

О. Є. КОНОВАЛЕНКО, В. О. БРУСЕНЦЕВ

МУЛЬТИАГЕНТНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Розглядаються питання практичного використання багатоагентних технологій. Наводиться опис специфічних властивостей багатоагентних систем, що визначають області їх практичного застосування, а також приклади успішного використання багатоагентного підходу для вирішення важливих практичних завдань. Основна увага приділяється проблемі взаємодії агентів із зовнішнім середовищем. У зв'язку з цим наводиться опис прикладів зовнішнього середовища декількох багатоагентних систем. Також міститься опис моделі віртуальної реальності та віртуального простору, які відображають повний життєвий цикл прикладних багатоагентних систем. З урахуванням спрямованості статті основна увага при описі середовища також приділяється опису пропонувананих у ній рішень, використаних для реалізації механізмів взаємодії агентів із зовнішнім середовищем.

Ключові слова: багатоагентна технологія; мультиагентна система; агент; мехатроніка; нейронні мережі; віртуальний простір; віртуальна реальність; база знань

О. Е. КОНОВАЛЕНКО, В. А. БРУСЕНЦЕВ

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Рассматриваются вопросы практического использования многоагентных технологий. Приводится описание специфических свойств многоагентных систем, которые определяют области их практического применения, а также примеры успешного использования многоагентного подхода для решения важных практических задач. Основное внимание уделяется проблеме взаимодействия агентов с внешней средой. В связи с этим приводится описание примеров внешней среды нескольких многоагентных систем. Также содержится описание модели виртуальной реальности и виртуального пространства, которые отражают полный жизненный цикл прикладных многоагентных систем. С учетом направленности статьи основное внимание при описании среды также уделяется описанию предлагаемых в ней решений, используемых для реализации механизмов взаимодействия агентов с внешней средой.

Ключевые слова: многоагентная технология; мультиагентная система; агент; мехатроника; нейронные сети; виртуальное пространство; виртуальная реальность; база знаний

O. KONOVALENKO, V. BRUSENCEV

MULTI-AGENT MANAGEMENT AND DECISION SUPPORT SYSTEMS

The questions of practical use of multi-agent technologies are considered. The description of the specific properties of multi-agent systems is presented, which determine the scope of their practical application, as well as examples of successful use of the multi-agent approach for solving important practical problems. The main attention is paid to the problem of agents interaction with an external environment. In this regard, the description of examples is given for the environment of several multi-agent systems. It also contains a description of the virtual reality model and virtual space, which reflect the full life cycle of multi-agent application systems. Taking into account the direction of the paper, the main attention is also paid to the description of the environment to the description of the proposed solutions used to implement the mechanisms of interaction between agents and the environment.

Keywords: multi-agent technology; multi-agent system; agent; mechatronics; neural networks; virtual space; virtual reality; knowledge base

Вступ. Проблема колективної поведінки і групового управління не є новою і досліджується вже протягом кількох десятиліть, починаючи з класичних робіт Дж. Фон Неймана, М. Цейтліна, В. Варшавського і Д. Поспелова та ін. [1]. Її актуальність зростає рік від року, причому в даний час проблема групового управління ставиться вже по-новому, а для її вирішення потрібні нові парадигми концептуалізації, нові моделі формалізації та нові архітектури побудови, що, в свою чергу, вимагає створення нових технологій проектування і програмної реалізації. Зумовлено це, насамперед, особливостями сучасних прикладних задач групового управління, зокрема, значним зростанням їх масштабності, необхідністю забезпечити узгоджене функціонування великої кількості гетерогенних підсистем, організованих в мережу, різні вузли якої можуть працювати в різних операційних середовищах і використовувати різні комунікаційні протоколи. В таких додатках найважчими виявляються два дуже різних завдання, а саме: забезпечення ефективної координації групової поведінки та створення програмної інфраструктури (платформи), що підтримує взаємодію великої кількості різномірних пристроїв і програм.

Особливо важкими є завдання управління групами рухомих об'єктів, коли вони з тих чи інших

причин мають або координувати свою поведінку, наприклад, для уникнення зіткнень, або кооперуватися для спільного вирішення завдань [5]. Характерними прикладами додатків такого типу є управління колективом роботів, групове керування польотом безпілотних літальних апаратів та управління виконанням місії (цільового призначення) групи, автономне керування повітряним рухом у районі аеропорту та ін. Інший великий клас прикладних завдань групового управління пов'язаний з використанням мобільних систем і управлінням ними. Як приклад можна вказати завдання управління силами і засобами при техногенних аваріях, великих пожежах, природних катастрофах і т. п. з метою мінімізації їх шкідливих наслідків. У процес управління тут залучаються мобільні групи різного призначення і динамічного складу (розвідувальні, пожежні, забезпечення евакуації та медичної допомоги, інформаційної підтримки, зв'язку і т. п.), використовуються мобільні канали зв'язку і мобільні пристрої. Іноді може знадобитися оперативно розгортати бездротову комунікаційну інфраструктуру (наприклад, у важкодоступній місцевості) та мережу сенсорів.

В даний час дослідження і розробки в області

систем групового управління ведуться в багатьох країнах, в них залучаються великі колективи людей, дослідження і розробки проводяться в багатьох напрямках. Проте, поки не створено (інформаційної) технології, яка була б в змозі впоратися з реалізацією додатків в області групового управління з зазначеними вище особливостями.

Спільний аналіз можливостей сучасних інформаційних технологій і вимог до них з боку додатків розглянутого типу показує, що найбільші перспективи тут мають інформаційні технології, які інтегрують ідеї розподіленого прийняття рішень (вони зміщують основний обсяг обчислень по обробці даних на рівень джерел даних, окремих підсистем), концепцію багатоагентних систем (вона дуже зручна для концептуалізації та декомпозиції розподілених проблем), архітектури, орієнтованої на сервіс (в ній агенти можуть кооперуватися при мінімумі початкової інформації про топологію мережі, про агентів, присутніх в ній, і про доступні сервіси) і обчислення на основі парних (Peer-to-Peer, P2P) взаємодій (ця технологія підтримує реалізацію властивості відкритості, оскільки вона не вимагає використання централізованого сервера для підтримки взаємодії агентів) [9].

Розвиток авіації, ракетної техніки і багатьох інших технологій призвів до необхідності розробки принципово нових засобів автоматизації, заснованих на штучному інтелекті, нелінійному управлінні та сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологіях. Важливу роль грають мехатроніка і робототехніка, нейроінформатика і нейрокомп'ютери, а також мультиагентні системи і технології. Саме ці засоби і технології дозволяють створювати та удосконалювати інтелектуальні автопілоти для літаків і крилатих ракет, космічні роботи з елементами штучного інтелекту, мультиагентні системи навігації і управління рухом космічних апаратів і т.п. Для виробництва і експлуатації цих нових засобів автоматизації усе ширше використовуються робототехнічні системи і мультиагентні технології [4].

Багато задач теорії мультиагентних технічних систем (МАТС) зародилися у зв'язку з розвитком теорії адаптивних та інтелектуальних систем управління і техніки. На практиці рухливі мехатронні об'єкти з елементами штучного інтелекту рідко використовуються як автономні системи, частіше вони працюють разом з іншими автономними машинами [3]. Значний інтерес викликають загальні принципи і конкретні алгоритми інтелектуального і мультиагентного управління, що забезпечують кооперацію машин у процесі рішення спільної задачі, роз'яснення можливих конфліктів (сутичок, тупикових ситуацій і т. ін.) між ними та адаптацію до перешкод в умовах невизначеності на базі моделей віртуальної реальності (ВР).

Метою даної роботи є дослідження особливостей використання багатоагентних технологій та мультиагентних систем для зручності управління та своєчасної підтримки прийняття рішень у моделі віртуального простору з метою проектування та введення в експлуатацію заснованих на використанні мультиагентних технологій планування програмно-

апаратних комплексів нового покоління, здатних взаємодіяти і працювати в групі і застосовуваних для широкого спектру завдань, різноманітних областей.

Постановка проблеми. Завдання координації поведінки агентів є центральною і найбільш складною задачею в області мультиагентних систем і тому привертає велику увагу дослідників і розробників. З точки зору теорії, ця проблема не є новою, як і багато інших, які складають теоретичний базис мультиагентної системи. Її витoki слід пов'язувати з теорією систем, класичною теорією управління та дослідженням операцій, теорією двоїстості, теорією ігор, плануванням та іншими областями математики і кібернетики, становлення і розвиток яких відноситься ще до 1950-60-х років. Саме тоді сформувалися багато ключових ідей, методів і моделей, які в даний час явно або неявно експлуатуються або "відкриваються" заново при побудові формальних моделей і методів координації поведінки агентів мультиагентної системи.

Результати досліджень. Агенти і мультиагентні системи (МАС) – один з напрямків сучасної технології програмування систем управління і зв'язку. Агенти можуть доставляти на віддалені системи код, що розширює функціональність системи, а мультиагентні комплекси дозволяють природним чином розпаралелити рішення складних задач. Агент є направляючою «особистістю» у діях виконавця, його головним помічником і радником [1].

Основною специфічною особливістю мультиагентних технологій є перехід від пасивних сутностей, описуваних у вигляді класів об'єктів в об'єктно-орієнтованому підході, до активних сутностей, які описуються в прикладних системах у вигляді агентів. Агенти прикладних систем відповідно до їх призначення можуть представляти найрізноманітніші сутності предметних областей. Наприклад, такими сутностями можуть бути люди, організації, постачальники, замовники, транспортні засоби, верстати, проекти, замовлення, продукти і т. п. Під активністю сутностей мається на увазі здатність агентів відтворювати в програмних системах поведінку цих сутностей. При цьому під поведінкою матеріальних та віртуальних об'єктів мається на увазі бізнес-логіка, яка визначається метою їх існування або використання. Наприклад, метою використання вантажного транспортного засобу може бути забезпечення рентабельності його використання. У такому випадку поведінка агента транспортного засобу може мати на увазі пошук, аналіз, вибір і укладення вигідних контрактів з виконання вантажоперевезень [8].

Мультиагентні технології дозволяють вирішувати проблеми, для яких характерні часті і непередбачувані зміни і мають місце складні залежності між елементами. На відміну від традиційних систем, в яких рішення знаходиться за допомогою централізованих, послідовних і детермінованих алгоритмів, в мультиагентних системах рішення досягається в результаті розподіленої взаємодії безлічі агентів – автономних програмних об'єктів, націлених на пошук, можливо, не стільки оптимального, скільки найбільш адекватного і актуального рішення на кожен момент

часу.

Новий підхід до вирішення завдання оперативної обробки інформації в процесах прийняття рішень пов'язується із застосуванням мультиагентних технологій, які отримали інтенсивний розвиток в останнє десятиліття, на стику методів штучного інтелекту, об'єктно-орієнтованого програмування, паралельних обчислень і телекомунікацій [2]. В основі цієї технології лежить поняття «агента», програмного об'єкта, здатного сприймати ситуацію, приймати рішення і комунікувати з собі подібними [9]. Ці можливості кардинально відрізняють мультиагентні системи від існуючих «жорстко» організованих систем, забезпечуючи їм таку принципово важливу властивість як здатність до самоорганізації. При цьому агенти можуть діяти від імені та за дорученням осіб, які приймають рішення, та на основі даних їм повноважень в автоматичному режимі вести переговори, знаходити варіанти рішень та узгоджувати свої рішення один з одним.

Аналізуючи дві основні архітектури розподілених обчислень (розподіленого штучного інтелекту) – нейромережі і мультиагентні системи, потрібно сказати наступне. Головне обмеження штучної нейронної мережі полягає в її власній «пасивності» – вона чесно відпрацьовує вхідні сигнали, здійснюючи на них когнітивні функції, яким вона навчена, але вона сама не шукає ніякі дані і не знає для чого їй це потрібно. МАС, навпаки, складаються з активних агентів, які переслідують певні цілі, але і ці цілі та правила взаємодії на шляху до їх досягнення, і самі репрезентації предметної області, на якій задаються цілі і правила – все це закладено програмістом, і навчання, якщо й відбувається, то на рівні системи в цілому, а не на рівні окремих агентів. Таким чином, кожна з розглянутих архітектур має свої обмеження: одна позбавлена власної активності, інша потребує програміста.

У парадигмі багатоагентних систем координація поведінки агентів є невід'ємною функціональністю агентів. Ситуації і причини, які викликають необхідність координації групової поведінки, дуже різноманітні. Вже сама модель агента в МАС припускає, що:

- агенти існують у спільному зовнішньому середовищі, де є, наприклад, просторові обмеження (уникнення зіткнень роботів, дотримання дистанцій безпеки при управлінні повітряним рухом, облік глобального контексту, обмеження на загальний час виконання проекту та ін.);

- агенти мають обмежені загальні ресурси (засоби транспортування в логістиці, комп'ютерні ресурси, доступні програмним агентам, і т. д.);

- агенти існують і приймають рішення в умовах невизначеності, коли кожен агент володіє обмеженою інформацією, що спричиняє необхідність інформаційного обміну між ними;

- агенти володіють обмеженою компетенцією і можливостями, що може бути заповнено шляхом залучення знань і функціональних можливостей інших агентів;

- агенти повинні синхронізувати свої дії при рішенні загальної проблеми, зокрема, в додатках ре-

ального часу (управління повітряним рухом, футбол роботів, проведення гуманітарної операції та ін) [5].

Всі ці особливості моделі автоматично мають на увазі необхідність координації, причому досить різноманітної.

Із змістовної точки зору координація призначена для узгодження індивідуальних цілей і варіантів поведінки агентів, при яких кожен агент покращує або не погіршує значення своєї функції корисності, або система у цілому покращує якість рішення загальної задачі (якщо система має загальну глобальну мету).

Існуючі варіанти архітектур багатоагентних систем і раціональний вибір архітектури окремого агента і багатоагентної системи в цілому істотно залежать від концептуальної моделі агента, прийнятої для її опису формалізму і мови специфікацій, математичної моделі кооперації агентів при спільному функціонуванні в системі, на який додаток або клас додатків орієнтована багатоагентна система, а також від ряду інших факторів.

Під агентом мультиагентної системи прийнято розуміти механізм інкапсуляції та обміну розподіленими знаннями і функціями [7]. Кожен агент – це процес, який володіє певною частиною знань про об'єкт проектування і можливість обмінюватися цими знаннями з іншими агентами. Залежно від типу, агент може підтримувати і інтерфейс з користувачем. Під багатоагентною системою будемо розуміти багатокomпонентну систему, що складається з агентів зі специфікованим інтерфейсом.

У мультиагентній системі кожен агент буде власну модель поточного рішення, ґрунтуючись на своїх даних і даних інших агентів. У таких системах є комунікаційний протокол і формат повідомлень (мова комунікацій), відповідно до якого повинні оформлятися запити і відповіді.

Узагальнено можна сказати, що агенти автономні і гетерогенні, тобто відсутнє єдине управління. Комунікації між агентами можуть бути синхронними і асинхронними, спрямованими (peer-to-peer), загальними (broadcast) або груповими (multicast). Важливо, що семантика повідомлень між агентами повинна бути високого рівня. Це означає не тривіальну пересилку команд на запуск/останов, а повну реалізацію інформаційних потоків між агентами в системі шляхом обміну повідомленнями мовою, аналогічною мові високого рівня в програмуванні.

Теорія агентів, взагалі кажучи, розглядає агента і мультиагентну систему як «інтенціональну систему», вважаючи, що агент найкращим чином описується саме в інтенціональному стилі, для якого потрібен несуперечливий опис з використанням підмножини ментальних понять [6].

При виборі формалізмів для опису ментальних понять потрібно вирішувати два класи проблем: синтаксичну проблему і семантичну, а будь-який формалізм уявлення ментальних понять (як і для подання будь-якої іншої інформації) повинен мати два окремих аспекти: свою мову формалізації і свою семантичну модель.

Розглянемо мультиагентну технічну систему як

колектив інтелектуальних агентів, пов'язаних комп'ютерними каналами зв'язку для досягнення спільної мети. Інтелектуальний агент здатний в процесі самонавчання адаптуватися до конкретних інформаційних потреб користувача та виявляти, зберігати і використовувати релевантні до відповідних задач знання. Інтелектуальний агент може бути реалізований в рамках продукційної, об'єктної, нейромережної парадигми чи їх певного поєднання. Вибір розробника відштовхується від конкретних експлуатаційних вимог. При цьому доцільно максимально відкласти рішення щодо програмно-апаратної реалізації, пов'язаної з обмеженнями у виборі операційної системи чи комп'ютерної архітектури. Кожний агент спроможний самостійно вирішувати деякі локальні задачі і має можливість кооперуватися з іншими агентами в процесі спільного рішення спільної задачі. Машина як агент МАТС являє собою автономну інтелектуальну систему, що складається з таких мехатронних компонентів: рухова система («тіло»), сенсорна система («органи почуттів»), системи управління («мозок»), система комунікації («мови і канали зв'язку»). Характерними рисами інтелектуальних агентів є:

- *колегіальність* – спроможність до колективного цілеспрямованого поведіння в інтересах рішення спільної задачі;
- *автономність* – спроможність самостійно вирішувати локальні задачі;
- *адаптивність* – спроможність автоматично пристосовуватися до невизначених умов у динамічному середовищі;
- *активність* – спроможність до активних дій заради досягнення спільної та локальної мети;
- *інформаційна і рухова мобільність* – спроможність активно переміщатися і цілеспрямовано шукати і знаходити інформацію, енергію та об'єкти, необхідні для кооперативного рішення спільної задачі [1].

Для класифікації агентних програм використовуються дві основні ознаки:

- 1) ступінь розвитку внутрішнього уявлення про навколишній світ;
- 2) спосіб прийняття рішення.

Найпростішим видом агента є простий рефлексивний агент. Подібні агенти обирають дії на основі поточного сприйняття стану середовища, ігноруючи всю історію сприйняття. Прості рефлексивні агенти надзвичайно прості, але володіють обмеженим інтелектом [10].

В умовах часткової спостережливості є необхідним, щоб агент відстежував зміни середовища, тобто агент повинен володіти безліччю внутрішніх станів, зміна яких залежить від історії сприйняття.

Більш складним за структурою є агент, що діє з урахуванням внутрішнього стану. Поточне сприйняття комбінується з колишнім внутрішнім станом, в результаті відбуваються дії і відбувається зміна внутрішнього стану.

Знань про поточний стан середовища не завжди достатньо для прийняття рішення. Тоді агенту потрі-

бно не тільки опис поточного стану, а також інформація про ціль, яка описує бажані ситуації. Тому потрібен агент, який буде стежити за станом середовища, а також за кількістю цілей, яких він намагається досягти, і обирає дію, спрямовану на досягнення цих цілей.

Часто мають місце ситуації, коли для прийняття рішення недостатньо інформації тільки про цілі. По-перше, якщо є конфліктуючі цілі, такі, що можуть бути досягнуті тільки деякі з них (наприклад, швидкість або безпека). По-друге, якщо є кілька цілей, до яких може прагнути агент, але кожна з них може бути досягнута з деякою ймовірністю успіху. В цьому випадку в програму агента вводиться функція корисності, яка ставить у відповідність станам агента дійсне число, що має сенс очікуваної корисності даного стану. Агент вибирає дію, яка веде до кращої очікуваної корисності.

В особливий клас слід виділити агентів, що навчаються. Навчання має важливу перевагу: воно дозволяє агенту функціонувати спочатку в невідомих йому варіантах середовища і ставати більш компетентним у порівнянні з тим, що могли б дозволити тільки його початкові знання. Продуктивним компонентом може бути будь-яка з розглянутих раніше структур агентних програм. Навчальний компонент використовує інформацію зворотного зв'язку з оцінкою того, як діє агент, і визначає, яким чином має бути модифікований продуктивний компонент для того, щоб він успішніше діяв в майбутньому.

Ідея багатоагентності передбачає кооперацію агентів при колективному вирішенні завдань. Агент, який не здатний вирішити деяку задачу самостійно, може звернутися до інших агентів. Інший варіант, коли необхідна кооперація – це використання колективу агентів для вирішення одного загального складного завдання. При цьому агенти можуть будувати плани дій, ґрунтуючись вже не тільки на своїх можливостях, але і «думати» про плани і наміри інших агентів. Відомо, що колективи навіть найпростіших автоматів, в яких кожен автомат переслідує тільки свої примітивні цілі, в цілому здатні вирішувати дуже складні завдання. В якості ілюстрації можна взяти, наприклад, бджолиний вулик або мурашник. Можна сподіватися, що система, в якій агенти можуть враховувати плани і інтереси інших агентів, буде в багатьох випадках ще більш гнучкою.

Однак використання ідеї колективної поведінки призводить до маси проблем. Серед них слід виділити такі проблеми, як формування спільних планів дій, можливість врахування інтересів компаньйонів агента, синхронізація спільних дій, наявність конфліктуючих цілей, наявність конкуренції за спільні ресурси, організацію переговорів про спільні дії, розпізнавання необхідності кооперації, вибір підходящого партнера, навчання поведінці в колективі, декомпозиція задач і поділ обов'язків, правила поведінки в колективі, спільні зобов'язання і т. ін.

В даний час запропоновано безліч різних моделей колективної поведінки агентів. Як правило, кожна з моделей концентрує увагу на декількох аспектах такої поведінки і розглядає проблеми відповідно до

обраної архітектури (моделі) самого агента. Для знань, що відповідають за колективну поведінку, в архітектурі агента, зазвичай, виділяють спеціальний рівень – рівень кооперації (cooperation layer).

Взаємодія між агентами – головна риса МАС, що відрізняє їх від інших інтелектуальних систем. Головними характеристиками будь-якої взаємодії є спрямованість, вибірковість, інтенсивність і динамічність.

Взаємодія агентів обумовлено рядом причин, найважливішими серед яких є такі: сумісність цілей (загальна мета), загальні ресурси, необхідність залучення відсутнього досвіду, взаємні зобов'язання. Перераховані причини в різних поєднаннях можуть призводити до різних форм взаємодії між агентами, наприклад: просте співробітництво, координоване співробітництво, непродуктивне співробітництво.

Особливістю колективної поведінки агентів є те, що їх взаємодія в процесі розв'язання окремих завдань (або однієї загальної) породжує нову якість вирішення цих завдань. Найбільш відомими моделями координації поведінки агентів є: теоретико-ігрові моделі, моделі колективної поведінки автоматів, моделі планування колективної поведінки, моделі на основі BDI-архітектур (Belief – Desire – Intention), моделі координації поведінки на основі конкуренції.

Мобільні агенти спроможні переміщатися з однієї системи до іншої, рухаючись за наміченим маршрутом, що робить їх автономними, що не потребують постійного управління: мобільні агенти можуть контролювати віддалені системи на предмет своєчасного коригування помилок і відсутності ознак шкідливої активності, що виявляють і відбивають розподілені, скоординовані атаки, вносячи в захист елементи динамічності і самоорганізації.

Сутічка роботів або транспортних машин розглядається як конфлікт, що може виникнути при колективному рішенні спільної задачі. Для вирішення подібних конфліктів агенти повинні обмінюватися між собою інформацією через комп'ютерні канали зв'язку.

Застосування класичних методів пошуку рішень не завжди ефективно для вирішення складних багатofакторних задач, особливо в умовах високої динаміки подій, що впливають на результати планування і узгодження окремих планів розподілених пристроїв. Яскравим прикладом такого завдання є завдання управління об'єднаною групою, наприклад, безпілотних літальних апаратів або автономних об'єктів.

Слід, однак відзначити недостатнє опрацювання інструментів планування дій і управління в реальному часі групами об'єктів. Більшість існуючих програмних рішень призначені для планування і управління діями автономних об'єктів, що діють поодиночки. Механізми планування, контролю та управління діями об'єднаної групи дозволили б найбільш ефективно використовувати наявні в розпорядженні ресурси і, при необхідності, оперативно розподіляти у реальному режимі часу нові завдання між окремими об'єктами групи безпосередньо в процесі виконання завдань, що дозволило б виконувати поставлені завдання якісно і в найкоротші терміни.

Для якісного управління розподілом ресурсів необхідно використовувати системи планування реального часу, які розвиваються в наступних напрямках:

- методи традиційної оптимізації та лінійного програмування в області змішаних дійсно-цілочисельних і логічних змінних, удосконалення точних методів розв'язання задач, таких, як «метод гілок і меж», методи нелінійного програмування, методи програмування в обмеженнях;

- жадібні алгоритми, засновані на евристичних бізнес-правилах конкретних предметних областей;

- методи штучного інтелекту, використання нейронних мереж і нечіткої логіки;

- метаевристики (локальний пошук, Tabu Search, GRASP алгоритми);

- імітаційні методи мурашиних алгоритмів (Ant Colony Optimization (ACO)), роя бджіл ((Artificial Bee Colony (ABC)), зграї птахів та аналогічні (Bio Inspired), а також методи імітації відпау (Simulated Annealing (SA)), Монте-Карло та інші;

- методи розподіленого вирішення завдань планування ресурсів із застосуванням мультиагентних технологій і ринкового підходу [7, 9].

Варто відзначити, що більша частина систем планування реального часу залишається централізованою і детермінованою. У напрямку централізованого планування розробляються гібридні евристичні алгоритми, що об'єднують традиційні правила диспетчеризації з генетичними, нейро-мережевими, роевими та іншими підходами.

Найбільш перспективними та адекватними для проектування алгоритмів рішення задач розподілу ресурсів представляються мультиагентні технології, серед яких найбільшими можливостями мають комбіновані методи з ринковим підходом мультиагентної оптимізації. По-перше, ринкове трактування мультиагентних систем дає близький до природного для кожного завдання спосіб побудови об'єктної моделі – поділ між агентами завдань і ресурсів, що дозволяє надалі проводити процедуру визначення відповідності завдання і виконує її ресурс. По-друге, може здійснюватися онтологічна конкретизація властивостей агентів для налаштування на задану предметну область. По-третє, надається можливість завдання логіки вибору дій агента на підставі його задоволеності і віртуального прибутку в системі «торгів» за ресурси.

Розподілений принцип прийняття рішень і підтримка процесів самоорганізації в системі призводить до того, що мультиагентні системи управління ресурсами динамічно стійкі до зовнішніх впливів, до неповноти та перекручування інформації, що надходить.

Для узгодженості дій МАС треба спробувати реалізувати ідею автоматичного самолікування систем (тобто видалення усього шкідливого без втрати доброякісної інформації), умонтувавши у них ремонтних агентів і захистивши їх за допомогою технології віртуальних машин. Загальна схема роботи ремонтного агента полягає в тому, що він запам'ятовує явно безпечний стан виробничої системи, контролює усі

внесені зміни, періодично перевіряє наявність ознак аномального поведіння і несанкціонованих змін і при необхідності повертає систему в безпечний стан. Оскільки виробнича система функціонує в рамках віртуальної машини, вона не може втрутитися в роботу агента, що є довіреним незмінним розширенням ядра. Для роботи ремонтного агента, а також для відкритості і розширення архітектури МАС буде потрібно використання агента-помічника, агента організації пам'яті і агента обслуговування зв'язку.

Мультиагентне управління дозволяє координувати цілеспрямовану діяльність автономних агентів, планувати їхнє поведіння і взаємодію, адаптуватися до середовища, що змінюється, і дозволяти конфлікти між агентами на стратегічному рівні управління і комунікації, тобто за допомогою обміну інформацією через комп'ютерні канали зв'язку. Для проєк-

тування мультиагентних систем управління можуть використовуватися методи колективного поведіння автоматів, теорія ігор, засоби кооперативного рішення проблем на базі розподіленого штучного інтелекту, теорія розкладів, методи оптимального планування та адаптивного управління. При мультиагентному управлінні технічними системами кожен машину можна розглядати як інтелектуальний мехатронний об'єкт із власною базою даних і знань, спроможний адаптуватися до заздалегідь невідомих умов функціонування, що змінюються у середовищі з перешкодами. Тому важливе значення в теорії мультиагентного управління мають методи навчання і адаптації як окремих агентів на тактичному (локальному) рівні управління, так і МАС у цілому на стратегічному рівні управління.

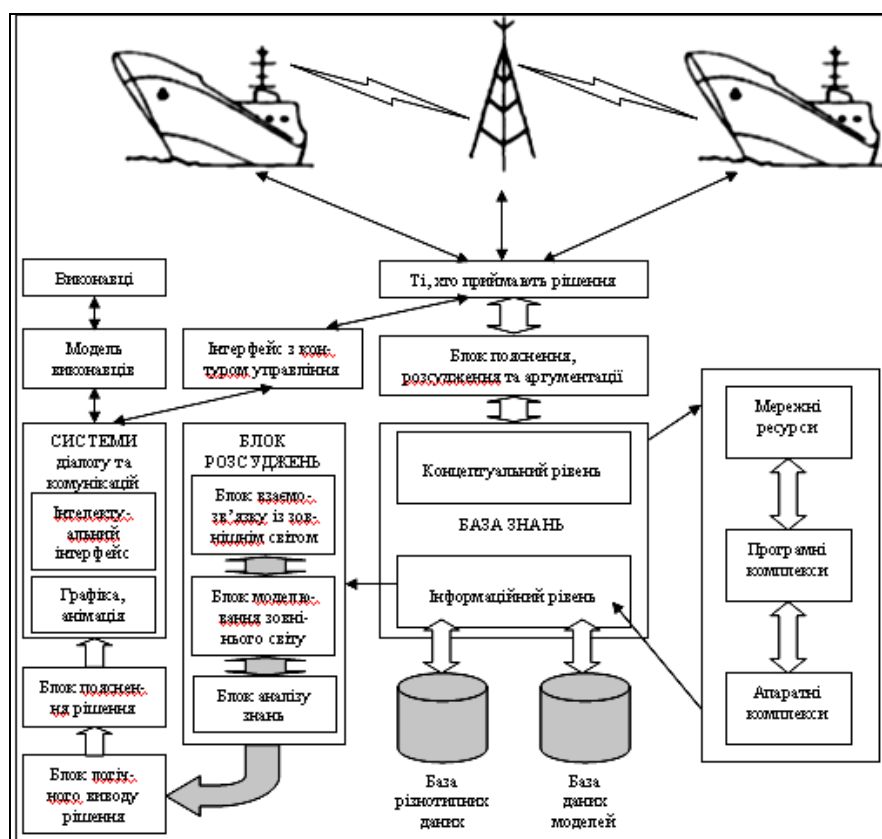


Рисунок 1 – Структура мультиагентної системи управління

Принцип дії мультиагентних систем управління ґрунтується на розподілі спільної задачі, що повинна виконати МАС, на цілий ряд взаємозалежних задач, рішення яких покладається на інтелектуальні системи окремих агентів. Для рішення задачі оптимального розподілу задач між мехатронними агентами доцільно використовувати наближені алгоритми і евристичні процедури. Ці алгоритми ґрунтуються на методі гілок і меж, що дозволяє за кінцеве число кроків побудувати бінарне дерево варіантів розподілу задач.

При проєктуванні мультиагентних систем управління необхідно вирішити на тактичному і стратегічному рівнях такі задачі:

1) синтезувати локальні системи інтелекту-

ального управління автономними агентами, що використовують локальні моделі ВР;

2) синтезувати мультиагентну систему планування, навігації і управління взаємодією (колективним поведінням) інтелектуальних агентів у МАС.

Архітектура систем планування, навігації і управління взаємодією агентів у МАС при рішенні спільної задачі має розподілений (мультиагентний) характер і ієрархічну організацію. Вона заснована на виділенні на верхньому рівні спеціального агента-координатора, пов'язаного комп'ютерними каналами прямого і зворотного зв'язку з усіма локальними системами управління агентів. Агент-координатор на основі мультиагентної моделі ВР

здійснює декомпозицію спільної задачі на локальні задачі, їхній оптимальний розподіл між агентами, організацію колективного поведіння і розв'язання конфліктів при рішенні МАТС спільної задачі. При проектуванні мультиагентних систем повинні використовуватися нейромереві архітектури, що самоорганізуються. Наприклад, у якості маршрутизатору в комп'ютерній мережі, що зв'язує локальні системи управління агентів, можна використовувати нейронні мережі Хопфілда, тому що вони забезпечують найкоротші маршрути «переговорів» між агентами і рівнобіжним опрацюванням інформації при мультиагентному управлінні

Для запобігання сутичок (конфліктів) агент-координатор може передавати по каналах зв'язу команди про тимчасове припинення агентів або про зміну швидкості і прискорення їхнього прямування в залежності від сформованої ситуації. Ця ситуація оцінюється агентом-координатором на основі запитів про поточний стан кожного робота, що характеризується його координатами і швидкістю. У зоні можливої сутички роботів він може змінити швидкість їхнього прямування (наприклад, загальмувати або зупинити робота на якийсь час) за допомогою команд, переданих по каналах прямого зв'язу в локальні системи управління, що є важко реалізованою задачею. Для розв'язання конфліктів необхідно задіяти прямі канали зв'язу (наприклад, радіоканали) і підключити помічника: агента-комунікатора, що грає роль посередника для адресного зв'язу і швидкої передачі даних між агентами. Для спрощення системи управління машинами в рамках такого підходу можна використовувати сенсорну інформацію про близькість машини-агента стосовно інших машин і перешкод, одержувану, наприклад, за допомогою далекомірів, яка фіксується в локальній моделі ВР. Для локального управління прямуванням роботів і машин з урахуванням їхньої нелінійної динаміки і перешкод можна використовувати алгоритми програмного, адаптивного та інтелектуального управління, а також нейромереві алгоритми, що забезпечують навчання і високий паралелізм при опрацюванні інформації в реальному часі.

Мультиагентна технологія моделювання процесів управління і зв'язу повинна базуватися на методиці описи процесу у вигляді інтелектуального агента $U_{MA} = \langle J, Y, D, Z, E \rangle$, де J – бажання агента (мета його діяльності); Y – переконання агента (агентне бачення Світу); D – дії (алгоритм поведінки) агента; Z – знання агента про можливе поведіння інших агентів; E – механізм комунікацій (взаємодії) агента з іншими агентами. Агенти взаємодіють із середовищем (Світом), що подається у вигляді імітаційної моделі об'єкта моделювання.

Віртуальний простір (ВП) агента – це простір геометричних, фізичних і сенсорних координат предметів (об'єктів) реального навколишнього світу. Кожен предмет являє собою геометричне тіло в тривимірному реальному просторі, що характеризується рядом фізичних параметрів (наприклад, маса або пружність) і сенсорних властивостей, по-

в'язаних зі сприйняттям предмета сенсорною системою агента (колір, звук, дальність і т.п.). Геометрична, фізична і сенсорна моделі предметів у ВП формуються і зберігаються в пам'яті інтелектуальної системи управління агента. Геометричну модель середовища можна сформулювати за допомогою заданих геометричних характеристик предметів, або за результатами сенсорних вимірів телевізійної системи технічного зору або лазерного далекоміра агента.

Віртуальний простір агента природно розділити на три простори: геометричний, фізичний і сенсорний. Геометричний віртуальний простір у загальному випадку тривимірний, фізичний віртуальний простір визначається сукупністю фізичних властивостей предметів, а сенсорний віртуальний простір багатомодальний і визначається наявними у агента сенсорами. У свою чергу сенсорний віртуальний простір можна розділити на підпростори, обумовлені типом сенсорів, тобто модальністю вимірюваних сигналів (відеосигнали від навколишніх предметів, акустичні сигнали і т. ін.).

Кожній точці предмета у реальному просторі відповідає її образ у ВП, а саме: точка з декартовими координатами x, y, z у геометричному ВП R^3 ; точка з фізичними координатами p_1, p_2, \dots, p_k у фізичному ВП R^k ; точка з координатами s_1, s_2, \dots, s_n у сенсорному ВП R^n . Реальному предмету ω , як безлічі точок з певною спільністю фізичних і сенсорних властивостей, відповідає геометричний образ $x(\omega), y(\omega), z(\omega)$ у геометричному ВП R^3 , фізичний образ $p_1(\omega), p_2(\omega), \dots, p_k(\omega)$ у фізичному ВП R^k і сенсорний образ $s_1(\omega), s_2(\omega), \dots, s_n(\omega)$ у сенсорному ВП R^n . Сукупність цих образів являє собою модель предмета у ВП агента. Сукупність моделей предметів у ВП агента утворюють одноагентну модель віртуальної реальності (ВР).

Оскільки кожен агент являє собою деякий предмет реальності, то йому відповідає деяка модель (образ) у ВП. Ця модель агента є частиною моделі ВР. Інша частина моделі ВР складається з моделей предметів, що оточують агента. Таким чином, одноагентна модель ВР $M(a, \omega_1, \dots, \omega_m)$ агента в оточенні предметів $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ формально визначається співвідношенням $M(a, \omega_1, \dots, \omega_m) = M(a) \cup M(\omega_1, \dots, \omega_m)$, $M(\omega_i) \cap M(\omega_k) = \emptyset$ для $i \neq k$, де $M(a)$ – модель агента у ВП, а

$$M(\omega_1, \dots, \omega_m) = \bigcup_{i=1}^m M(\omega_i) -$$

модель навколишніх предметів у ВП.

Якщо агентів багато, то мультиагентна модель ВР визначається співвідношенням

$$M(a_1, a_2, \dots, a_N, \omega_1, \dots, \omega_m) = \bigcup_{j=1}^N M(a_j, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m),$$

де N – кількість агентів.

Кожна точка r_ω предмета ω у геометричному ВП R^3 може змінювати своє положення із часом на

заданому інтервалі $[t_0, t_1]$ у силу діючих на предмет фізичних законів. У цьому випадку вона рухається по деякій траєкторії $r_\omega(t)$, $t \in [t_0, t_1]$ у геометричному ВП. Безліч таких точок утворить модель руху предмета $M(\omega)$ у геометричному ВП. Ця модель визначає в ВП пучок траєкторій, що описують динаміку предмета ω у термінах геометричного ВП, що залежить від законів механіки.

Аналогічні пучки траєкторії можуть виникнути у фізичному і сенсорному ВП агента. Вони також характеризують динаміку предмета, але вже в термінах фізичного або сенсорного ВП агента. Ця динаміка відповідає реальній динаміці предмета, що підкоряється в дійсності законам фізики та обробки сенсорної інформації.

Модель ВР як сукупність моделей агента і навколишніх предметів, що зберігаються в пам'яті, тобто в БД і БЗ агента, доцільно дискретизувати. Це досягається дискретизацією координатних осей ВП із рівним кроком, причому для різних осей величина кроку дискретизації може бути різною. У цьому випадку модель ВР стає точковою, що зручно з погляду комп'ютерного подання цієї моделі в БД і БЗ інтелектуальної системи управління агента.

Двовірна (2D) і тривірнірна (3D) моделі ВП після дискретизації являють собою двовірний або тривірний масиви (матриці) точок. Звичайна відстань між сусідніми точками вибирається рівним мінімальному порозу чутливості сенсорної системи агента. Ці точки визначаються своїми геометричними координатами і є носіями інформації про реальність у вигляді фізичних і сенсорних властивостей точок ВП. Для того, щоб відрізнити точки r_ω ВП, які відносяться до моделі предмету ω , від інших точок ВП, введемо предикат приналежності предмету ω виду

$$s_\omega(r_\omega) = \begin{cases} 1, & \text{при } r_\omega \in M(\omega); \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Аналогічним чином введемо предикат приналежності агенту виду

$$s_a(r_a) = \begin{cases} 1, & \text{при } r_a \in M(a); \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Усі точки дискретизованого геометричного ВП, які виділяються предикатами, відповідають реальним (матеріальним) об'єктам і мають певні фізичні та сенсорні властивості. При цьому фізичні властивості точок пов'язані з фізичними законами, що визначають їх динаміку в часі у геометричному ВП, тобто фізичні явища. Сенсорні властивості точок ВП служать для відображення та моделювання фактів і явищ реальності, які безпосередньо спостерігаються (вимірюваних) сенсорною системою агентів. До фізичних властивостей предмета відносять масоінерційні характеристики, щільність, пружність, кінетичну і потенційну енергії тощо. Прикладом сенсорних властивостей предметів служать їхні кольори, запах, звук і т.п. Значення цих властивостей звичайно задаються дійсними або цілими числами.

Отже, відкривається можливість єдиним чином закодувати різномірну та багатомодальну інформацію про реальність в БД і БЗ агента у формі моделей ВР.

Математично завдання планування дій колективу агентів може бути сформульоване в такий спосіб. Нехай є дві однакові групи по n агентів у кожній: $P = [P_0, P_1, \dots, P_{i-1}, P_i, P_{i+1}, \dots, P_{n-1}]$ – агенти 1-ї групи та $T = [T_0, T_1, \dots, T_{i-1}, T_i, T_{i+1}, \dots, T_{n-1}]$ – агенти 2-ї групи (супротивника). Кожна група складається з одного агента-захисника P_0 або T_0 і з $n-1$ агентів, що виконують захист/напад залежно від поточної ситуації: $[P_1, \dots, P_{i-1}, P_i, P_{i+1}, \dots, P_{n-1}]$ або $[T_1, \dots, T_{i-1}, T_i, T_{i+1}, \dots, T_{n-1}]$. Робоча зона являє собою прямокутну область розмірами $l_{\text{довжина}}^{\text{поле}} = l_{\text{ширина}}^{\text{поле}}$.

Кожен стратегічний об'єкт, керований агентом, може переміщатися з різною швидкістю. Область дій розподіляється на дві однакові основні зони: зона 1-ї групи та зона 2-ї групи, які розділені границею. У кожній такій зоні перебувають відповідні захисні спорудження з обмежуючою зоною дії. Для визначення місця розташування агентів вводиться декартова система координат. Вся область дій розбита на m квадратних ділянок S_j , що утворює повну безліч ділянок області $S = [S_0, S_1, \dots, S_{j-1}, S_j, S_{j+1}, \dots, S_{m-1}]$ (де $m > 2n$). Кожна ділянка характеризується координатами по осях ОХ, ОУ і приналежністю до однієї із зон. Під час тактичних дій кожному агенту відоме місце розташування агентів обох груп. Дії агентів повинні бути строго синхронізовані за часом. Через певні періоди часу кожен агент приймає рішення про чергову свою дію в складі групи, після чого він виконує її. Час, протягом якого агент приймає рішення, називається часом ухвалення рішення ($T_{\text{пр}}$), а час, затрачений на його виконання – часом виконання рішення ($T_{\text{вр}}$). При взаємодії з агентами своєї групи агент може виконати певні дії або перебувати від них на певній відстані, а при взаємодії із супротивником – перехоплювати ініціативу або створювати перешкоди для переміщення агентів супротивника.

Тактика поведінки i -го агента визначається завданням вибору його чергового цільового положення з безлічі ділянок області $S = [S_0, S_1, \dots, S_{j-1}, S_j, S_{j+1}, \dots, S_{m-1}]$ ($m > 2n$), при влученні агента в яку сукупна величина $\gamma_{i,j}$, що є деяким критерієм ефективності його дій у поточній ситуації, прагнула б до максимального значення.

Проблема полягає у формуванні деяких комплексних оцінок тих або інших цілеспрямованих дій кожного агента з погляду колективної ефективності. Значення такої оцінки кожної можливої j -ї цільової ділянки для кожного i -го агента – $\gamma_{i,j}$ може бути визначена як:

$$\gamma_{i,j} = a_{i,j} (k_1^{\text{cmp}} \gamma_1^{i,j} + k_2^{\text{cmp}} \gamma_2^{i,j} + k_3^{\text{cmp}} \gamma_3^{i,j} + k_4^{\text{cmp}} \gamma_4^{i,j} + k_5^{\text{cmp}} \sum_{v=0, v \neq i}^n \gamma_5^{i,j,v} + k_6^{\text{cmp}} \sum_{w=0, w \neq i}^n \gamma_6^{i,j,w} + k_7^{\text{cmp}} \gamma_7^{i,j})$$

де $a_{i,j}$ – коефіцієнт «агент-зона»;
 $\gamma_1^{i,j}$ – фактор «агент-ціль»;

γ_2^{ij} – фактор «ціль-оборона 2-ї групи»;
 γ_3^{ij} – фактор «ціль-оборона 1-ї групи»;
 γ_4^{ij} – фактор «ціль-елемент атаки»;
 $\gamma_5^{i,j,v}$ – фактор «ціль-агент 1-ї групи»;
 $\gamma_6^{i,j,w}$ – фактор «ціль-агент 2-ї групи»;
 γ_7^{ij} – фактор «ціль-границя»;
 $k_1^{cmp}, \dots, k_2^{cmp}$ – стратегічні коефіцієнти відповідних факторів [3].

Коефіцієнт $a_{i,j}$ дозволяє або забороняє i -му агенту переміщення в j -ту ділянку області. Коефіцієнт приймає нульове значення у випадку заборонених положень агента, а одиничне – у випадку дозволених. Таким чином, цей коефіцієнт визначає тактику дій кожного агента. Фактори $\gamma_1^{ij}, \gamma_2^{ij}, \gamma_3^{ij}, \gamma_4^{ij}, \gamma_5^{i,j,v}, \gamma_6^{i,j,w}, \gamma_7^{ij}$ дозволяють робити оцінку можливого j -го цільового положення i -го агента щодо відстаней до об'єктів і приймають значення в діапазоні від 0 до 1. Коефіцієнти $k_1^{cmp}, \dots, k_2^{cmp}$ встановлюють пріоритети і впливи відповідних факторів залежно від стратегії, обумовленої станом елемента атаки. Своім значенням коефіцієнт визначає пріоритет фактора, а знаком – його позитивний/негативний вплив. Варіюючи ними, можна задавати стратегію дій залежно від поточної ситуації.

Використовувані в системі методи мультиагентного планування порівняно з раніше зазначеними традиційними способами можуть застосовуватися в децентралізованих системах в реальному часі. Їх застосування забезпечує управління процесами планування і виконання завдань, вони можуть бути використані для управління групами об'єктів, що складаються з великої кількості пристроїв і здатні оперативно обробляти завдання великого об'єму.

Висновки. Системи управління групами об'єктів або робототехнічними засобами, у тому числі безпілотними пристроями, активно розвиваються в даний час, при цьому перспективним напрямком їх розвитку є вироблення технічних рішень для використання в них інструментів планування узгоджених групових дій мобільних апаратів при виконанні спільного завдання. Для успішного використання подібних систем їх функціонал повинен, крім планування завдань, дозволяти проводити коректування сформованих планів виконання завдань в умовах, що змінюються, у тому числі реагувати на непередбачені ситуації шляхом перерозподілу підзадач між окремими об'єктами групи. Універсальність і незалежність від контексту завдання пропонує методів рішення дозволить скоротити час на впровадження і знизити витрати на їх створення за рахунок скорочення стадії розробки програмних рішень. Таким чином, у короткі строки можливо проектування та введення в експлуатацію заснованих на використанні мультиагентних технологій планування програмно-апаратних комплексів нового покоління, здатних взаємодіяти і працювати в групі і застосованих для широкого спектру завдань в різноманітних областях.

Створення ефективних реальних додатків вимагає ще чималих зусиль в області методів органі-

зації кооперативного вирішення завдань агентами мультиагентної системи, методів організації переговорів при вирішенні конфліктів і створення відповідних протоколів. У цій області недостатньо використовуються теоретичні досягнення в області розподілених систем і паралельних обчислень. Поки повністю ігноруються відомі результати і досягнення вчених, зокрема, рефлексивні моделі і методи рефлексивного управління, запропоновані Лефевром, моделі колективної поведінки автоматів з лінійною тактикою і пам'яттю.

Роботи в області мультиагентних систем, особливо розробка додатків, вимагають залучення знань і технологій з ряду областей, які раніше були поза увагою фахівців зі штучного інтелекту. Перш за все це стосується паралельних обчислень, технології відкритої розподіленої обробки, забезпечення безпеки і мобільності агентів. Необхідні знання в області мережевих комп'ютерних технологій і, особливо, в області програмування в Інтернет.

З появою агентних технологій стає можливим якісне поліпшення процесу управління, зв'язку і своєчасного оповіщення. Безпека мобільних агентів – болюча точка технології Інтернет/Інтранет. Першопричину проблем інформаційної безпеки варто шукати в складності сучасних систем. Боротися зі складністю – значить робити системи більш безпечними.

Технологія мультиагентних систем не є просто об'єднанням різних результатів в області штучного інтелекту. Інтеграція, яка призводить до парадигми мультиагентних систем, привносить ряд принципово нових властивостей і можливостей в інформаційні технології і по суті являє собою якісно новий, більш високий рівень її розвитку, той рівень, який дозволяє прогнозувати її провідне становище в найближчі десятиліття.

Список літератури

1. Литвин В.В. Мультиагентні системи підтримки прийняття рішень, що базуються на прецедентах та використовують адаптивні онтології. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2009. № 2 (21). С. 120–126.
2. Рассел С., Норвіг П. *Искусственный интеллект*. Москва; Санкт-Петербург; Киев: Вільямс, 2006. 1408 с.
3. Тимофеев А.В., Экало Ю.В. *Системы цифрового и адаптивного управления роботом*. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 1999. 248 с.
4. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами. *Int. Journal «Information Technologies & Knowledge»*, 2011. Vol. 5, no. 3. P. 237–245.
5. Швецов А.Н., Дианов С. В. Мультиагентная информационная технология решения задач управления и принятия решений в организационных системах. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2015. № 2. С. 49–54.
6. Щедрина А.А. Интеллектуальные агенты как средство автоматизации роли преподавателя. *Educational Technology & Society*. 2002. № 5(2). С. 187–197.
7. Kravari K., Bassiliades N. A Survey of Agent Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2015. Vol. 18, no. 1. P. 1–18.
8. Naumov L., Shalyto A. Automata Theory for Multi-Agent Systems Implementation. *Proceedings of Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems*. MA, Boston. 2003.
9. Skobelev P., Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). *Multi-*

Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Elsevier, 2015. P. 207–230.

10. Timofeev A.V. *Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems. International Autonomous Systems. International Scientific Issue.* Karlsruhe, Ufa, USATU, 1998. P.119–124.

References (transliterated)

1. Lytvyn V.V. Multyagentni systemy pidtrymky pryjnyattya rishen', shho bazuyutsya na precedentax ta vykorystovuyut` adaptivni ontologiyi [Multi-agent decision support systems based on precedents and use adaptive ontologies]. *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnya [Radionics. Informatics. Management]*. 2009. Vol. 2 (21), pp. 120–126.
2. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt [Artificial intelligence]*. Moscow; SPb.; Kyiv: Vil'yams, 2006. 1408 p.
3. Timofeev A.V., Ekalo Yu.V. *Sistemy cifrovogo i adaptivnogo upravleniya robotov [Digital and adaptive robot control systems]*. SPb.: Izd-vo SPbGU, 1999, 248 p.
4. Timofeev A.V., YUsupov R.M. *Principy postroeniya integrirovannyh sistem mul'tiagentnoj navigacii i intellektual'nogo upravleniya mekhatronnymi robotami [Principles of construction of integrated systems of multi-agent navigation and intelligent control of mechatronic robots]*. *Int. Journal «Information Technologies & Knowledge»*, 2011. Vol. 5, no. 3. P. 237–245.
5. Shvecov A.N., Dianov S. V. *Mul'tiagentnaya informacionnaya tekhnologiya resheniya zadach upravleniya i prinyatiya reshenij v organizacionnyh sistemah [Multi-agent information technology for solving management and decision-making problems in organizational systems]*. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of Cherepovets State University]*. 2015. Vol. 2. P. 49–54.
6. Shchedrina A.A. *Intellektual'nye agenty kak sredstvo avtomatizacii roli prepodavatelya [Intelligent agents as a means of automating the role of the teacher]*. *Educational Technology & Society*. 2002. Vol. 5(2). P. 187–197.
7. Kravari K., Bassiliades N. *A Survey of Agent Platforms.* *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2015. Vol. 18, no. 1. P. 1–18.
8. Naumov L., Shalyto A. *Automata Theory for Multi-Agent Systems Implementation. Proceedings of Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems.* MA, Boston. 2003.
9. Skobelev P., Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). *Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry.* Elsevier, 2015. P. 207–230.
10. Timofeev A.V. *Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems. International Autonomous Systems. International Scientific Issue.* Karlsruhe, Ufa, USATU, 1998. P.119–124.

Надійшло (received) 12.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Коноваленко Ольга Євгенівна (Коноваленко Ольга Евгеньевна, Konovalenko Olga) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 315-15-84; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4653-3139>; e-mail: koe2010@ukr.net.

Брусенцев Віталій Олександрович (Брусенцев Виталий Александрович, Brusentsev Vitalij) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Харківська державна академія культури, доцент кафедри інформаційних технологій; тел.: (057) 759-74-73; e-mail: vitalij.brusentsev@ukr.net.