

УДК 621.391.83(045)
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.17>

Ігнат МИРОШНИЧЕНКО

аспірант кафедри інформаційних технологій,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», ignat.myr@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7810-2678

ІНТЕГРОВАНІ НАВІГАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ПРОТОКОЛИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ: АРХІТЕКТУРИ, МОДЕЛІ ТА ВИКЛИКИ РЕАЛІЗАЦІЇ В ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Анотація. У роботі представлено підхід до розробки автономних інтелектуальних систем (АІС), що здатні діяти самостійно в динамічних середовищах без постійного втручання оператора. Такі системи складаються з груп інтелектуальних агентів, об'єднаних у мережу зі спільною метою – виконання складних місій.

Метою статті є аналіз обмежень автономного функціонування в частині комунікаційних та навігаційних можливостей елементів системи; формулювання ключових вимог до реалізації зв'язку та навігації в автономних інтелектуальних групах; а також розробка і оцінка відповідної архітектури і моделей, здатних забезпечити стабільну, ефективну та координовану діяльність системи під час виконання поставлених завдань.

Методологія дослідження ґрунтується на системному аналізі функціональних властивостей автономних систем із залученням моделей інформаційної взаємодії для оцінки ефективності комунікаційних і навігаційних процесів. Було застосовано моделювання логічної архітектури та протоколів взаємодії агентів у динамічному середовищі для визначення оптимальних структур управління.

Наукова новизна. Особливу увагу приділено розробці моделей навігації та зв'язку, які виступають основними функціональними компонентами забезпечення автономної мобільності. Автор розкриває функціональні вимоги до систем зв'язку та навігації, включаючи повноту, швидкодію, енергоефективність, узгодженість і стійкість. Наведено аналіз топологій зв'язку (централізовані, децентралізовані, ієрархічні, гібридні) та особливості їх впливу на ефективність взаємодії агентів.

Висновки. У сфері навігації основний акцент зроблено на інтеграцію глобальних супутникових (GNSS) та інерціальних (INS) систем як основи для підвищення точності й стійкості в реальних умовах. У статті запропоновано протокол консенсусної навігації, який дозволяє усунути розбіжності між агентами шляхом обміну даними, забезпечуючи когерентність рішень. Запропоновано архітектурну модель протокольної структури автономної мобільності, яка об'єднує зв'язок і навігацію в логічні шари з високою адаптивністю до конкретних завдань. Такий підхід сприяє створенню стійких, масштабованих та універсальних автономних систем, придатних для застосування в різних галузях, від безпілотних технологій до рятувальних операцій.

Ключові слова: автономні системи, автономні мережі, системи розподіленого інтелекту, навігація, зв'язок.

Ihnat MYROSHNYCHENKO. INTEGRATED NAVIGATION AND COMMUNICATION PROTOCOLS FOR AUTONOMOUS INTELLIGENT SYSTEMS: ARCHITECTURES, MODELS AND IMPLEMENTATION CHALLENGES IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

Abstract. The paper presents an approach to the development of Autonomous Intelligent Systems (AIS) capable of operating independently in dynamic environments without continuous operator intervention. Such systems consist of groups of intelligent agents united in a network with a common goal – to carry out complex missions.

Purpose. To analyze the constraints of autonomous operation in terms of the communication and navigation capabilities of system elements; to formulate key requirements for the implementation of communication and navigation in autonomous intelligent groups; and to develop and evaluate the corresponding architecture and models capable of ensuring stable, efficient, and coordinated system performance during task execution.

Methodology. The research methodology is based on a systems analysis of the functional properties of autonomous systems using models of information interaction to assess the effectiveness of communication and navigation processes. Logical architecture modeling and agent interaction protocols in a dynamic environment were applied to determine optimal control structures.

Scientific novelty. Special attention is paid to the development of navigation and communication models, which serve as the main functional components ensuring autonomous mobility. The author outlines functional requirements for communication and navigation systems, including completeness, responsiveness, energy efficiency, consistency, and resilience. The paper analyzes communication topologies (centralized, decentralized, hierarchical, hybrid) and their impact on the efficiency of agent interaction.

Conclusions. In the field of navigation, the focus is on integrating Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Inertial Navigation Systems (INS) as a basis for increasing accuracy and robustness in real-world conditions. The article proposes a consensus-based navigation protocol that resolves discrepancies between agents through data exchange, ensuring coherence in decision-making. An architectural model of a protocol structure for autonomous mobility is proposed, integrating communication and navigation into logical layers with high adaptability to specific tasks. This approach promotes the creation of robust, scalable, and versatile autonomous systems suitable for use in various domains, from unmanned technologies to rescue operations.

Key words: autonomous systems, autonomous networks, distributed intelligence systems, navigation, communication.

© І. Мирошніченко, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Актуальність теми зумовлена сучасними глобальними викликами, що потребують високого рівня технологічної готовності до реагування в умовах підвищеної невизначеності, небезпеки та обмеженого людського доступу. Автономний інтелект стає ключовим напрямом розвитку інтелектуальних систем, оскільки він забезпечує не лише виконання задач без участі людини, але й підвищує рівень адаптивності, безпеки та оперативності в реальному часі.

Особливої важливості це набуває у сферах, де критичне значення має швидке отримання точних навігаційних і комунікаційних даних: під час ліквідації наслідків стихійних лих, проведення пошуково-рятувальних операцій, моніторингу екологічних змін у важкодоступних місцях, спостереження за лісовими пожежами та забрудненням природних ресурсів. Впровадження ефективних протоколів обміну інформацією між автономними елементами забезпечує не лише стабільну взаємодію в межах системи, але й підвищує загальну ефективність виконання місій. У цьому контексті дослідження принципів та моделей навігаційної і комунікаційної взаємодії між агентами є критично важливим для забезпечення надійної та скоординованої поведінки автономних мобільних платформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі проблематика організації автономних груп інтелектуальних елементів є об'єктом активного вивчення як вітчизняними, так і зарубіжними дослідниками, які пропонують численні моделі та стратегії організації автономних груп інтелектуальних елементів. Але такі аспекти, як вимоги до функцій зв'язку та навігації, що забезпечують ефективну та надійну діяльність автономних систем в умовах динамічного середовища, а також концепціям об'єктно-орієнтованого сприйняття, мобільності та адаптивної взаємодії агентів все ж не до кінця досліджені. Так, у своїй роботі Р. Бабає та А. Ехяей [4] дослідили керування групою безпілотних апаратів для транспортування вантажів, запропонувавши алгоритм на основі розширеного фільтра Кальмана та теорії Мура-Пенроуза для стійкого керування. Лю Лю в своїй роботі [10] розробила протокол для розподіленої системи BPLA, що підтримує зміну формації при фіксованій топології. Уолкер Голлник [6] запропонував методологію проектування міської повітряної мобільності з оцінкою її технічної й експлуатаційної доцільності. Кучеров Д., Фу М., Козуб А. [2] запропонували навігаційні та комунікаційні протоколи для ефективної взаємодії елементів автономних систем у динамічних середовищах.

Тенедоріо та співавтори [15] узагальнили інновації в геоінформаційних системах та принципах «зеленого» урбанізму для сталого розвитку міст. Сяохай Юй ін. [16] запропонували протокол «лідер-послідовник» для транспортної платформи на базі Arduino з урахуванням кута нахилу дороги. Лі Юна та Дженг Чана [9] розробили кооперативне керування морськими буксирами з інтелектуальним протоколом для стабільної навігації. К. Шарма та Н. Гонді [14] здійснили огляд таких протоколів Інтернету, як CoAP, MQTT, XMPP та інші, що застосовуються на різних рівнях архітектури, і проаналізували їхню ефективність та надійність за критеріями енергоефективності, безпеки та простоти впровадження. М. Сакіб та співавтори [13] досліджували питання безпеки та поточні атаки, характерні для кожного рівня архітектури Інтернету речей. Основи фундаментальних комунікаційних протоколів – TCP, UDP, IP, каналного та фізичного рівнів – були розглянуті в роботі Д. Г. Мораїса [11] та представлено аналіз стеків протоколів, що використовуються в сучасних системах передачі даних, зокрема в контексті бездротових технологій, таких як 5G NR, Wi-Fi 6 та Bluetooth LE 5. Автор детально розглядає функціонування протоколів на різних рівнях мережевої моделі, що є важливим для розуміння архітектури бездротового зв'язку у смартфонах.

Еом Тхе-Іль та ін. [5] описали стек протоколів через MSC-діаграми, а Д. Херцог [8] використав OSI та TCP/IP як приклади складних моделей протоколів для надійного проектування. Р. Олфаті-Сейбер [12] запропонував нові методи керування інтелектуальними системами на основі поведінкових реакцій, а Жчанг К. [17] створив розподілений протокол для мобільних транспортних засобів, що підтримує групову конфігурацію.

Аналіз досліджень вказує на існування обмежень сучасних автономних інтелектуальних систем: недостатній рівень автономії, вузька спеціалізація, обмежений інтелектуальний потенціал у розподілених сценаріях і низька масштабованість через залежність від людських ресурсів. Це ускладнює їх застосування у складних динамічних середовищах.

Метою статті є вивчення обмежень автономної роботи щодо комунікаційних та навігаційних функцій елементів; визначення основних вимог до комунікаційних та навігаційних рішень автономних інтелектуальних груп; та на основі висунутих вимог, пропонування та оцінка рішень, таких як архітектури та моделі комунікаційних та навігаційних функцій, які забезпечать ефективну та надійну роботу групи при виконанні її місії.

Виклад основного матеріалу. Автономну групу можна визначити як взаємодіючу групу інтелектуальних елементів, здатних приймати рішення, які мають визначену місію, зокрема, з чітко визначеними

критеріями успіху; потребують взаємодії елементів під час виконання; здатні працювати без постійного контролю з боку керуючого органу (оператора) у будь-який час або протягом тривалого часу.

Розподілена автономна група також вирізняється умовою, що всі елементи групи мають подібний рівень інтелекту, тобто всі здатні приймати рішення з однаковими або подібними вхідними факторами, на відміну від моделі центрального інтелекту, де один або підмножина елементів має вищий рівень інтелекту та приймає рішення, що виконуються іншими моделями (також відома як модель «головний-підлеглий» або «лідер-наслідувач»).

Проблему розробки та впровадження надійних та ефективних протоколів зв'язку та навігації можна розглядати як один з критично важливих елементів ефективної роботи групи. Розглянемо основні вимоги, яким повинні відповідати ефективні та надійні комунікаційні вузли та протоколи групи, на основі сформульованих вимог опишемо та розглянемо моделі автономних комунікаційних мереж та оцінимо запропоновані моделі в рамках цілей автономної роботи та місії.

Операційна модель автономних груп може відрізнятися від операційної моделі систем та мереж, керованих людиною, кількома способами, зокрема:

- елементи повинні приймати власні рішення під час роботи, не покладаючись на команди оператора;
- елементи повинні підтримувати постійний та надійний зв'язок зі своїми колегами для обміну важливою інформацією, необхідною для надійної роботи;
- протоколи систем зв'язку та навігації повинні бути надійними та стійкими до факторів навколишнього середовища та несприятливих впливів, як природних, так і техногенних;
- системи повинні працювати в межах обмежень на ресурси, що накладаються умовами автономної мобільності та функціонування;
- на найвищому рівні автономності система повинна бути здатною працювати в повністю автономному режимі протягом тривалого часу без будь-якого контролю з боку оператора.

Моделі автономної роботи, описані вище, диктують наступні основні вимоги до комунікаційних та навігаційних (Comm&Nav, C&N) компонентів автономних інтелектуальних систем. Для забезпечення ефективного функціонування автономних інтелектуальних систем у груповій взаємодії необхідно дотримуватись низки критичних вимог до інформаційного обміну та комунікаційних процесів. Насамперед, важливою є повнота отримуваної інформації: кожен елемент системи повинен мати доступ до всіх необхідних вхідних даних для прийняття рішень як через власні сенсори, так і через обмін інформацією з іншими учасниками групи. Ефективність комунікацій визначається раціональним використанням ресурсів, зокрема енергії, що є особливо важливо в умовах автономного функціонування. Крім того, швидкодія передавання даних повинна відповідати часовим обмеженням, накладеним динамікою середовища та необхідністю оперативного реагування.

Ще однією важливою вимогою є узгодженість та послідовність інформації між елементами системи, що гарантує єдність ситуаційного сприйняття та скоординованість дій. Надійність і стійкість комунікаційної інфраструктури до впливу несприятливих зовнішніх умов (наприклад, завад, перебоїв зв'язку або обмеженого енергозабезпечення) є критичними для забезпечення стабільної роботи автономних систем у реальному середовищі. Сукупність цих характеристик формує основу для побудови надійних, ефективних та адаптивних колективних АІС.

Одним із ключових завдань проектування автономних інтелектуальних систем (АІС), здатних відповідати вимогам до критичних систем у складі автономних груп, є організація внутрішньогрупової комунікації та характер інформаційного обміну між елементами. Від структури взаємодії значною мірою залежать ефективність прийняття рішень, узгодженість дій та загальна надійність функціонування системи в цілому. На концептуальному рівні виділяють кілька базових моделей організації АІС. Централізована модель (типу «головний – підлеглий») передбачає прийняття рішень окремою підмножиною елементів, які формують команди для інших учасників групи. Децентралізована або повністю розподілена модель ґрунтується на автономному прийнятті рішень кожним елементом на основі даних, отриманих із середовища та від інших учасників. Гібридна модель поєднує риси централізованого та децентралізованого підходів: певні рішення делегуються уповноваженим елементам, тоді як інші приймаються децентралізовано. Ієрархічна модель передбачає поділ системи на множину автономних підгруп, що координуються вищим рівнем управління із застосуванням відповідних протоколів координації та управління.

Конфігурації організаційних та комунікаційних функцій автономних груп проілюстровано на (рис. 1).

Розглянемо логічну організацію таких функцій в автономній інтелектуальній системі та припустимо, що елементи групи оснащені відповідними фізичними інструментами для встановлення та підтримки зв'язку, необхідного для виконання місії та в межах обмежень автономної роботи.

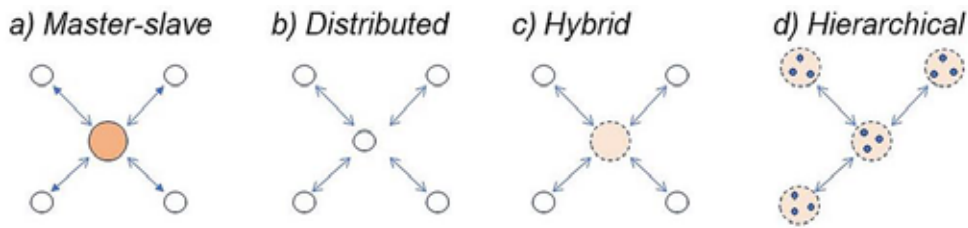


Рис. 1. Організаційні та комунікаційні моделі автономних інтелектуальних систем

Вимоги повноти та зв'язності підкреслюють необхідність того, щоб комунікаційний рівень забезпечував можливість передачі інформації між будь-якими елементами, якими необхідно обмінюватися під час операції, у достатньому обсязі та протягом встановленого часу; це можна інтерпретувати як обмеження безперервної та безперебійної логічної зв'язності, rc ; та мінімальної гарантованої швидкості передачі інформації, ri . Логічну зв'язність можна реалізувати за допомогою низки моделей фізичної зв'язності в динамічній автономній групі: повністю взаємопов'язана сітчаста, точка-точка, центральний диспетчер, ширококомовна, ретрансляційна та інші.

Вибір моделі зв'язку може бути продиктований умовами експлуатації та типом групи/системи. Наприклад, у повністю розподіленій автономній системі протоколи зв'язку можуть виконуватися будь-яким елементом групи, але моделі центрального та диспетчерського типів будуть нездійсненними через спеціальні функції/ролі вибраних елементів.

Далі, потрібно буде оцінити моделі зв'язності щодо основних вимог, викладених раніше. Наприклад, розглянемо взаємозв'язок між потужністю, необхідною для надійного зв'язку, та вартістю програмної обробки запитів на зв'язок в ієрархічній моделі (рис. 1, d).

Припустимо, що мінімальна потужність, необхідна для надійної обробки запиту, дорівнює p_m . Тоді, щоб мати змогу обробляти комунікаційні команди на відстані rc , потужність передавача повинна бути:

$$p_m = \alpha \frac{P_t}{r_c^2}, \quad (1)$$

де P_t – потужність передавача елемента,
 α – додатна константа.

Якщо розмір операційної групи D_g перевищує проміжок зв'язку rc , необхідно ввімкнути режим ретрансляції, який обробляє та повторно передає запит, доки він не досягне пункту призначення. Деякі події повторної передачі можна оцінити як:

$$nt \sim \frac{D_g}{r_c} = \frac{\beta}{r_c}, \quad (2)$$

де β – const, оскільки розмір групи вважається постійним у межах обраної моделі роботи.

Для того щоб зрозуміти, як вибір потужності передачі, а отже, і тривалості зв'язку, вплине на вартість програмних обчислень (циклів процесора) під час обробки запитів на зв'язок. Вартість програмного забезпечення для обробки запиту розраховується за формулою:

$$S_c \propto n_t = \frac{\gamma}{\sqrt{P_t}} \quad (3)$$

З (3) випливає, що зменшення потужності передачі в комунікаційному модулі автономної групи може призвести до збільшення необхідної обчислювальної потужності в утилітах обробки запитів. З іншого боку, з моделлю ширококомовлення, можна отримати такі результати:

$$P_t \sim p_m D_g^2; S_c \sim N_g \quad (4)$$

де N_g – кількість елементів у групі/системі, оскільки кожен елемент має обробляти кожен запит, що надходить від усіх інших елементів. Тоді як потужність передачі, так і вартість програмного забезпечення можна вважати постійними в межах обраної архітектури та конфігурації групи, і балансування як у (3) вище, неможливе.

Очевидно, що врахування таких міркувань під час проектування архітектури та операційних моделей автономних груп може бути важливим і навіть критично важливим для ефективної та надійної роботи систем.

Розглянуті приклади моделей організації комунікаційних функцій в автономних мобільних системах ілюструють застосування суттєвих обмежень на операційні параметри групи, що впливає з основних вимог, сформульованих раніше. Враховуючи обмеження формату, детальний огляд комунікаційних моделей та відповідних обмежень на параметри та компоненти системи, що виникають із вимог автономної роботи, сформульованих раніше, буде наведено далі.

Навігація є важливим компонентом мобільної АІС, який відповідає за виконання дій та функцій, необхідних для місії, у правильному географічному місці та у правильний час. Навігаційна компонента забезпечує основу для наступних функцій, необхідних для базової роботи та повноцінного функціонування автономної системи:

- визначення точного місцезнаходження (у тривимірному просторі), орієнтації, напрямку та інших параметрів траєкторії;
- перевірка правильності, з необхідною точністю, розташування, напрямку та інших параметрів руху;
- функції, процедури та протоколи для підтримки мобільності, пересування та позиціонування в бажаному географічному місці;
- стійкість та відновлення у випадках функціональних та елементних збоїв; та інші.

Наразі глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), такі як GPS та інші, вважаються стандартом та методом вибору для навігаційної підтримки пілотованих та автономних систем, включаючи безпілотні літальні апарати, наземні та морські роботи (з адаптацією технології), використання яких може бути ефективним для виконання різних функцій та складних завдань у цивільній, безпековій та військовій сферах. Однак GNSS, як єдине джерело та основа навігаційної підтримки може мати важливі обмеження: вона може бути недоступна в усіх середовищах, таких як під водою або через перешкоди тощо, і з цієї причини зазвичай шукають додаткові або додаткові методи підвищення надійності навігаційної функції.

Поєднання інерціальної навігаційної системи (INS) та (GNSS) стає поширеним вибором, який може компенсувати обмеження та недоліки ефірних систем. Наприклад, у міських районах система GNSS може бути недоступною через ефекти блокування сигналу, що можна компенсувати навігаційними розрахунками. З іншого боку, інерціальна система може підтримувати задовільну точність лише на коротких відстанях, і система GNSS допомагає їй зменшити накопичення похибок вимірювання з відстанню [7].

Таким чином, спільне використання цих систем може дозволити, з одного боку, обмежити поширення помилок менш точної, але більш інформативної інерціальної системи, а з іншого боку, збільшити швидкість доставки інформації до бортових споживачів, значно покращивши стійкість та зменшивши шумову складову помилок високоточної супутникової системи. З окреслених причин інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи (ІІНС) стають дедалі популярнішими в застосуваннях, що вимагають високої надійності та стійкості навігаційної системи, включаючи автономні інтелектуальні системи, де вона може мати критично важливий вплив.

Цей короткий огляд демонструє, що наразі існує ряд варіантів для проектування та розробки навігаційних компонентів і функцій автономних інтелектуальних систем для широкого спектру завдань, включаючи критично важливі, в різних середовищах: наземних, морських, підводних та авіаційних сферах застосування. Це забезпечує надійну та узгоджену роботу навігації як важливої та критичної логічної функції (рівня) автономної системи.

Для ілюстрації розглянемо приклад. Припустимо, що автономна система, що складається з інтелектуальних агентів $\{a_1 \dots a_N\}$, які використовують модель ширококомовного зв'язку, спирається на навігацію. Припустимо, що агенти приймають рішення щодо мобільності під час виконання місії на основі навігаційних вимірювань, виконаних елементами, $M = \{m_1 \dots m_N\}$.

З причин, коротко описаних раніше, немає гарантії, що набір вимірювань $M(t)$ буде завжди узгодженим між елементами. Наприклад, навігаційний модуль на певному елементі може вийти з ладу або зазнати несприятливої статистичної події тощо. Тоді рішення, прийняті таким елементом, можуть бути несумісними з рішеннями інших елементів групи, і він може зрештою втратити узгодженість у роботі, що негативно вплине на успіх місії.

Щоб протидіяти такій можливості, можна реалізувати протокол консенсусу/когерентності на основі моделі ширококомовного зв'язку, за допомогою якого агенти періодично обмінюються своїми навігаційними вимірюваннями з найближчими сусідами або всією групою. Кожен агент, наприклад потім k приймає рішення на основі результатів вимірювання: m_k та інформації, отриманої від групи. Якщо вимірювання виявляються узгодженими в межах певного запасу, дозволеного функцією групової операції, може бути виконана звичайна послідовність рішень; навпаки, якщо вимірювання елемента

виявляється несумісним з вимірюваннями групи, може бути викликано альтернативне (резервне) консенсусне рішення на основі даних, сумісних для більшості агентів.

Іншими словами, навігаційне рішення $D(m_k)$ модифікується за допомогою функції прийняття рішень $\tilde{D}(m_k, M)$, яка враховує вимірювання інших агентів та призводить до консенсусного рішення $C(M)$ у разі розбіжностей:

$$\tilde{D}(m_k, M) = D(m_k), m_k \notin M; \text{else } \tilde{D}(m_k, M) = C(M) \quad (5)$$

Обмін навігаційними даними в автономній групі як основа для консенсусу, що забезпечує узгодженість у прийнятті рішень щодо навігації та мобільності, проілюстровано на (рис. 2).

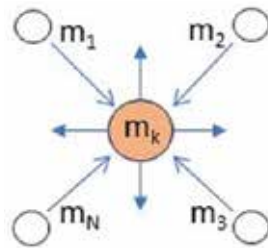


Рис. 2. Протокол навігації на основі консенсусу/когерентності в автономній мобільній системі

Наведений вище приклад протоколу інтелектуальної когерентної навігації демонструє можливість проектування інтелектуальної взаємодії між елементами автономних інтелектуальних систем, які підтримують узгоджену, надійну та стійку роботу в несприятливих умовах та у випадках несправності та збоїв.

Функції зв'язку та навігації в протокольному структурі автономної інтелектуальної мобільності, що обговорюються в цій роботі, забезпечують критично важливі базові послуги для автономної інтелектуальної системи, дозволяючи інтелектуальним агентам обмінюватися інформацією, необхідною для виконання функцій та операцій, визначати місцезнаходження, виконувати завдання напрямку та руху тощо.

З точки зору ефективної організації функцій різних типів в інтелектуальних системах високої складності, інкапсуляція таких функцій та утиліт у логічні групи або «шари», визначені відповідними протоколами, видається природним рішенням, яке привернуло увагу дослідницької спільноти Еом Тхелль та ін [5], Херцог Д. [8], Шмельова Т. [3], Кучеров Д. [1]. Запровадження інкапсульованої протокольної структури може забезпечити низку суттєвих переваг порівняно з жорстко закодованими («запрограмованими до програми») рішеннями. Зокрема, спостерігається спрощення процесу проектування та впровадження за рахунок використання сумісних стандартних функцій, що сприяє скороченню повного циклу – від розробки до експлуатації. Ізоляція функціональних рівнів у межах інкапсульованої архітектури забезпечує підвищену надійність системи, зменшуючи ризики міжрівневих збоїв. Крім того, така структура забезпечує високу гнучкість дизайну та функціональну універсальність, що дозволяє динамічно адаптувати систему до різних умов експлуатації та специфіки завдань.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Узагальнюючи викладене, встановлено, що автономні інтелектуальні системи (AIC) залишаються актуальним об'єктом наукових досліджень. Попри досягнутий прогрес, вони й досі характеризуються обмеженнями щодо автономії, масштабованості, функціональної гнучкості та адаптації до складних середовищ. Проаналізовано сучасні підходи до побудови протоколів і моделей мобільних систем з автономним інтелектом, з акцентом на критично важливі аспекти комунікації та навігації. Запропоновано методологію аналізу дій агентів, що базується на структурній організації групової поведінки, а також визначено вимоги до систем зв'язку та навігації й окреслено ключові компоненти архітектури автономних систем. Найбільш перспективними визнано гібридні навігаційні рішення (наприклад, GNSS/INS), які дозволяють підвищити точність та ефективність. Для підвищення функціональності AIC запропоновано універсальну протокольну структуру автономної мобільності, що забезпечує модульність, надійність, сумісність і спрощення проектування завдяки стандартизованим функціям. Очікується, що стандартні структури спільних утиліт та функцій слугуватимуть основою для появи простору та екосистеми мобільних автономних інтелектуальних систем з різноманітним та універсальним застосуванням у різних завданнях та областях.

Список використаних джерел:

1. Кучеров Д., Долгих С., Мирошніченко І., Пошивайло О. Протокольні та логічні моделі для забезпечення надійності та стійкості автономних систем БПЛА. Матеріали 13-ї Міжнародної конференції з надійних систем, послуг і технологій. Афіни, Греція, 2023. С. 1–7. doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416491 (дата звернення: 28.04.2025)

2. Кучеров Д., Фу М., Козуб А. Синтез законів керування рухом групи БПЛА з природними перешкодами. Автоматизовані системи в авіаційній та аерокосмічній галузях: зб. наук. праць / ред. Т. Шмельова, Ю.В. Шмельова, Н. Сікирда, Н. Різун, Д. Кучеров, К. Дергачов. Суми : Вид-во СумДУ, 2019. С. 193–219.
3. Шмельова Т., Ковальов Ю. Н., Долгих С., Бурлака О. Оптимізація польоту автономних груп БПЛА на основі геометричного моделювання. *Матеріали 5-ї Міжнародної конференції «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів»*, Київ, Україна, 2019. С. 79–82. doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943856. (дата звернення 01.05.2024)
4. Babaie R., Ehyaei A. Cooperative Control of Multiple Quadrotors for Transporting a Common Payload. *AUT Journal of Modeling and Simulation*. 2018. № 50(2). P. 147–156. doi: 10.22060/miscj.2018.14252.5100. (date of access: 15.04.2025)
5. Eom T.-I., Lee W.-Y., Lee D.-Y., Kim J.-H., Hur W.-H. Procedure-based development platform for communication protocol stack software. In *Proceedings of the IEEE Conference on Advanced Microsystems for Automotive Applications (CAMAD) 2016*. P. 12–17. doi: <https://doi.org/10.1109/CAMAD.2016.7790323>. (date of access: 17.04.2025)
6. Gollnick M., Niklass M., Swaid M. Methodology and initial results of the assessment of UAM concept potential. *Proceedings of Aerospace Europe Conference, 2020. Hamburg*, 1–11. URL: <https://www.academia.edu/66696287> (date of access: 20.04.2025)
7. Hansen J. M., Fossen T. I., Johansen T. A. Nonlinear observer design for GNSS-aided inertial navigation systems with time-delayed GNSS measurements. *Control Engineering Practice*, 2017. 60, 39–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.11.016>. (date of access: 18.04.2025)
8. Hercog D. Protocol stack. In *Communication protocols: Principles, methods, and specifications. Springer International Publishing*. 2020. P. 67–81. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50405-2_5 (date of access: 20.04.2025)
9. Li Y., Zheng J. Design and implementation of cooperative turning control for the towing system of unpowered facilities. *IEEE Access*. 2018 № 99. P. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2819692> (date of access: 21.04.2025)
10. Liu L., Lian, X., Zhu C., He L. Distributed cooperative control for UAV swarm formation reconfiguration based on consensus theory. *2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. 2017. P. 264–268. doi: <https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291392> (date of access: 1.05.2025)
11. Morais D. H. Data communication systems protocol stacks. *5G NR, Wi-Fi 6, and Bluetooth LE 5 (Chapter 2)*. 2023. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33812-0_2 (date of access: 15.04.2025)
12. Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2006. № 51(3). P. 401–420. doi: <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.864190> (date of access: 01.05.2025)
13. Saqib M., Jasra B., Moon A. H. A systematized security and communication protocols stack review for Internet of Things. *IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCN)*. Bangluru, India. 2020. P. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1109/INOCN50539.2020.9298196> (date of access: 28.04.2025)
14. Sharma C., Gondhi N. K. Communication protocol stack for constrained IoT systems. In *2018 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*. Bhimtal, India. 2020. doi: <https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2018.8519904> (date of access: 28.04.2025)
15. Tenedório A., Estanqueiro R., Henriques C. D. Methods and applications of geospatial technology in sustainable urbanism. Pennsylvania, USA: IGI Global. 2021. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2249-3> (date of access: 26.04.2025)
16. Yu X., Guo G., Gong J. Cooperative control for a platoon of vehicles with leader-following communication strategy. *Chinese Automation Congress (CAC)*. 2020. P. 6721–6726. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8243988>. (date of access: 01.05.2025)
17. Zhang Q., Lapierre L., Xiang X. Distributed control of coordinated path tracking for networked nonholonomic mobile vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013. № 9(1). P. 472–484. doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219541> (date of access: 17.04.2025)

Дата надходження статті: 13.06.2025

Дата прийняття статті: 17.06.2025

Опубліковано: 23.09.2025