкоди та завади.
- складність керування — керування групою БпЛА потребує нових методів і засобів, спеціальних навичок та знань.

Для успішного виконання завдань групою БпЛА потрібно вирішити проблеми застосування методів та засобів штучного інтелекту (ШІ) для підвищення ефективності координації та обмінювання даними між БпЛА у групі. Водночас, необхідно дослідити і вирішити низку питань: інтелектуального прийняття рішень [8]; розподіленої співпраці [9] та автономного децентралі-

зованого керування групою [10] із забезпеченням живучості та обміну інформацією в групі [11]. Також варто врахувати обмеження, які накладає політ апарату: запасу батареї електроживлення; обчислювальної потужності на борту; об'єму пам'яті апарату для збереження даних, отриманих від датчиків; ваги апарату, параметрів каналів обмінювання даними (швидкості передавання, затримки відповіді, захищеності від РЕБ); набору дій, які можуть виконувати БпЛА тощо.

Для забезпечення розподілу завдань між БпЛА і їх сумісного виконання та для децентралізованого керування групою БпЛА з їх координуванням та обмінюванням даними між ними ми пропонуємо застосування мультиагентної системи (МАС), яка базується на підтримці засобів ШІ (формалізованих семантичних знань про предметну область та онтологічних моделях). Суть децентралізованої стратегії полягає в тому, що в системі немає жодного центра керування, а кожен БпЛА групи самостійно ухвалює рішення щодо своїх дій, намагаючись за таких умов зробити максимально можливий внесок для досягнення загальної групової мети (місії). Члени групи БпЛА не можуть мати даних спостереження за станом усієї своєї команди і середовища, тому вони мають ділитися своїми знаннями один з одним спілкуючись (обмінюючись даними), щоб належним чином адаптуватися до середовища.

СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОБЛЕМИ

Розробленням груп БпЛА на основі методів і засобів ШІ займаються провідні наукові колективи світу, зокрема: інститути Товариства сприяння прикладним дослідженням імені Фраунгофера (ФРН), лабораторії штучного інтелекту Стенфордського Університету (США) тощо. Крім того, розробленням та впровадженням ШІ в системи децентралізованого керування складними динамічними об'єктами БпЛА займається низка компаній: Lockheed-Martin (США), RockwellCollins (США), Raytheon (США), BAE Systems (США), Defense Advanced Research Projects Agency (США), Air Force Institute of Technology (США), Diehl BGT Defence GmbH&Co KG (Німеччина), Thompson-CSF (Франція), Rafael Advanced Defense Systems Ltd. (Ізраїль), ElbitSystemsLtd. (Ізраїль), Qysea Technology (Китай), AVIC (Китай); вітчизняні ДККБ «Луч», КПСП «Арсенал», ВАО «Радіонікс». В спектр застосування ШІ в групах БпЛА входять також завдання розроблення методів аналізування та інтерпретування різної інформації (зображень, відео, аудіо), моделювання процесів навігації, прийняття рішень щодо доцільності дій автономних систем.

Агентство з перспективних досліджень при Міністерстві оборони США DARPA розробило кілька інноваційних проєктів зі створення «роїв» БпЛА, результати досліджень оубліковано в журналі *Military Aerospace* [12] та *KRATOS* [13]. В роботах відмічено, що військовим США вкрай необхідна сучасна система для керування групами БпЛА різного функціоналу на полі бою, і що численні автономні рої БпЛА сьогодні становлять серйозну дилему для оборони противника. Військовим необхідно отримати можливість планувати і виконувати місії, в яких застосовують тисячі БпЛА для пошкодження або знищення засобів атаки та захисту противника.

Широко застосовуються групи БПЛА для виконання різноманітних цивільних завдань. Розвиток досліджень застосування груп дронів із елементами ШІ спостерігається в Японії, Китаї, Кореї, Туреччині, Ізраїлі, країнах Західної Європи, Австралії, Ірані. Україна теж долучилася до переліку країн, що активно досліджують застосування рою БПЛА.

Мультиагентні системи застосовують для децентралізованого керування роями БПЛА, зокрема, Jevtic A. [14] з Політехніки Мадриду, Zhang, J., Wang, G., & Song, Y. [15] та Xu, D., Chen, G. [16] з Китаю, Zitouni, F., Harous, S., & Maamri, R. [17] з Італії. Рудяков Ю.І. та Томашевський В.М. [18] з Києва описують реалізацію алгоритмів та методів своєї взаємодії з застосуванням МАС, але у їхніх роботах відсутнє використання онтологічних знань про предметну область. Бережний А.О. [19] з Харкова працює над методами та інформаційними технологіями автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА. Погудіна О.К. та інші [20] з Харківського авіаційного інституту описують методологію формування інтелектуальної складової агентної системи рою БПЛА. У нашій роботі [21] подано методи та засоби використання штучного інтелекту.

В Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАНУ та МОНУ також проводяться комплексні дослідження інтелектуалізації інформаційних технологій та створення прикладних систем ШІ. З 1989 року проводились дослідження застосування агентних систем для керування глобальною телекомунікаційною мережею Інтернет (рамкова програма FP4 грант ЄС) в проєктах EXPERNET та ATMSat.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Основним завданням статті є дослідження та розроблення нових інноваційних методів і засобів на основі ШІ для покращення продуктивності групи БПЛА під час спільного виконання завдань, забезпечення живучості, динамічного керування групою та перерозподілом ролей у разі виявлення несправностей або втрати БПЛА. МАС забезпечують певні переваги для цих завдань: *децентралізоване керування* — кожен БПЛА, в якому розміщено програмний агент, діє автономно, приймаючи рішення на основі локальної інформації та спілкування з іншими БПЛА (агентами); *гнучкість і адаптивність* — МАС дають змогу легко адаптувати поведінку рою БПЛА до мінливих умов середовища; *підвищення ефективності обробки даних* — МАС можуть допомогти підвищити ефективність роботи рою БПЛА за рахунок кращої координації та розподілу задач; *зниження ризиків* — МАС можуть допомогти знизити ризики, пов'язані з польотами БПЛА.

Для підтримки роботи МАС необхідно розробити методи онтологічного аналізу предметної області, що охоплюють усі аспекти функціонування МАС, плани, сценарії, активні дії та критичні ситуації, які впливають на безпеку групи та процес виконання завдань. Комплекс завдань для місії, враховуючи розподілені ролі агентів у групі БПЛА, охоплює такі кроки:

1. визначення завдань (має виконати, може виконати, не може виконати);
2. розподіл ролей між агентами (враховуючи можливості, обмеження, спеціалізації);

3. створення сценаріїв та планів дій щодо місії для кожного агента (враховуючи його роль, його можливості, його обмеження);
4. координація дій між агентами;
5. моніторинг та керування виконанням місії та її складових;
6. адаптування сценаріїв та планів до мінливих умов.

Крім того для планування роботи групи БпЛА як МАС необхідні п'ять компонентів, які дають змогу створити ефективну систему керування, підвищити продуктивність групи та досягти поставлених цілей. Ці компоненти взаємопов'язані та впливають один на одного, тому важливо враховувати всі компоненти: 1) знання про зовнішній світ (інформація про середовище, перешкоди, потенційні загрози); 2) інформація про обмежену область для виконання завдання (розмір, геометрію, особливості); 3) знання про розподіл ролей (керівник, координатор, виконавець тощо); 4) комплекс виконуваних завдань з пріоритетами та залежностями (розвідка, перегруповання, відступ тощо); 5) розподіл або перерозподіл завдань (механізми призначення, зміни, адаптації).

ОРГАНІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ГРУПИ БПЛА

Організаційна структура групи БпЛА передбачає *децентралізоване керування*, коли БпЛА діють автономно з обмеженим втручанням з боку командного центру [22]. Децентралізовані групи не мають єдиного лідера чи центрального планувальника, а за допомоги «координації шляхом консенсусу» вузли колективно вирішують, як виконувати та координувати завдання, наприклад, шляхом голосування або через аукціон [23].

Децентралізовані групи легше масштабувати (на відміну від централізованих), вони не мають єдиної точки відмови, можуть працювати в середовищах з низькою пропускнуою здатністю [24].

Керування групою БпЛА є складним процесом [25], який охоплює: планування місій з визначенням цілей, завдань, маршрутів; координацію дій, яка забезпечить співпрацю БпЛА для досягнення загальних цілей; моніторинг станів для відстеження стану БпЛА для виявлення та вирішення можливих проблем; оброблення інформації, збір та аналіз даних з БпЛА для прийняття рішень. Можна виокремити чотири основні способи керування:

1. перемикання між алгоритмами, що визначають поведінку групи;
2. зміну параметрів алгоритму керування групою;
3. дистанційне керування конкретними вузлами (лідерами);
4. зміну середовища для впливу на поведінку групи [26].

Наприклад, місія пошуку об'єктів є виявленням цілей, розташованих в невідомому та складному середовищі, без попередніх знань щодо їх місцезнаходження і розташування перешкод. Для такої ситуації якісним пошуком буде мінімізація значення загального часу, необхідного для виконання місії. Місія з пошуку об'єктів для групи дронів може бути визначена відповідно до кількості об'єктів і дронів; мобільності об'єктів; складності навколишнього середовища; попереднього знання щодо об'єктів; типу координування групи тощо.

Організаційна структура групи БПЛА передбачає, що для здійснення спільних операцій критично важливо, щоб БПЛА збирали інформацію та обмінювалися нею один з одним. Для досягнення спільної мети необхідно підтримувати параметри системи обмінювання інформацією: *пропускну здатності; затримки; безпеки від перехоплення та несанкціонованого доступу*.

Структура групи БПЛА залежить і від організації внутрішньої та зовнішньої інформації (сенсорів, інформації оператора або інших довідкових ресурсів), коли виникають труднощі з неоднорідністю даних та трактуванням термінології [27].

Рішенням для усунення цих перешкод і покращення обміну інформацією всередині групи БПЛА є застосування МАС на основі онтології. *Онтологія*, формальна база знань, яка визначає спільний словник понять і значення даних, які використовуються всіма агентами в групі. Таке спільне розуміння забезпечує однозначне тлумачення обмінюваної інформації, пом'якшуючи потенційну плутанину та неправильне трактування. Повідомлення, якими обмінюються в системі, можуть містити:

- *інформацію про місію* — деталі, що стосуються цілей місії, місця розташування та інших відповідних параметрів;
- *дані сенсорів* — показники навколишнього середовища, виявлення цілей та іншу інформацію, що стосується сенсорів;
- *оновлення статусу* — інформацію в режимі реального часу щодо рівня заряду акумулятора, звіти щодо можливих пошкоджень та інші дані, пов'язані з агентом.

Онтологію можна оновлювати та розширювати для долучення нової інформації та концептів, що дає змогу системі адаптуватися до мінливих вимог місії та складності середовища. Застосовуючи онтологію, кожен агент може приймати обґрунтовані рішення автономно, не покладаючись на наземну станцію, а також брати участь в *міркуваннях*, що дає змогу виводити нові знання та приймати складні рішення.

ОНТОЛОГІЧНА ПІДТРИМКА РОБОТИ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ

Онтологію можна розглядати як концептуалізацію в чітко визначений і однозначний спосіб, де оператор TBox описує систему в термінах контрольованих словників; а оператор ABox є TBox-сумісними фактами або твердженнями про цей словник. Це полегшує збір інформації, обмін знаннями та їх можливе повторне використання. До основних переваг використання онтологій можна віднести те, що онтології [28]:

1. дають змогу формально описати знання про світ БПЛА;
2. роблять знання яснішими та зрозумілішими;
3. забезпечують спільну мову для взаємодії агентів між собою та з оператором;
4. можуть бути розбиті на модулі, що полегшує їх розроблення та використання;
5. можуть використовуватися для підтримки міркувань та прийняття рішень.

Онтологічний підхід до забезпечення обміну даними для групи БПЛА передбачає використання онтологій для створення спільної мови опису даних, визначення семантики даних, забезпечення однозначності та узгодженості да-

них, підтримки пошуку та використання даних. Також, застосування онтологій для обміну даними групи БпЛА підвищує ефективність обміну даними, знижує ризики помилок та непорозумінь, підвищує рівень інтероперабельності між системами, підтримує семантичний аналіз даних [29].

Онтології відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективного обмінювання даними, співпраці та прийняття рішень у групі автономних дронів. Вони визначають спільний словник і структуру для подання знань щодо окремих БпЛА, їхнє середовище та їхню колективну поведінку.

Розглянемо кілька прикладів наявних онтологій для групи або рою БпЛА:

- **OntoSwarm** — розроблена для опису поведінки рою БпЛА та охоплює поняття рою, агента, середовища та поведінки [30];

- **Dronetology** — розроблена для опису фізичних та функційних характеристик БпЛА, охоплює поняття БпЛА, платформи, сенсорів, актуаторів та комунікацій [31];

- **SWARMS** — розроблена для опису загальних концептів, уможливорює обмін інформацією між агентами (БпЛА) і середовищем, охоплює основні поняття, такі як рій, агент, поведінка та обмін даними [32];

- **Onto4Drone** — базується на базовій онтології SWARM та надає спеціальну онтологію рою БпЛА, охоплює словник для опису можливостей БпЛА, деталей місії та елементів середовища [33].

Розроблення надійних і стандартизованих онтологій для групи БпЛА є сферою постійних досліджень, що має значний потенціал для розкриття повного спектру можливостей цих універсальних і потужних систем.

Онтологія містить основні поняття, необхідні для загального семантичного розуміння між агентами під час обміну інформацією. Конкретні класи в онтології можуть відрізнятися залежно від планованих мети та обсягу онтології. Наведемо загальні типи класів онтологічної моделі, які є фундаментальними для процесу функціонування групи БпЛА (Табл. 1).

Введення класу **Role** слугує способом класифікації та диференціації між різними типами агентів у групі. Кожна роль пов'язана з певними можливостями, поведінкою та обов'язками. Перевагами використання ролей в онтології для групи БпЛА є: *покращена організація*, оскільки ролі забезпечують чітку структуру для групи, ефективний розподіл завдань і спеціалізацій між різними агентами; *масштабованість*, так як онтологію може бути легко розширено для нових типів ролей за потреби, що дає змогу інтегрувати різні функції

Таблиця 1. Типи класів онтологічної моделі

Класи	Приклади
описують середовище	локація, регіон, територія, перешкоди; погодні умови; динамічні об'єкти;
описують БпЛА	тип, сенсори, актуатори; стан, орієнтація, заряд батареї; обмін даними;
описують агентів	роль; завдання; сценарій;
описують місії	тип місії; пріоритет; крайній термін; ресурси; статус;
описують обмінювання даними	тип повідомлення; канал зв'язку; якість зв'язку;
описують процеси	події; стани; переходи.

можливості в межах групи; та *гнучкість*, оскільки агенти можуть потенційно перемикатися між ролями залежно від ситуації або адаптувати свою поведінку в рамках своєї призначеної ролі, що призводить до динамічнішої та адаптивнішої поведінки групи.

Створення єдиної всеохоплювальної онтології, яка фіксує кожен можливу місію для групи БПЛА, неможливе. Технології для групи та ролю БПЛА швидко розвиваються, що з часом призводить до появи нових типів місій і сценаріїв. Також визначення дуже специфічних класів для кожної уявної місії може призвести до надто складної та громіздкої онтології. І навпаки, використання надто широких класів може не мати необхідних деталей для відтворення нюансів різних місій. Конкретні місії, підходящі для групи БПЛА, значною мірою залежать від різних контекстуальних факторів, як то правила чи умови навколишнього середовища, і на жаль онтологія не може повністю охопити всі ці контекстуальні варіації.

Однак ми можемо розробити основну структуру онтології, яку можна розширити та адаптувати для подання різних місій для групи БПЛА. Визначаючи нові підкласи місій і наповнюючи їх відповідними властивостями, онтологія може врахувати еволюцію місій, сценаріїв та планів для групи БПЛА, не стаючи надто складною або застарілою.

Онтологія застосовується для ефективнішого подання контексту місії, цілей і можливих дій для усіх агентів у групі, даючи їм змогу співпрацювати та адаптуватися для досягнення бажаного результату [34]. У контексті онтологій для групи БПЛА клас **Scenario** місій є придатнішим, ніж **Plan** місій.

Сценарії описують загальний контекст і цілі місії, вони надають ширшу картину того, чого рій має досягти, охоплюючи середовище, потенційні проблеми та бажані результати. *Сценарії є гнучкими та адаптивними*, оскільки дають змогу застосовувати різні підходи та приймати рішення на основі ситуацій у реальному часі, що є надзвичайно важливим для автономних груп у динамічних середовищах. *Сценарії можуть бути подані в онтології за допомогою понять і відношень, застосовуючи встановлений словник та ієрархію онтології*, вони можуть бути легко зрозумілі та інтерпретовані всіма агентами в групі.

Плани описують конкретну послідовність дій для виконання групою, тобто є жорсткішими і менш адаптивними до мінливих умов. *Плани можуть бути не підходящими для складних або динамічних середовищ*, оскільки за непередбачуваних обставин можуть вимагати відхилення від плану, що потенційно може призвести до неефективності або навіть провалу місії. *Плани можна подати в онтології, проте знадобляться додаткові деталі та обмеження*, що є додатковою складністю, і може зробити їх менш ефективними і гнучкими порівняно зі сценаріями місій.

Однак зазначимо, що **Plan** може входити до **Scenario** для певних сценаріїв місій як:

- *підзавдання в рамках сценарію місії* — якщо сценарій місії містить різні підзавдання з конкретними діями, які необхідно виконати, можна використовувати плани місії для детальнішого визначення цих підзавдань;
- *запасні плани або заходи на випадок надзвичайних ситуацій*, де попередньо визначені плани місії можуть діяти як резервні варіанти на випадок, якщо основний сценарій місії стає нездійсненим через непередбачувані обставини.

В онтології, яка описує групу БпЛА, ієрархія для класу Mission відповідатиме відношенню *частина-ціле* зі структурою (Табл. 2).

Візуальне подання ієрархічної структури відношень між класами **Mission**, **Scenario**, **Plan**, **Action** (Рис. 1).

Таблиця 2. Класи з ієрархією для класу Mission

Клас	Опис
Mission	Найзагальніший клас на вершині ієрархії, який описує загальне завдання, призначене БпЛА або рою.
Scenario	Частина класу Mission . Місія може бути пов'язана з одним або декількома сценаріями, кожен з яких описує різний можливий контекст або ситуацію, в якій місію може бути виконано.
Plan	Інша частина класу Mission , але відмінна від класу Scenario . Місія може мати один або кілька пов'язаних планів, кожен спеціально розроблений для конкретного Scenario . План окреслює детальний план дій для виконання місії в контексті конкретного сценарію.
Action	Найспецифічніший клас у нижній частині ієрархії. Кожен план складається з послідовності дій, які є окремими кроками або завданнями, які необхідно виконати для досягнення мети місії.

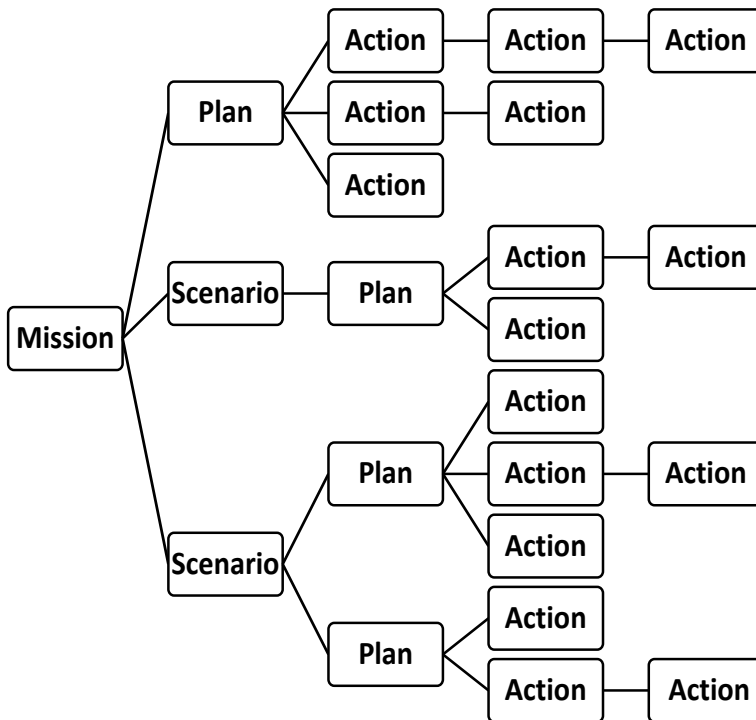


Рис. 1. Ієрархічна структура, що відображає відношення між класами Mission, Scenario, Plan, Action

Тобто, місія може існувати самостійно та охоплювати різні сценарії та плани. Сценарій завжди пов'язаний із конкретною місією та забезпечує контекст для плану. План завжди створюється для конкретної місії та адаптується до конкретного сценарію. Дія завжди є частиною плану та сприяє досягненню мети місії в рамках конкретного сценарію. Така організація відображає логічний потік інформації всередині групи БПЛА:

1. групі БПЛА призначається місія;
2. розглядаються доступні сценарії, пов'язані з місією;
3. для кожного відповідного сценарію розробляється план, який окреслює конкретні дії, необхідні для досягнення мети місії за цих умов;
4. окремі дії виконуються в рамках обраного плану для виконання місії.

Подання конкретних типів груп БПЛА з унікальними характеристиками в онтології залежати від необхідного рівня деталізації. Основні класи описано в Табл. 3.

Для поєднання окремих дронів до подання груп БПЛА в онтології передбачено використання відношень ієрархічної структури. Клас UAV утворює основу ієрархії, подаючи окремі БПЛА, а таке відношення як **hasMember** з'єднує клас **Group** із класом **UAV**, вказуючи, які окремі БПЛА є членами групи, рою або формування.

Крім того, для акцентування важливості окремих ролей в групі, клас **Role** розширюється додатковими відношеннями між класами **UAV** та **Group**, вказуючи, які БПЛА в групі виконують певні ролі. Це розширення підвищує здатність онтології охоплювати різноманітні функції та обов'язки в межах групи БПЛА.

Така структура є придатною для керування різноманітною групою динамікою в складних системах БПЛА та забезпечує:

- **гнучкість** — структура вміщує групи різного розміру та призначення, не вимагаючи додаткових екеземплярів класу. Це забезпечує ефективне подання різноманітних групових формувань і спільних завдань у межах групи;

Таблиця 3. Класи подання типів груп БПЛА

Клас	Опис
Group	Загальний клас, який описує набір БПЛА, що діють разом для досягнення спільної мети. Клас охоплює такі атрибути як ідентифікатор групи, ідентифікатор місії, розмір, композицію (перелік конкретних БПЛА, які зараз знаходяться в групі).
Swarm	Підклас Group , описує більшу та складнішу групу БПЛА, яка демонструє ройову поведінку. Підклас успадковує всі атрибути класу Group та долучає атрибут емерджентної поведінки (описує тип групової поведінки, яку демонструє рій).
Formation	Підклас Group , описує конкретну конфігурацію або розташування БПЛА в межах групи для певної мети. Підклас успадковує всі атрибути класу Group , долучає тип формування (лінія, V-подібна форма, коло) та мету формування (мета або переваги обраного формування).

- **масштабованість** — ієрархічна структура легко адаптується до зростання кількості БпЛА та груп у системі. Коли рій розширюється або звужується, онтологія може легко відображати ці зміни, не вимагаючи значних модифікацій;

- **чіткість** — відокремлення окремих БпЛА та груп сприяє чіткому розмежуванню між об'єктами, одночасно забезпечуючи їх зв'язок через чітко визначене відношення **hasMember**. Ця ясність полегшує ефективне подання знань і міркування в системі на основі онтології.

ОНТОЛОГІЧНА МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ДЛЯ БПЛА

Застосунок МАС, будучи інтелектуальною системою, забезпечує гнучкість для покращення надійної та успішної взаємодії між елементами групи БпЛА. Система здатна вирішувати проблеми координації та оптимізації, а також адаптуватися до неочікуваних складних ситуацій функціонування групи. Агент може не тільки отримувати завдання, але й проявляти ініціативу, щоб запитувати завдання, обмінюючись ними з іншими агентами для співпраці, координації або обміну даними. МАС добре адаптується до складних і розподілених форм завдань і зменшує участь людини в процесі прийняття рішень.

Основою мультиагентного підходу є концепція віддаленого та інтелектуального програмного агента, який реалізується та функціонує як самостійна спеціалізована комп'ютерна програма або елемент штучного інтелекту. Агенти можуть самостійно визначати, як найкраще досягти своїх цілей і виконувати свої завдання, і володіють такими властивостями, як автономія, активність, проактивність і соціальна поведінка [29].

Застосування онтології в МАС на різних етапах розроблення може забезпечити підтримку процесів пошуку, повторного використання інформації та знань, підтримку процесів аналізу інформації, а також забезпечити обмін даними між агентами.

Агент повинен отримувати, зберігати та обробляти інформацію щодо поточного стану предметної області (ПрО). Знання агента щодо навколишнього середовища, про інших агентів і самого себе визначаються як онтологія. Онтологія — це підхід, який може вирішити проблему неоднорідного узагальнення різнорідних даних низького рівня в моделі вищого рівня, а також ефективний інструмент для обміну даними та системної інтероперабельності [35].

Інтеграція семантичних технологій [36] у МАС покращує особливості подання знань і можливості аргументації застосунків, розроблених відповідно до цих парадигм [37]. Крім того, застосування онтологій в МАС надає можливості для створення логічних правил, які в свою чергу використовуються для семантичного міркування та отримання нових знань.

Розроблення поведінки та взаємодії агентів у МАС стосується моделей обмінювання даними агентів як між собою, так і з наземною станцією керування. Структура обмінювання даними агента зазвичай охоплює повідомлення (вміст повідомлення) та обмін повідомленнями (наприклад, протокол KQML). Контент повідомлення складається з двох частин: мови контенту (забезпечує синтаксис або граматику контенту) та онтології (яка відображає семантику або словниковий запас повідомлення) [38]. Показано модель обміну даними агента на основі онтології (Рис. 2).

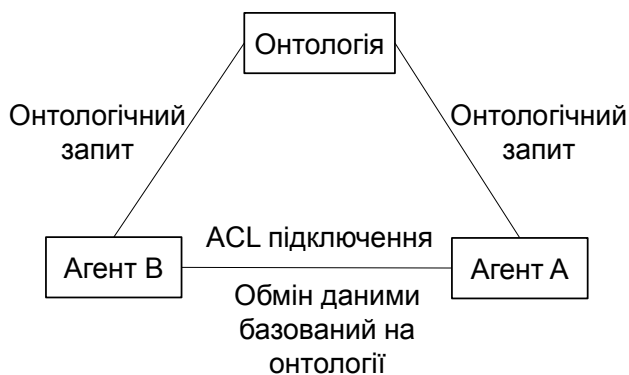


Рис. 2. Модель обміну даними між агентами на основі онтології [39]

Застосування онтології для обміну даними в МАС забезпечує надійну взаємодію та співпрацю між агентами, що у загальному підсумку призводить до покращення продуктивності та ефективності МАС. Перевагами застосування такої моделі обмінювання даними є [40]:

1. *Покращена інтероперабельність.* Онтології визначають загальний словник і значення даних, гарантуючи, що всі агенти розуміють інформацію, якою обмінюються. Це зменшує неоднозначність та неправильну інтерпретацію. Крім того, дотримуючись стандартної онтології, розробникам не потрібно створювати власні формати даних для кожного агента, що економить час і ресурси;

2. *Підвищена чіткість і послідовність даних.* Онтології явно визначають значення елементів даних, охоплюючи їхні відношення та властивості. Це сприяє чіткості та узгодженості подання даних, полегшуючи агентам інтерпретацію та ефективне використання інформації. Чіткі визначення мінімізують ризик помилок через непорозуміння або невідповідності в інтерпретації даних;

3. *Покращені міркування та прийняття рішень.* Онтології можуть кодувати складні знання про ПрО, даючи змогу агентам міркувати, робити висновки та приймати обґрунтовані рішення на основі даних, якими обмінюються. Це забезпечує «розумнішу» та адаптивнішу поведінку. Онтології можуть полегшити обмін предметно-специфічними знаннями між агентами, збагачуючи їхнє розуміння та даючи змогу спільно вирішувати проблеми;

4. *Підвищені гнучкість і масштабованість.* Онтології часто є модульними, що дає змогу їх легко розширювати та адаптувати до нових вимог, не впливаючи на наявні функції. Це робить систему адаптованішою до мінливих потреб. Стандартизовані онтології можна застосовувати для інтеграції з іншими системами, які також використовують той самий словник, забезпечуючи ширший обмін інформацією та взаємодію;

5. *Покращене документування.* Онтології діють як добре задокументована модель подання даних, що полегшує розуміння, підтримку та модифікацію системи в майбутньому.

Оскільки агенти спілкуються за допомоги обміну повідомленнями, для розробки МАС може використовуватись стандарт FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents – www.fipa.org) [39]. У FIPA [41] онтологія містить перелік понять, предикатів і дій, специфічних для задач обмінювання даними [38].

Мова спілкування між агентами у FIPA — ACL (Agent Communication Language). За таких умов вміст повідомлення посилається на конкретні концепти, відношення та атрибути, визначені в рамках спільної онтології, забезпечуючи чітке та однозначне тлумачення всіма агентами-учасниками. Кожне повідомлення FIPA ACL містить такі елементи:

- **Sender** — ідентифікатор агента, який надсилає повідомлення;
- **Receiver** — ідентифікатор агента одержувача або ідентифікатор групи одержувача повідомлення;
- **Performative** — тип повідомлення;
- **Content** — фактичні дані, якими обмінюються, подані за допомоги спільної онтології.
- **Ontology** — посилання на конкретну онтологію, яка використовується для інтерпретації повідомлень.

Типи повідомлень FIPA, що стосуються елементу **Performative** охоплюють:

- **Inform**, для обміну інформацією щодо навколишнього середовища, оновлення місії або даних сенсорів;
- **Request**, для запиту інформації або дій від інших агентів;
- **Agree/Refuse**, для відповіді на запити, із зазначенням прийняття чи відмови.

Процес обмінювання даними охоплює такі етапи:

1. *визначення агентом потреби для обміну даними*: на основі вимог місії, даних сенсорів або змін навколишнього середовища агент вирішує поділитися інформацією;
2. *побудова повідомлення*: агент використовує онтологію для подання запланованої інформації (наприклад, поточне місцезнаходження, данні сенсорів, оновлення місії);
3. *кодування повідомлення*: інформація кодується в структурі повідомлення FIPA ACL із посиланням на відповідну онтологію;
4. *пересилання повідомлення*: повідомлення пересилається призначеному одержувачу(ам) за допомоги протоколів зв'язку FIPA;
5. *отримання повідомлення*: агент-одержувач декодує повідомлення на основі формату ACL FIPA та онтології;
6. *оброблення інформації*: отримана інформація інтерпретується та інтегрується в базу знань отримувача, потенційно впливаючи на прийняття ним рішень і дій.

Наведемо приклад обміну даними сенсорів застосовуючи FIPA та онтологію. Маємо такий *сценарій*: БПЛА-1, оснащений сенсорами, виявляє нову перешкоду в своєму оточенні та хоче повідомити іншим агентам групи про це відкриття. Онтологія у свою чергу містить екземпляр класу **Obstacle** з такими властивостями, як **type** (будівля, дерево), **location** (координати) і **size**. Тоді БПЛА-1 створює повідомлення з такими деталями:

- Sender:** агент БПЛА-1;
- **Receiver:** усі інші агенти групи (широкомовне повідомлення);
 - **Performative:** для обміну інформацією;
 - **Content:** закодовано з використанням онтології (використання екземпляру класу **Obstacle**):
 - **type:** (визначено БПЛА-1 за даними сенсорів);
 - **location:** (поточне розташування перешкоди);
 - **size:** (приблизний розмір на основі даних сенсорів);
 - **Ontology:** посилання на спільну онтологію, яку застосовують усі агенти.

Зазначимо, що БПЛА-1 може знадобитися сегментувати дані на кілька повідомлень залежно від протоколів зв'язку та обмежень розміру повідомлення. Агенти-одержувачі можуть надіслати відповідь для БПЛА-1, як повідомлення підтвердження успішного одержання. Онтологію може бути розширено додатковими властивостями перешкод для забезпечення повноти обміну інформацією.

Під час розроблення архітектури МАС синтаксис і семантика вводяться для визначення загальної онтології верхнього рівня [42]. Онтологія цього типу описує загальні поняття, використовувані в системі, тоді як синтаксис і семантика для онтології ПрО та онтології, специфічної для агента, описуватимуть цілі та функції онтологій [43, 44].

Розробляючи архітектуру МАС, виділимо такі основні компоненти:

- *сервіс доступу* — цей сервіс надає доступ до атрибутів агентів, даючи змогу іншим компонентам МАС та зовнішнім системам отримувати необхідну інформацію про агентів. Сервіс може містити дані щодо стану агента, його можливостей, цілей та місцезнаходження.

- *сервіс повідомлень* — цей сервіс відповідає за пересилання повідомлень між агентами, а також між агентами та зовнішніми системами. Ця система може забезпечувати надійну та безпечну доставку повідомлень, а також маршрутизацію повідомлень до відповідних одержувачів.

- *бібліотека агентів* — ця бібліотека містить інформацію щодо класифікації агентів у МАС та може охоплювати описи типів агентів, їхніх можливостей, поведінки та ролей у системі.

- *модуль взаємодії агентів* — цей компонент забезпечує життєдіяльність агентів та може охоплювати функції завантаження та вивантаження агентів, а також керування їхніми ресурсами. Цей компонент оптимізує роботу агентів для забезпечення максимальної продуктивності та ефективності.

- *онтологія* — ця база знань містить знання про світ, в якому функціонують агенти, а також про виконувані ними дії. Онтологія також містить знання для самопізнання агентів, у тому числі оновлені дані щодо їх стану та навколишнього середовища.

Архітектура МАС для групи БПЛА з використанням онтологічного підходу охоплюватиме кілька модулів онтологій:

1. Основна онтологія

- **Agent** клас описує всі окремі об'єкти в системі, у тому числі БПЛА, наземні станції керування та будь-яких інших учасників;
- **Mission** клас описує загальну ціль або завдання, яке виконує рій БПЛА;
- **Role** клас класифікує різні типи агентів у рої, кожен з яких має певні функції та обов'язки (наприклад, розвідник, лідер, послідовник, комунікатор);
- **Leader:** відповідає за координацію рою та прийняття рішень високого рівня;
- **Follower:** виконує завдання, поставлені лідером;
- **Scout:** досліджує довкілля та збирає інформацію;
- **Environment** клас фіксує фізичне та робоче середовище, в якому працює рій, включно з відповідними характеристиками, такими як місцевість, перешкоди та погодні умови;
- **Location** клас описує географічні координати або відносне розташування в навколишньому середовищі;
- **Communication** клас визначає типи повідомлень, перформативи (наприклад, інформувати, запит) і протоколи обміну даними.

2. **Онтологія агента, яка** успадковує базовий клас **Agent** з основної онтології і визначає додаткові властивості, характерні для БПЛА:

- **Position** розташування БПЛА в навколишньому середовищі;
- **Sensor** інформація про сенсори, встановлені на БПЛА;
- **Opportunities** специфічні функції БПЛА (наприклад, пересування, зв'язок, оброблення даних);
- **Belief:** інформація, яку сприймає БПЛА, і яка вважається правдивою;
- **Desire** цілі або завдання, яких має досягти БПЛА;
- **Intentions** запланований курс дій для досягнення «бажань» БПЛА.
- **Plan** клас описує послідовність дій, які агент має намір виконати для досягнення своїх цілей.
- **Event** клас описує подію в середовищі, яка має відношення до агента.

3. **Онтологія місії, яка** успадковує основний клас **Mission** та визначає підкласи для конкретних типів місії. Кожен підклас може мати такі властивості, як:

1. **Environmental Monitoring:** поняття, пов'язані з параметрами навколишнього середовища (температура, забруднення), показаннями сенсорів і виявленням аномалій.

- **Scenario;**

- **Objectives** – конкретні цілі, яких має досягти група під час місії;

- **Requirements** – ресурси, можливості або умови середовища, необхідні для виконання місії;

- **Limitation** – обмеження, які слід враховувати під час планування та виконання (наприклад, правила, безпека);
- **Plan;**
 - **Takeoff:** передумова – достатній рівень заряду батареї; ефект – стан повітря;
 - **Navigate to location:** передумова – знання цільового місцезнаходження; ефект – прибуття в призначене місце;
 - **Deploy sensor:** передумова – сенсор доступний; ефект – сенсор активно збирає дані;
- 2. **Surveillance:** поняття, пов’язані з цілями, методами виявлення та аналізом даних;
- 3. **Search and Rescue:** поняття, пов’язані зі зниклими безвісти людьми, районами пошуку та процедурами порятунку;
- 4. **Delivery:** поняття, пов’язані з пакунками, місцями доставки та плануванням маршруту.
- 4. **Онтологія обміну даними** визначає протоколи обмінювання даними та формати повідомлень, які використовують агенти всередині групи. Це дає змогу агентам обмінюватися інформацією щодо своїх переконань, бажань, намірів та загального стану місії.

- **Message type** — (інформація про стан, завдання, підтвердження, попередження);
 - **Content** — (описує конкретну інформацію, яка міститься в повідомленні);
 - **Topic** — (описує предмет або сферу, яка потребує уваги, і якої стосується повідомлення);
 - **Effect** — (описує бажаний результат або ефект повідомлення);
 - **Communication channel** — (тип, пропускна здатність, затримка);
 - **Communication quality** — (сигнал, шум, помилки);

5. **Модуль прийняття рішень**, кожен агент використовує онтології для міркувань щодо середовища, місії та дій інших агентів. Ця здатність міркувати допомагає їм приймати обґрунтовані рішення щодо власних дій і адаптувати свою поведінку відповідно до ситуації.

На рис. 3 наведено мультиагентну систему групи БПЛА на основі онтології. **Перевагами цієї архітектури є: взаємодія, оскільки** спільна онтологія дає змогу різним програмним компонентам і агентам розуміти та обмінюватися інформацією на основі спільного розуміння понять; **гнучкість** — модульна конструкція дає змогу легко розширювати та адаптувати для різних типів завдань і включати нові функції; **прозорість, оскільки** явне подання знань в онтологіях полегшує розуміння та налагодження поведінки системи; **масштабованість, оскільки** архітектуру можна масштабувати для більших груп і складніших сценаріїв місій.

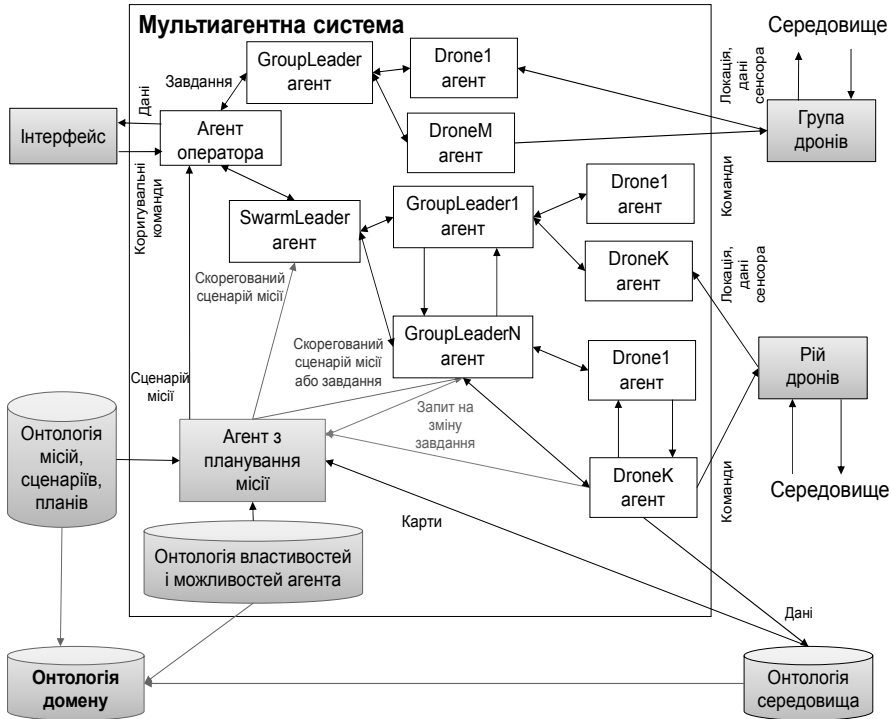


Рис. 3. Взаємодія мультиагентної системи та БПЛА на основі онтології

Актуальність онтології в МАС полягає в можливості вирішення проблеми інформаційного переповнення мережі [45]. Основними проблемами, які успішно вирішуються на основі онтологій є:

- створення логічних висновків, які повинні формуватися на запит від користувача або агента;
- фільтрація та класифікація інформації;
- індексація зібраної інформації;
- організація загальної термінології, яку програмні агенти та користувачі можуть використовувати для обміну даними.

Через складність і специфічні функції МАС, що вимагають поєднання математичних інструментів і структур, немає єдиної загальноприйнятої формули для подання МАС. Однак ми можемо концептуалізувати подання високого рівня за допомогою теорії множин і функцій:

$$MAS = \langle A, E, P, B, C, \pi, G_k, M, \delta, U, metric \rangle$$

Ключові аспекти концептуального опису МАС з фіксуванням її компонентів, взаємодії та поведінки (Табл. 4).

Таблиця 4. Ключові аспекти формалізованого подання MAC

Компонент	Опис
Агенти A	Набір автономних об'єктів, поданий як $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, де n — кількість агентів.
Середовище E	Середовище можна подати як простір станів E , який містить усі можливі стани середовища. Це може бути дискретний набір ($E = \{\text{state1, state2, ...}\}$) або безперервний ($E \in R^m$, де R — множина дійсних чисел, а m — кількість вимірів середовища).
Можливості C_i	Кожен агент a_i має набір можливостей, C_i , який визначає його можливі дії, їх можна подати як функцію $C_i: E \rightarrow \langle \text{набір дій} \rangle$. Ця функція відображає сприйняття середовища агентом набору дій, які він може виконати в цьому стані.
Сприйняття $P_i(t)$	На кожному кроці часу t агент a_i сприймає підмножину стану середовища, позначену через $P_i(t) \subseteq E$. Це сприйняття може бути обмеженим або зашумленим залежно від сенсорів і можливостей агента.
Переконання $B_i(t)$	Грунтуючись на сприйнятті та внутрішніх міркуваннях, кожен агент a_i підтримує стан переконань $B_i(t)$. Їх можна подати як набір пропозицій про середовище, які агент вважає істинними. Ці переконання можуть не повністю відображати справжній стан навколишнього середовища через обмежене сприйняття та невизначеність.
Функція прийняття рішень π	Функція $\pi(a_i, P(a_i, t))$, зіставляє a_i сприйняття агента з дією ($\pi: E \times A \rightarrow \text{Дії}$)
Канали зв'язку G_k	Мережу зв'язку можна подати як граф $G_k = (A, K_c)$, де A — набір агентів (вузлів), а $K_c \subseteq A \times A$ — набір каналів зв'язку (ребра). Грань (a_i, a_j) в K_c вказує на те, що агент a_i може безпосередньо спілкуватися з агентом a_j .
Повідомлення M	Агенти можуть обмінюватися повідомленнями M через канали зв'язку K_c . Ці повідомлення можуть містити інформацію про переконання агента, наміри або запити на інформацію.
Функція оброблення повідомлень δ	Функція $\delta(a_i, m)$ — як агент a_i інтерпретує повідомлення $m(\delta: A \times M \rightarrow ?)$, де виводом може бути оновлений стан віри, надіслання іншого повідомлення тощо.
Функція корисності U	Функція корисності $U: E \times A \rightarrow R$ призначає реальне значення кожній комбінації стану середовища $E(t)$ та агента a_i . Це означає «задоволення» або «винагороду», яку отримує агент у певному стані.
<i>metric</i> -показники ефективності	<p><i>Середня корисність агента:</i> $(1/n) * \sum(U(E(t), a_i))$, де n — загальна кількість агентів у MAC; $U(e(t), a_i)$ — функція корисності, оцінена за станом середовища $E(t)$ та агентом a_i на кроці часу t. Підсумовування повторюється по всіх агентах a_i і всіх часових кроках t у межах розглянутого періоду часу. Кінцевим результатом є середня корисність для всіх агентів і часових кроків, що забезпечує загальну міру задоволеності агента в межах MAC.</p> <p><i>Швидкість виконання завдань:</i> $\sum(T_c(t))/T_t$, де $T_c(t)$ — двійкова функція, яка вказує на успішне виконання завдання на кроці часу t (1 для успіху, 0 для невдачі); T_t — загальна кількість завдань, виконаних протягом розглянутого періоду часу. Підсумовування повторює всі часові кроки t, на яких було виконано завдання. Ця формула обчислює частку успішно виконаних завдань із загальної кількості спроб, забезпечуючи міру загального виконання завдань у межах MAC.</p> <p><i>Використання ресурсів:</i> $(1/R) * \sum(R_u(t))$, де R — загальна кількість доступних одиниць ресурсу в межах MAC; $R_u(t)$ — кількість ресурсів, використаних на кроці часу t. Підсумовування повторюється по всіх кроках часу t. Ця формула розраховує середнє використання ресурсів як частку від загальної кількості доступних ресурсів. Значення ближче до 1 вказує на високе використання ресурсів, тоді як значення ближче до 0 вказує на недостатнє використання ресурсів.</p>

Таким чином, кожен БпЛА, який ми моделюємо, як агент, повинен рухатися, сприймати свій стан і середовище, слідувати плану, досягати мети, взаємодіяти та адаптувати поведінку. Щоб розглянути складну взаємодію між агентами та охопити необхідні гетерогенні властивості, ми змодельовали агента БпЛА як архітектуру переконання-бажання-намір (BDI-агент) [46].

Архітектура BDI-агента — це набір сценаріїв, які визначають засоби, за допомоги яких агент досягає кінцевої мети функціонування. Сценарії містять мітки голови, тіла та хвоста робочого алгоритму агента. Теги тіла сценарію — це послідовності дій, які визначають цілі, яких повинен досягти агент, і умови, які агент повинен перевірити. Мітки голови та хвоста сценарію є намірами, де агент має попередньо визначений перелік намірів. У кожен момент, коли агент вибирає сценарій виконання, намір може бути активним або неактивним. Коли агент вибирає якийсь сценарій виконання, він виконає його лише тоді, коли всі наміри в його голові активні. Після виконання сценаріїв агент робить ці наміри неактивними та робить усі кінцеві наміри сценарію активними. Припустимо, що поточний набір активних намірів не порожній. Тіло сценаріїв і кінцевий набір намірів можуть бути порожніми.

У цих термінах він може сприймати агента як набір переконань B , сценаріїв-планів P , ситуацій S , дій A та намірів I . Коли агент помічає зміни в оточенні, він вважає, що подія E сталася. Ці події є деякими ситуаціями з середовища S . Фіксування події агентом полягає в зміні стану його міркувань, у наборі якогось переконання з B . Під цим переконанням і бажанням (яке визначається деяким сценарієм-планом з P) агент виконує деякі наміри з I , які є послідовністю дій з A . Ці дії складають план досягнення поставленої мети. Таким чином, запланована дія визначається обраним сценарієм-планом з P . Потім він виконує ці дії, змінюючи поточну ситуацію в середовищі.

На рис. 4 наведено модель агента БпЛА, який базується на онтології та реалізований для руху, сприйняття, виконання сценарію, взаємодії та адаптації поведінки, керування навичками. Переконання пов'язані зі схильностями під час виконання завдання. Вони можуть оновлюватися відповідно до знань щодо середовища та самопізнання агента. Агент БпЛА має перевірити кожне переконання на відповідність логічним правилам із самопізнання та цільової функції.

Агент БпЛА мотивований на досягнення якоїсь однієї мети, що неможливо без плану. Онтологія сценаріїв розглядає наміри та прагнення для визначення дій, на які впливатиме середовище. Через складні та нестабільні середовища, які можуть вивести з ладу або знищити агентів, місія агента може змінитися. Таким чином, проблеми динамічного розподілу завдань мають велике значення для вдосконалення координованих можливостей агентів МАС [42, 46].

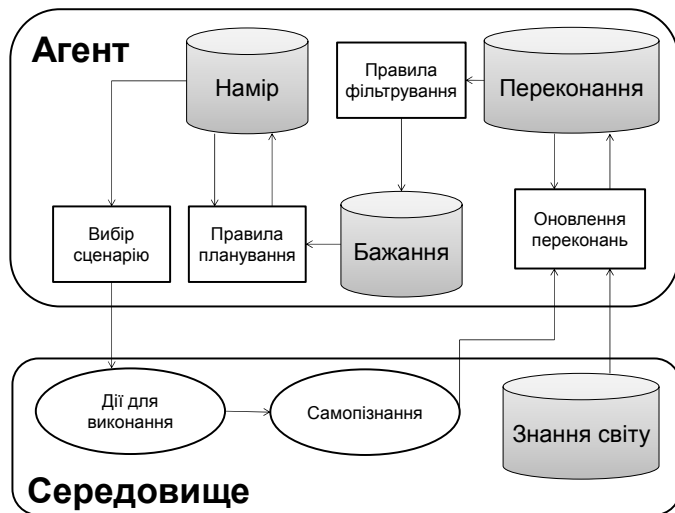


Рис.4. Модель BDI для агентів БПЛА

Запропонований метод передбачає створення ролі для визначення поведінки моделі агента, яка створює ієрархічну координацію. Модель передбачає часткове підключення до кількох найближчих агентів за обмеженого часу. Кожен агент БПЛА може взаємодіяти лише тоді, коли його найближчі сусіди знаходяться в межах визначеного діапазону. Взаємодія агентів БПЛА для прийняття рішення щодо виконання місії потребує взаємодії між агентами та онтологією середовища, що є досить ресурсозатратним процесом.

Крім того, ієрархічна модель групи БПЛА охоплює ролі для керування цією групою неоднорідністю та обміном даними згідно з потенційним часом польоту, обміном даними та прийняттям рішень. Наприклад, SwarmLeader або GroupLeader має бути головним у прийнятті рішень і спілкуванні, і підлеглим щодо часу польоту. Його роль полягає у прийнятті фундаментальних рішень для завершення місії. Тому агент GroupLeader повинен мати короткі шляхи для надсилання та отримання повідомлень від інших агентів. Наприклад, коли група БПЛА зустрічає перешкоду, потрібно змінити траєкторії та структуру формування. SwarmLeader або GroupLeader може застосувати заздалегідь визначену траєкторію місії для реорганізації групи БПЛА.

У МАС модель BDI відіграє важливу роль в створенні інформації щодо місії. Переконання є мотивацією для виконання завдань після врахування своїх можливостей, обмежувальних умов та середовища. Переконання стосується таких можливостей, як рух, навігація та визначення положення, отриманих від апаратного забезпечення БПЛА, а також можливостей обчислення, оброблення та обміну даними, отриманих від агента дрона. Бажання демонструє очікувані результати, наприклад, право виконувати конкретну місію. Намір означає спосіб вирішення місії в списку бажань. Якщо місія зазнає невдачі, система консультуватиметься з іншими агентами для її покращення, наприклад, коли та як змінити формування.

ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПЕРЕПРИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАНЬ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Перед початком місії формується сценарій комплексних завдань на основі інформації з онтології зовнішнього середовища. Потім складні завдання розбиваються на кілька підзавдань і розподіляються між агентами відповідно до їхніх можливостей. Інколи під час призначення певних місій є важливішим порядок виконання конкретних завдань, ніж максимальна перевага кожного окремого агента. Це може суттєво зменшити доцільність розподілу і не бути ефективним та оптимальним у разі розподілу місій без урахування релевантності між агентами та такими місіями.

Наприклад, у випадку коли середовище змінилося або агент зіткнувся з ситуацією несправності під час виконання місії, а завдання виконується згідно з діями попереднього сценарію, ефективність місії буде знижена або неможлива. Також, причиною обмежень іноді є те, що для виконання місії потрібні агенти, дії яких скоординовані у певному логічному порядку (послідовності), а не лише робота одного агента. Таким чином, для вирішення складних і тісно пов'язаних етапів місії вводиться механізм для групи агентів, який можна розділити на два типи: один вимагає від агентів паралельного оброблення даних, наприклад, спільного патрулювання; а інший вимагає від агентів суворого дотримання просторового та хронологічного порядку, наприклад, удар після розвідки [47]. Тому виникає необхідність перерозподілу підзадач у режимі реального часу відповідно до можливостей кожного агента.

Розумний перерозподіл змусить МАС адаптуватися до обставин частоті зміни етапів місії, що не тільки збільшить використання ресурсів, але й підвищить ефективність обчислень. Механізм керування перерозподілом показано (Рис. 5).

Різні групи агентів виконують етапи місії з різним рівнем пріоритету, тому пошук найвідповіднішої групи є важливим, але це також ускладнить задачу оптимізування роботи системи.

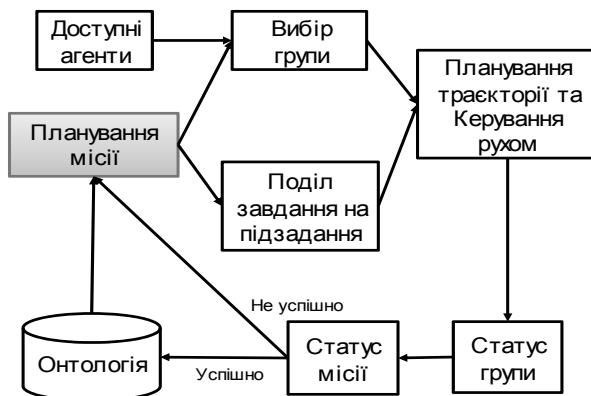


Рис. 5. Механізм керування перерозподілом етапів місії

Процес призначення завдань кожному БПЛА із групи охоплює:

- **ініціалізацію**, коли кожному БПЛА призначають підзавдання на основі його початкових можливостей і вимог місії (витягнутих з онтології). Оцінюється «придатність» кожного БПЛА до поточного призначення. Цей показник «придатності» відображає такі фактори, як:

- *вимоги місії*, відповідність можливостей БПЛА (наприклад, вантажопідйомності, радіусу дії сенсорів) до потреб місії;
- *відстань і ефективність*, мінімізація загальної відстані шляху та максимальне використання ресурсів для вибраних БПЛА;
- *балансування навантаження*, рівномірний розподіл робочого навантаження між вибраними БПЛА, щоб уникнути перевантаження;
- *фактори середовища*, врахування погодних умов, перешкод або будь-яких обмежень навколишнього середовища, що впливають на продуктивність БПЛА;
- *пріоритет місії*, визначення пріоритетності конкретних місій або термінових вимог;

- **обмін інформацією**, БПЛА спілкуються зі своїми сусідами всередині групи, обмінюючись інформацією щодо своїх поточних підзавдань та пов'язаними з ними показниками фізичного навантаження. Такому обміну інформацією сприяє онтологія, забезпечуючи спільне розуміння завдань і можливостей.

- **оновлення «швидкості»**, на основі спільної інформації кожен БПЛА оновлює свою «швидкість», що є напрямком і величиною зміни в його призначенні підзавдання для наступної ітерації. Це оновлення враховує:

- власну поточну оцінку «придатності»;
- найкращу оцінку придатності (найефективніше призначення підзавдання), виявлену поточним БПЛА (локальне найкраще);
- найкращий показник «придатності», виявлений будь-яким із його сусідів (глобальне найкраще) у діапазоні обмінювання даними;

- **перепризначення підзавдання**, використовуючи оновлену «швидкість», кожен БПЛА коригує своє поточне призначення підзавдання. Це може охоплювати:

- перехід на інше підзавдання, якщо воно пропонує кращий показник «придатності».
- аналізування підзавдань, призначених наразі сусідам, якщо вони здаються придатнішими базуючись на спільній інформації.

- **припинення**, ці кроки (обмін інформацією, оновлення швидкості, повторне призначення) повторюються ітеративно.

Розглянемо детальніше механізм керування перерозподілом етапів місії для групи БПЛА у онтологічній МАС, яку умовно можна поділити на п'ять етапів: формулювання місії; моніторинг місії; ініціація перерозподілу підзадач; перерозподіл; обмін даними та виконання.

1. Формулювання місії — місії формалізовано та описано в *онтології* з використанням спеціальних класів і властивостей, де кожна місія має такі атрибути, як:

- тип (наприклад, спостереження, доставка, пошук і порятунк);
- розташування (визначається за допомоги просторових онтологій);
- вимоги до ресурсів (наприклад, сенсори, вантажопідйомність);
- рівень пріоритету;
- термін.

2. Моніторинг місії, коли кожен агент постійно контролює свій *внутрішній стан* (наприклад, рівень заряду батареї, стан пошкоджень, дані сенсорів) і *зовнішнє середовище* (за допомоги вбудованих сенсорів і інформації, отриманої від інших агентів). Ця інформація зберігається та оновлюється в *онтології* з використанням певних властивостей і відношень.

3. Ініціація перерозподілу задіюється, коли відбувається *подія*, яка потребує зміни в призначенні завдань місії. Це може бути:

- *збій агента*, якщо агент стає непрацездатним, його призначені місії потребують перерозподілу;
- *зміна навколишнього середовища*, зміна погодних умов, перешкод або цільових місць може вимагати перерозподілу місії для оптимальної продуктивності;
- *вичерпання ресурсів*, якщо ресурсів агента (наприклад, акумулятора) стає недостатньо для виконання призначеної місії, може знадобитися перерозподіл.

4. Перерозподіл – онтологія слугує центральною базою знань для процесу перерозподілу. Спеціальний *алгоритм перерозподілу* працює в компоненті МАС та використовує таку інформацію з онтології:

- **доступні місії;**
- **можливості агента (наприклад, ємність корисного навантаження, радіус дії сенсора);**
- **стан і місцезнаходження агента в реальному часі;**
- **дані природних умов;**
- **пріоритети місії.**

Під час призначення або перепризначення місії *алгоритм перерозподілу* враховує такі фактори:

- *придатність агента, тобто* відповідність можливостей агента вимогам місії;
- *відстань і ефективність*, мінімізація відстані шляху переміщення та максимізація використання ресурсів;
- *пріоритет* критичних місій і термінів виконання;
- *балансування навантаження*, рівномірний розподіл робочого навантаження між агентами, щоб уникнути перевантаження.

5. Обмін даними та виконання — після того, як *алгоритм перерозподілу* визначає нові призначення місій, МАС інформує відповідних агентів щодо змін. Обмінювання повідомленнями здійснюється за допомоги узгодженого протоколу обмінювання даними та формату даних, визначеного в онтології. Кожен агент отримує оновлену інформацію щодо місії, отримує відповідні деталі з онтології та адаптує свою поведінку для виконання призначених завдань.

ВИСНОВКИ

Запропоновану МАС базовану на онтології призначено для інтегрування з платформою рою БПЛА, що забезпечить ефективніше функціонування системи, децентралізоване керування та живучість системи. МАС дає змогу в забезпечити керування складним трафіком обмінювання даними між дронами під час навігації формування та оптимальний розподіл і перерозподіл під завдань між дронами в умовах певних обмежень, характерних для виконання місій (живлення системи, потужності процесорів для оброблення даних на борту, пам'яті для збереження інформації, перенесення корисного грузу, часу польоту тощо). Онтологічна мультиагентна система для успішного виконання завдань передбачає наявність деякої обчислювальної потужності на борту і гнучкий розподіл завдань між дронами (балансування навантажень) для успішного виконання місій (скорочення часу роботи, забезпечення живучості у разі несправностей або збиття дрона, боротьба з радіоелектронними завадами). Рольова ієрархія агентів (дронів) на борту дає змогу ефективніше використовувати обмежені ресурси та децентралізоване керування.

Застосування знань щодо ПРО підвищує ефективність прийняття рішень агентами, забезпечує формування логічних висновків з даних та знань під час виконання місії, забезпечує значну автономність системи та скорочення обміну даними з наземним оператором.

Перспектива подальших досліджень нашої роботи передбачає вирішення проблем безпеки в МАС, таких як захист від несанкціонованого доступу та «поганих кодів». Зовнішній мобільний агент може нести в собі деструктивний код і вразити обчислювальне середовище рою БПЛА. Рішенням може бути авторизація агентів, з'ясування його повноважень (привілеїв) доступу та дій.

Крім того, для автоматизування створення онтологій, використовуваних в МАС на основі інформаційних ресурсів (відкритих чи закритих) необхідно виконати апробацію наших методів і засобів, отриманих у попередніх фундаментальних дослідженнях. Використання концепції структурованого інформаційного поля об'єкта з використанням таксономічного подання обраних характеристик досліджуваного об'єкта для побудови онтологічної моделі дасть змогу вирішити цю проблему.

REFERENCES

1. Bacco, E. Ferro, A. Gotta, Radio propagation models for UAVs: what is missing? *Proc. of the 11th Int. Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering)*. 2014, pp. 391–392.
2. F. M. Bacco, E. Ferro, A. Gotta, UAVs in WSNs for agricultural applications: an analysis of the two-ray radio propagation model. *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*. IEEE. 2014, pp. 130–133.
3. G. Chmaj, H. Selvaraj, Distributed processing applications for UAV/drones: a survey. *Progress in Systems Engineering*. Springer International Publishing. 2015, pp. 449–454.
4. S. D'Auria, M. Luglio, C. Roseti, R. Strollo, F. Zampognaro, Real Time Transmission of Cultural Heritage 3D Survey in Case of Emergency. *3rd International Conf. on Information and Communication Technologies for Disaster Management*, Vienna, Austria. Dec. 2016. DOI: 10.1109/ICT-DM.2016.7857224.

5. O. Volkov et al., Intelligent control, localization and mapping in geoinformation systems based on visual data analysis. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2020, no 200, pp. 41–58. [О. Волков, М. Комар, Д. Волошенко та ін., Інтелектуальний контроль, локалізація та картографування в геоінформаційних системах на основі аналізу візуальних даних]. Access: <http://kvt-journal.org.ua/1488/>
6. I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, S. Temel, Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*. 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270. DOI:10.1016/j.adhoc.2012.12.004.
7. R. Carney, M. Chyba, C. Gray, A. Trimble, Multi-Agents Path Planning for a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles. *IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, Waikoloa, HI, USA. Sept. 2020, pp. 6495–6498. doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324503.
8. Y. Han, H. Wang, Z. Zhang, W. Wang, Boundary-aware vehicle tracking upon uav. *Electron. Lett.* 2020, Vol. 56, no. 17, pp. 873–876. DOI:10.1049/el.2020.1170.
9. H. Jiang, D. Shi, C. Xue, Y. Wang, G. Wang, Y. Zhang, Multi-agent deep reinforcement learning with type-based hierarchical group communication. *Appl. Intell.* 2021, 51, pp. 5793–5808. DOI: 10.1007/s10489-020-02065-9.
10. O. Volkov et al., Modern unmanned aerial vehicle control systems. *Control systems and computers*. 2017, no 6, pp. 84-88. Access: <http://usim.org.ua/arch/2017/6/11.pdf>
11. G. Zhan, Z. Gong, Q. Lv, Z. Zhou, Z. Wang, Z. Yang, D. Zhou, Flight test of autonomous formation management for multiple fixed-wing uavs based on missile parallel method. *Drones*. 2022, 6 (5), 99. <https://doi.org/10.3390/drones6050099>.
12. Military Aerospace Electronics. Access: <https://www.militaryaerospace.com/magazine>.
13. KRATOS. Unmanned Systems Aerial Target & Unmanned Tactical Systems. Access: <https://www.kratosdefense.com/about/divisions/unmanned-systems?r=kusd>.
14. A. Jevtic, Swarm intelligence: novel tools for optimization, Feature extraction, and multi-agentsystem modeling. *Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Madrid*, 2018, Spain.
15. J. Zhang, G. Wang, Y. Song, Task assignment of the improved contract net protocol under a multi-agent system. *Algorithms*. 2019, 12(4), no. 70, pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/a12040070>.
16. D. Xu, G. Chen, Autonomous and cooperative control of UAV cluster with multi-agent reinforcement learning. *The Aeronautical Journal*. 2022, Vol. 126, no. 1300, pp. 932–951. DOI: <https://doi.org/10.1017/aer.2021.112>.
17. F. Zitouni, S. Harous, R. Maamri, A distributed approach to the multi-robot task allocation problem using the consensus-based bundle algorithm and ant colony system. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 27479-27494. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2971585.
18. Y.I. Rudiaikov, V. M. Tomashevsky, Swarm intelligence approach for simulation modeling of distributed power systems. *Electronics and Control Systems*. 2017, Kyiv, Vol. 1, no. 51, pp. 124-127. DOI: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.51.11707>.
19. A. Berezhny, Methods and information technology of automated flight route planning of unmanned aerial vehicles to increase the efficiency of searching for objects. *Tesis PhD. Kharkiv NUPS named by Ivan Kozhedub*, Kharkiv, 2020. P. 192. [А.О. Бережний, Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. Кан.дис. Харківський НУПС імені Івана Кожедуба].
20. O. Pogudina, D. Krytskyi, A. Bykov, T. Plastun, M. Pyvovar, Methodology of formation of the intelligent component of the agent system of a swarm of unmanned aerial vehicles. *Monograph. Nat. aerospace University named after M.E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"*. Kharkiv, Madrid Printing, 2021, p. 211. ISBN 978-617-7988-32-7. [О.К. Погудіна, Д. М. Крицький, А. М. Биков, Т.А. Пластун, М.В. Пивовар, Методологія формування інтелектуальної складової агентної системи роєм безпілотних літальних апаратів. Монографія].
21. A. Gladun, K. Khala, Multi-Agent Drone Network System for Critical Infrastructure Protection with Ontological Knowledge Representation. *III Inter. scient.-pract. conf. Modern computer and information systems and technologies*. Zaporizhia, 02-19 Dec, 2022, pp. 431–436. [А.Я. Гладун, К.О. Хала, Мультиагентна система мережі дронів для

- захисту критичної інфраструктури з онтологічним поданням знань. III міжн.наук.-практ. конф. Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології].
22. Yongnan Jia, Siying Tian, Qing Li. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. 2020, Vol. 41, no. S1, pp. 4–14. DOI:10.7527/S1000-6893.2019.23738.
 23. M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, M. Dorigo, Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*. 2013, Vol. 7, pp. 1–41. DOI:10.1007/s11721-012-0075-2.
 24. M. Yogeswaran, S. Ponnambalam, Swarm robotics: an extensive research review. Ed. I. Fuerstner, *Advanced Knowledge Application in Practice* (IntechOpen: London, 2010), p. 259.
 25. O. Volkov, M. Komar et al., Intellectualization of modern systems of automatic control of unmanned aerial vehicles. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2018, no. 191, pp. 45–59. [О. Волков, М. Комар та ін., Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами]. Access: <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/131937/03-Gritsenko.pdf?sequence=1>.
 26. A. Kolling, et al., Human interaction with robot swarms: a survey. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2016, Vol. 46, no. 1, pp. 9–26. DOI: 10.1109/THMS.2015.2480801.
 27. M. Zgurovsky, D. Lande, A. Boldak, Linguistic Analysis of Internet Media and Social Network Data in the Problems of Social Transformation Assessment, *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, Issue 2, pp. 228–237. DIO: doi.org/10.1007/s11059-021-00348-8.
 28. A. Gladun, K. Khala, R. Martinez-Bejar, Development of Object's Structured Information Field with Specific Properties for Its Semantic Model Building. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021. Vol. 3241, pp. 102–111.
 29. A. Gladun, K. Khala, Using ontological models for formalized knowledge assessment. *Computer facilities, networks and systems*. 2019. No. 18. P. 5–10. [А.Я. Гладун., К.О. Хала, Використання онтологічних моделей для формалізованого оцінювання знань. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*]. Access: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms_2019_18_3.
 30. R. Burkhart, A Swarm Ontology for Complex Systems Modeling. *In Proc. of Symposium on Complex Systems Engineering*, Santa Monica, CA, USA, 11–12 Jan. 2007, pp. 1–4.
 31. David Martín-Lammerding, Dronetology. Access: <https://www.dronetology.net/dronetology/index-en.html>.
 32. Li, Xin, Sonia Bilbao, Tamara Martín-Wanton, Joaquim Bastos, Jonathan Rodriguez, SWARMS Ontology: A Common Information Model for the Cooperation of Underwater Robots. *J. Sensors* (Basel, Switzerland). 2017, Vol 17, no. 569, n. pag. <https://doi.org/10.3390/s17030569>.
 33. E. Moraitou, K. Kotis, S. Angelis, A. Soularidis, Onto4Drone. Access: <https://i-lab.aegean.gr/kotis/Ontologies/Onto4drone/index.html>.
 34. A. Gladun, K. Khala, Ontology-based semantic similarity to metadata analysis in the information security domain. *Probl. Program.*, 2021, no. 2, pp. 034–041. <https://doi.org/10.15407/pp2021.02.034>.
 35. E. Sirin, B. Parsia, B.C. Grau, A. Kalyanpur, Y. Katz, Pellet: A practical OWL-DL reasoned. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*. 2007, Vol. 5, no. 2, pp. 51–53. DOI:10.1016/j.websem.2007.03.004.
 36. T.R. Gruber, A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993, Vol. 5, no. 2, pp. 199–220. DOI:10.1006/knac.1993.1008.
 37. M. Hadzic, P. Wongthongtham, T. Dillon and E. Chang, Ontology-Based Multi-Agent Systems, *Studies in Computational Intelligence, Springer*, 2009, Vol. 219, p. 273. DOI:10.1007/978-3-642-01904-3.
 38. V.M. Catterson, E.M. Davidson, S.D.J. McArthur, Issues in Integrating Existing Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications. *Proc. of the 13th Inter. Conf. on Intelligent Systems Application to Power Systems*, Arlington, VA, USA, 6–10 Nov. 2005, pp. 1–6. DOI:10.1109/ISAP.2005.1599296.

39. Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA Ontology Service Specification. Access: <http://www.fipa.org/specs/fipa00086/XC00086C.html>.
40. Carney R., Chyba M., Gray C., Wilkens G., Shanbrom C., Multi-agent systems for quadcopters. *Journal of Geometric Mechanics*. 2022, Vol. 14(1), pp. 1–28. doi: 10.3934/jgm.2021005.
41. A. Borgida, Description logics in data management. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 1995, Vol. 7, no. 5, pp. 671–682. DOI: 10.1109/69.469829.
42. M. Wooldridge, N.R. Jennings, D. Kinny, The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Auton. Agents Multi Agent Syst.* 2000, Vol. 3, pp. 285–312.
43. M. Uslar, M. Specht, S. Rohjans, J. Trefke, J.M. González, The Common Information Model CIM: IEC 61968/61970 and 62325 – A Practical Introduction to the CIM. *Springer*: Berlin, Germany, 2012, p.186. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25215-0>.
44. F. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood, Developing multi-agent systems with JADE. *John Wiley & Sons, Ltd*, 2007, p. 286.
45. M.H. Dominguez, J.-I. Hernández-Vega, D.-G. Palomares-Gorham, C. Hernández-Santos, J.S. Cuevas, A BDI Agent System for the Collaboration of the Unmanned Aerial Vehicle. *Res. Comput. Sci.* 2016, Vol. 121, no. 1, pp. 113–124. DOI:10.13053/rcs-121-1-10.
46. A. Gladun, V. Hrytsenko, Yu. Zhuravlev, M. Nesen, A model of a multi-agent system for e-business and its software implementation technology. *Programming problems*. 2004, No. 2,3, pp. 510–519. [А. Я. Гладун, В. І. Гриценко, Ю. Д. Журавлев, М. В. Несен, Модель мультиагентної системи для е-бізнесу і технологія її програмної реалізації].
47. J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization. *Proc. of ICNN'95-international conference on neural networks*. 1995, Vol. 4, pp. 1942–1948. <http://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.

Отримано 04.03.2024

Gladun A.Ya., PhD (Engineering),

Leading Researcher of the Complex Research of Information
Technologies and Systems Department

<https://orcid.org/0000-0002-4133-8169>, e-mail: glanat@yahoo.com

Khala K.O.,

Researcher of the Complex Research of Information
Technologies and Systems Department

<https://orcid.org/0000-0002-9477-970X>, e-mail: cecerongreat@ukr.net

International Research and Training Center

for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences
of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine

40, Acad. Glushkov av., 03187, Kyiv, Ukraine

ONTOLOGY-ORIENTED MULTI-AGENT SYSTEM FOR DECENTRALIZED CONTROL OF UAV'S GROUP

Introduction. Today, UAVs are becoming an increasingly important tool for performing complex tasks in various fields of application, both civil (economic) and military, as they are particularly effective in dynamically uncertain environments with hard-to-reach areas. In addition, technological advances such as blockchain, artificial intelligence (AI) and machine learning have enabled the development of updated and improved UAV systems. To create and deploy a swarm of UAVs, coordinate actions, manage, and exchange data, a model of a multi-agent system (MAC) based on an ontological representation of knowledge is proposed. This model enables a swarm of UAVs to effectively make decisions in various situations while performing assigned tasks. This approach enables the safety, reliability, and efficiency of the tasks of the UAV group.

The purpose of the paper is to develop further the theoretical and practical foundations of the integration of the multi-agent system (MAS) based on the ontological representation of knowledge with the UAV network. This involves the development of a MAS architecture and a hierarchical set of ontologies of different levels. The goal is to create a common data description lan-

guage, define data semantics to ensure data uniqueness and consistency, provide support for decision-making during UAV swarm management, and swarm survivability in the event of aircraft failures or loss. It is necessary to develop algorithms and a method of dividing a complex task into sub-tasks in a swarm of UAVs among all MAS agents. This is to ensure reliable exchange of messages (data) between agents during the joint performance of the assigned task, and the possibility of dynamic redistribution of roles between UAV agents as needed.

Methods. During the research, the general theory of intelligent information technologies was applied; agent theory methods in particular intelligent BDI agents; methods of analyzing the performance of wireless data exchange networks; theory of combinatorial optimization for dividing tasks into subtasks; methods of ontological analysis and descriptive logic to create an ontological hierarchical model of the subject area; methods of enriching ontological models from external semantically marked information resources.

Results. As a result of the performed scientific research, the MAS architecture was proposed and its main functions were determined for the decentralized control of a swarm of UAVs. A set of agents with assigned roles was formed, who jointly (cooperatively) perform tasks, exchanging messages, and information with each other, which ensures the survivability of the system (in case of a failure or loss of the device, its task must be distributed among other drones). Plans and scenarios of MAS actions for various situations and means of coordinating actions between agents have been developed to perform the mission by a swarm of UAVs. A hierarchical ontological model of the subject area related to the work of the UAV swarm has been created. The algorithms and methods were based on the integration of semantic technologies that support the MAS during the execution of the UAV swarm mission, decision-making, assessment of the dynamic environment, and response to its changes.

Conclusions. An original approach, algorithms, and method for improving the system of decentralized control of a group of UAVs were proposed. Expanding the functionality of the system for maintaining the interaction of a swarm of unmanned systems based on MAS artificial intelligence was suggested. This system was based on ontological models. The models describe knowledge of the subject area, processes of UAV swarm operation, scenarios of actions in difficult situations, distribution of roles to agents, principles of planning, and coordination. The proposed MAS is integrated with the UAV swarm software platform, which makes it possible to improve the efficiency of the decentralized control system and adapt UAVs to dynamic changes in the environment. The practical result of the work will be a prototype of a software agent system that interacts with ontologies while performing simple tasks. The economic significance of the work consists of focusing on the creation of new intelligent information technologies, which were based on AI and knowledge of the subject area, and this significantly increases the efficiency of the functioning of modern systems.

Keywords: multi-agent system, ontology, formalization of knowledge, UAV, drone, decentralized control, task allocation.