

РОМАНЯК ОЛЕКСАНДР

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0003-5713-0543>e-mail: oleksandr.i.romaniak@lpnu.ua**ЛЕВУС ЄВГЕНІЯ**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0001-5109-7533>e-mail: yevheniia.v.levus@lpnu.ua

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ ТА НАПІВАВТОНОМНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ ПРИСТРОЯМИ ЛОГІСТИКИ НА ПОЛІ БОЮ: АНАЛІЗ ТА МОЖЛИВІ РІШЕННЯ.

У статті проведено системний аналіз методів і технічних рішень для управління автономними та напівавтономними роботизованими платформами, призначеними для використання в бойовій логістиці. Визначено основні виклики, пов'язані з нестабільністю каналів зв'язку, активним застосуванням засобів радіоелектронної боротьби та високою динамікою бойового середовища. На основі аналізу сучасних технологій запропоновано концептуальну модель адаптивної архітектури управління, яка поєднує компонентно-орієнтований підхід, онтологічні моделі знань і технології брокерів повідомлень для забезпечення стійкої міжплатформної взаємодії за складних умов.

Розроблена структура онтологічної моделі бойової логістики дозволяє платформам формувати обґрунтовані рішення щодо планування маршрутів, розподілу ресурсів і ухилення від зон підвищеної загрози. Запропоновано методичні підходи до динамічної адаптації поведінки роботизованих систем із використанням циклу МАРЕ-К та принципів роевого інтелекту, що підвищує живучість і гнучкість систем управління. Практичні рекомендації щодо вибору технологій брокерів повідомлень, таких як RabbitMQ та Apache Kafka, дозволяють оптимізувати інформаційний обмін у бойових умовах.

Отримані результати базуються на даних симуляційних досліджень і моделювання сценаріїв бойової логістики. Окреслено перспективи подальших досліджень, зокрема у напрямі польових випробувань, оптимізації алгоритмів динамічної адаптації та розробки експериментальних зразків роботизованих платформ для бойової логістики.

Ключові слова: бойова логістика, автономні роботизовані платформи, адаптивне управління, роевий інтелект, МАРЕ-К.

ROMANIAK OLEKSANDR

Lviv Polytechnic National University

LEVUS YEVHENIYA

Lviv Polytechnic National University

METHODS AND TOOLS FOR MANAGING AUTONOMOUS AND SEMI-AUTONOMOUS ROBOTIC LOGISTICS DEVICES ON THE BATTLEFIELD: ANALYSIS AND POSSIBLE SOLUTIONS

This research investigates a systematic analysis of methods and technical solutions for managing autonomous and semi-autonomous robotic platforms intended for combat logistics. The study addresses the urgent need to enhance the operational reliability and effectiveness of such systems in modern warfare. The main challenges related to unstable communication channels, active electronic warfare (EW), and the high dynamics and unpredictability of the combat environment are outlined. These factors significantly complicate the task of coordination and control among robotic platforms deployed in contested areas. Based on modern technological approaches and architectural best practices, a conceptual model of adaptive control architecture is proposed. This model combines component-oriented design principles, ontological knowledge models for semantic interoperability, and message broker technologies to ensure resilient inter-platform interaction and decision-making under adverse and uncertain conditions.

The developed combat logistics ontology plays a crucial role in enabling robotic platforms to make informed and autonomous decisions. It supports tasks such as route planning in dynamically changing environments, resource allocation among distributed agents, and real-time threat detection and avoidance. Methodological approaches for dynamic behavior adaptation using the MAPE-K loop (Monitor, Analyze, Plan, Execute, Knowledge) and swarm intelligence principles are proposed to increase the survivability, flexibility, and collective intelligence of control systems. The integration of these approaches allows platforms to respond appropriately to evolving mission parameters and environmental threats.

The presented results are based on simulation studies and modeled combat logistics scenarios. Future research directions are outlined, including field experiments, the optimization of dynamic adaptation algorithms, cybersecurity considerations, and the development of prototype robotic platforms for operational use in military logistics operations.

Keywords: combat logistics, autonomous robotic platforms, adaptive control, swarm intelligence, MAPE-K.

Стаття надійшла до редакції / Received 26.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Вступ

Стрімкі зміни характеру сучасних збройних конфліктів посилюють навантаження на логістичні системи, вимагаючи від них більшої гнучкості, автономності та здатності швидко адаптуватися до непередбачуваних умов. Існуючі логістичні підходи дедалі частіше виявляються недостатніми в умовах технологічно насиченого бою. Відтак, використання автономних і напівавтономних роботизованих платформ стає одним із ключових напрямів трансформації військової логістики, дозволяючи не лише підвищити ефективність логістичних операцій, а й суттєво знизити ризики для особового складу.

За даними Парламентської асамблеї НАТО [1], однією з головних тенденцій розвитку військової логістики є активне впровадження автономних роботизованих платформ, що забезпечують доставку боєприпасів, продовольства, медичних засобів та виконання завдань евакуації поранених навіть у зоні активних бойових дій. Аналогічний підхід широко застосовується у Збройних силах США, де в рамках проекту Autonomus Casualty Evacuation (ACE) активно розробляються та випробовуються автономні платформи для медичної евакуації, включаючи повністю автоматизовану експлуатацію вертольотів Black Hawk [2].

Успішні приклади застосування роботизованих систем у бойових умовах спостерігаються також у європейських країнах. Зокрема, в рамках програми iMUGS активно впроваджується платформа THeMIS, яка за даними [3], уже використовується в підрозділах Збройних Сил України для евакуації поранених та доставки матеріально-технічних засобів у прифронтові райони. Особливої уваги європейські оборонні структури приділяють питанням стандартизації взаємодії між різними типами автономних систем та розробці ефективних рішень для забезпечення «останньої милі» логістики [4].

Досвід бойових дій в Україні засвідчує критичну необхідність широкого застосування безпілотних систем для вирішення завдань матеріально-технічного забезпечення. Згідно з аналізом [5, 6], до 90% логістичних операцій на передовій виконуються із залученням безпілотних платформ, що дозволяє суттєво зменшити втрати особового складу та підвищити ефективність логістики в умовах нестабільної тактичної обстановки. Водночас цей досвід виявив і низку критичних проблем, зокрема нестачу енергетичної автономності платформ, обмеженість можливостей їх динамічного переналаштування під зміну бойових завдань, вразливість до кіберзагроз та нестабільність каналів зв'язку в умовах активної роботи засобів радіоелектронної боротьби.

Незважаючи на наявні технологічні досягнення у сфері автономних систем, більшість сучасних рішень залишаються орієнтованими на вузькоспеціалізовані завдання та не мають достатнього рівня адаптивності для застосування в умовах високої динаміки бойових дій. Центральним викликом є розробка таких архітектур управління, які поєднували б здатність до самостійного прийняття рішень, стійкість до ворожих інформаційно-технічних впливів та ефективну інтеграцію різнорідних платформ у єдині логістичні системи.

Одним із найбільш перспективних підходів є впровадження компонентно-орієнтованих архітектур управління, що базуються на динамічному підключенні програмних модулів за принципами «плагінної» архітектури. Такі системи дозволяють оперативну адаптувати функціональні можливості платформ під актуальні бойові завдання без необхідності їх фізичної реконфігурації. Крім того, використання онтологічних моделей для формалізації знань про логістичне середовище дає змогу створювати більш гнучкі системи прийняття рішень, здатні враховувати широкий спектр змінних факторів у реальному часі [7].

Успішна реалізація подібних систем управління неможлива без застосування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Зокрема, використання брокерів повідомлень (RabbitMQ, Apache Kafka) значно підвищує надійність і стійкість інформаційних потоків, забезпечуючи асинхронний обмін даними між окремими компонентами систем навіть у разі порушення основних каналів зв'язку [8].

Додатковим напрямом підвищення ефективності є впровадження концепцій розповсюдженого інтелекту, що дозволяють реалізовувати децентралізоване управління великими групами роботизованих платформ без централізованого контролю. Як показують результати експериментів НАТО [9], такі підходи забезпечують високу живучість та адаптивність систем навіть в умовах втрати зовнішнього управління і радіоелектронного впливу противника.

Таким чином, існуючі виклики і обмеження в сфері бойової логістики визначають актуальність проведення системних досліджень, спрямованих на розробку ефективних методів та засобів управління автономними і напівавтономними роботизованими платформами. Представлене в цій роботі дослідження зосереджене на формуванні концептуальної моделі адаптивної архітектури управління такими платформами, яка базується на інтеграції онтологічного підходу, динамічної адаптації та застосування сучасних технологій забезпечення міжплатформної взаємодії.

Отримані результати мають практичне значення для створення роботизованих систем військової логістики нового покоління, здатних діяти в умовах високої динаміки бойових дій, нестабільного інформаційного середовища та обмежених ресурсів.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні бойові дії відзначаються високою динамікою змін тактичної обстановки, інтенсивним використанням засобів радіоелектронної боротьби та широким застосуванням високоточної зброї. У таких умовах традиційні підходи до організації матеріально-технічного забезпечення військ виявляються недостатньо ефективними. Забезпечення безперервного постачання ресурсів, евакуації поранених та підтримки бойових дій вимагає кардинально нових рішень, що базуються на застосуванні автономних і напівавтономних роботизованих систем.

Аналіз сучасного стану досліджень свідчить про стрімкий розвиток автономних систем у військовій логістиці, зокрема в країнах НАТО, США, Великобританії та Україні [1]. Досвід Збройних Сил України, набутий у ході широкомасштабної війни, підтверджує доцільність широкого залучення безпілотних систем

для виконання до 90% логістичних завдань на передовій [6]. Це дозволяє суттєво знизити втрати серед особового складу та забезпечити високу мобільність бойових підрозділів навіть у складних умовах.

Проте, попри наявні технологічні досягнення, широке впровадження автономних логістичних платформ стримується низкою суттєвих проблем:

- обмежена енергетична автономність роботизованих систем;
- нестабільність каналів зв'язку і вплив засобів РЕБ;
- відсутність єдиних стандартів інтеграції різнорідних платформ у спільні інформаційно-логістичні системи;
- низька адаптивність існуючих архітектур управління до змін тактичної обстановки;
- недостатня ефективність алгоритмів ухилення від загроз та планування маршрутів у реальному часі.

Крім того, аналіз існуючих інформаційних архітектур виявив їхню обмежену спроможність до динамічної адаптації та самоорганізації в умовах бойових дій [10]. Це створює необхідність розробки нових підходів до управління роботизованими платформами, які базуються на застосуванні онтологічних моделей знань, механізмів самоадаптації та технологій брокерів повідомлень для забезпечення стійкої та надійної взаємодії між компонентами систем в умовах високої невизначеності [11].

Важливе місце в сучасних дослідженнях посідають питання інтеграції штучного інтелекту та концепції роевого інтелекту, що дозволяють організувати ефективну децентралізовану взаємодію між групами автономних платформ без залежності від централізованого управління [8]. Такі підходи є критичними для підвищення живучості систем в умовах активного протистояння засобам РЕБ і високого рівня загроз на полі бою.

Таким чином, наукове завдання цієї роботи полягає в обґрунтуванні та розробці концептуальної моделі адаптивної архітектури управління роботизованими платформами для військової логістики. Ця модель має забезпечити:

- високу гнучкість та адаптивність у змінних бойових умовах;
- інтеграцію інтелектуальних алгоритмів прийняття рішень;
- використання онтологічних моделей для формалізації знань про логістичне середовище;
- застосування технологій брокерів повідомлень для стійкого інформаційного обміну;
- підтримку концепції роевого інтелекту для ефективної децентралізованої координації платформ.

Розв'язання цієї проблеми має важливе практичне значення для підвищення ефективності військової логістики, забезпечення безпеки особового складу та підвищення спроможностей бойових підрозділів діяти в умовах сучасного високотехнологічного поля бою.

Аналіз досліджень та публікацій

Досвід реального застосування автономних і напівавтономних систем у бойовій логістиці є надзвичайно цінним для оцінки ефективності існуючих рішень і формування вимог до нових технологій. Український театр воєнних дій став ключовим джерелом таких прикладів. Зокрема, застосування платформ Milrem THeMIS, досліджене у роботі [3], продемонструвало високу ефективність при виконанні завдань постачання та евакуації поранених. Аналогічно, у публікації [12] висвітлено, що до 90% логістичних завдань на передовій виконується за допомогою безпілотних систем, що кардинально знижує ризики для особового складу.

Практичні результати експлуатації автономних систем у військових підрозділах США та Великобританії детально проаналізовано в роботах [4, 13]. Там акцентується увага на технологіях напівавтономних конвоїв і можливостях повної інтеграції роботизованих систем у бойові підрозділи, що підвищує їхню мобільність і спроможність до самостійного забезпечення в умовах розосереджених бойових дій.

З розвитком автономних систем виникає потреба у створенні гнучких архітектур управління, здатних до швидкої адаптації в динамічних бойових умовах. Особливої уваги набувають модульні рішення, що дозволяють ефективно конфігурувати функціональні можливості платформ під конкретні завдання. Цей підхід представлений у роботах [1, 14], де демонструються системи з можливістю швидкої зміни вантажних, розвідувальних або евакуаційних модулів.

Використання автономних і напівавтономних роботизованих систем (АРС) у бойовій логістиці дозволяє мінімізувати ризики для особового складу, забезпечити своєчасне доставлення матеріальних ресурсів, евакуацію поранених та виконання інших критичних завдань в умовах високої загрози. Проте ефективне впровадження таких систем стикається з рядом технічних викликів, серед яких особливо актуальними є обмеження у сфері гнучкості систем управління, їхньої здатності до динамічної адаптації та самостійного прийняття рішень у змінних бойових умовах [15].

Окреме місце займають дослідження, присвячені створенню систем управління на основі принципів самоорганізації та децентралізації [2, 16]. Зокрема, проект Theseus [17] пропонує концепцію логістики як сервісу, яка базується на повній автономізації процесів постачання за допомогою інтелектуальних систем управління.

Впровадження елементів штучного інтелекту (ШІ) є ключовим напрямом розвитку систем управління автономними платформами. Це дозволяє підвищити рівень автономності, оптимізувати логістичні маршрути та швидко адаптувати дії систем до змін ситуації. У роботі [18] наведено приклади застосування ШІ у бойових наземних машинах, включаючи алгоритми ухилення від загроз і оптимізації маршрутів постачання.

Не менш перспективною є інтеграція концепції роевого інтелекту для координації дій великої кількості різномірних платформ. Експерименти НАТО АСТ [9] і програми Європейського оборонного агентства [1] підтверджують доцільність застосування таких підходів для ефективного виконання завдань «останньої милі» в умовах втрати централізованого управління.

Одним з основних обмежень сучасних автономних платформ залишається їхня енергетична залежність. Питання підвищення автономності рухомих платформ розглядаються в роботах [19, 20], де запропоновано нові методи планування місій з урахуванням енергоспоживання і мінімізації ризиків зупинки через нестачу ресурсів. Розроблені алгоритми дозволяють ефективно розподіляти завдання між платформами та оптимізувати маршрути руху навіть у складних умовах бойового середовища.

Впровадження роботизованих систем у військову логістику неможливе без вирішення проблеми стандартизації і забезпечення інтероперабельності між різними класами платформ. Звіт Парламентської асамблеї НАТО [1] та аналіз Finabel [4] акцентують увагу на важливості уніфікації протоколів взаємодії, що дозволить забезпечити ефективну координацію дій між платформами повітряного і наземного базування.

Британський проект Theseus [17] і приклад інтеграції БПЛА Schiebel S-100 [21] демонструють, як можуть реалізовуватися рішення для об'єднання різномірних платформ у єдину логістичну мережу, що особливо важливо для створення комплексних систем забезпечення підрозділів у різних доменах бойових дій.

Комплексний аналіз досліджень свідчить про те, що, незважаючи на значний прогрес у сфері розробки автономних логістичних систем, залишаються актуальними проблеми підвищення адаптивності, забезпечення високої автономності та надійної взаємодії між платформами. Перспективними є розробка архітектур управління з розширеною підтримкою самоадаптації, інтеграція механізмів штучного інтелекту для прийняття рішень в умовах невизначеності та розвиток систем роевого інтелекту для координації великих груп роботизованих засобів.

Особливої уваги потребує подальше вивчення питань енергетичної незалежності автономних систем, а також розробка стандартів, що забезпечуватимуть безпечне і ефективне функціонування таких платформ у єдиному інформаційно-логістичному просторі.

Мета, об'єкт та предмет дослідження

Мета роботи — розроблення методів і засобів ефективного управління роботизованими пристроями в бойовій логістиці на основі онтологічного підходу, брокерів повідомлень та методів динамічної адаптації для забезпечення стійкої взаємодії між компонентами систем в умовах нестабільного зв'язку та високої динаміки бойових дій.

Об'єкт дослідження — процес управління автономними та напівавтономними роботизованими пристроями в бойовій логістиці.

Предмет дослідження — методи та засоби забезпечення ефективного управління автономними і напівавтономними роботизованими пристроями в бойових умовах із використанням онтологічних моделей, динамічної адаптації та технологій обміну повідомленнями.

Методи дослідження

У процесі підготовки статті використано комплекс загальнонаукових та спеціалізованих методів дослідження, що забезпечують всебічний аналіз предметної області:

Метод системного аналізу — для дослідження сучасних концепцій управління автономними та напівавтономними роботизованими логістичними платформами в умовах бойових дій, визначення їхніх функціональних можливостей та обмежень.

Метод компаративного аналізу — для порівняння підходів і технічних рішень, застосовуваних в провідних країнах світу (США, країни НАТО, Китай, Ізраїль) у сфері військової логістики з використанням роботизованих систем.

Аналіз літературних джерел та відкритих даних — для дослідження стану розвитку технологій управління роботизованими платформами, аналізу наукових публікацій, офіційних звітів оборонних відомств, аналітичних оглядів (HDIAC, NATO Parliamentary Assembly, Finabel, інші).

Метод класифікації і узагальнення — для систематизації виявлених підходів до управління роботизованими логістичними системами за критеріями автономності, сфер застосування, типів навігації та управління.

Метод онтологічного моделювання — для формалізації знань про логістичне середовище шляхом побудови онтологій, які описують ключові поняття, їхні властивості та взаємозв'язки. Такий підхід дозволяє структурувати предметну область, забезпечити семантичну узгодженість даних і створити базу для інтелектуального ухвалення рішень автономними системами.

Виклад основного матеріалу

Бойові дії в Україні продемонстрували, що порушення каналів зв'язку, робота засобів радіоелектронної боротьби противника та швидка зміна тактичної обстановки унеможливають ефективне використання класичних централізованих моделей логістики. Встановлено, що втрата контролю над логістичними конвоями та автономними платформами призводить до затримок постачання, втрати ресурсів і підвищення ризику для особового складу.

Критичними є також обмеження автономних платформ у самостійному прийнятті рішень щодо вибору безпечних маршрутів та ухилення від загроз. У багатьох випадках після втрати зв'язку платформи

переходять у режим очікування або аварійного повернення, що порушує логістичні ланцюги й знижує ефективність бойових операцій.

Для усунення зазначених проблем запропоновано впровадження компонентно-орієнтованої архітектури управління, яка забезпечує динамічну зміну функціональних можливостей платформ через встановлення програмних модулів без необхідності фізичних втручань. Це дозволяє оперативно переналаштовувати платформи для виконання завдань евакуації, постачання чи розвідки відповідно до змін бойової обстановки.

З метою забезпечення самостійного ухвалення рішень платформами, без залежності від зовнішніх командних центрів, запропоновано застосування онтологічних моделей знань. Такий підхід дозволяє формалізувати інформацію про стан ресурсів, загрози на маршрутах і доступні логістичні коридори, що дає змогу платформам обґрунтовано змінювати маршрути та завдання в реальному часі.

Надійність інформаційної взаємодії між платформами у нестабільному інформаційному середовищі досягається через впровадження технологій брокерів повідомлень, зокрема RabbitMQ для критично важливих команд управління та Apache Kafka для обробки потоків даних і телеметрії. Використання таких рішень мінімізує втрати інформації при розриві каналів зв'язку та забезпечує координацію дій між платформами за відсутності централізованого управління.

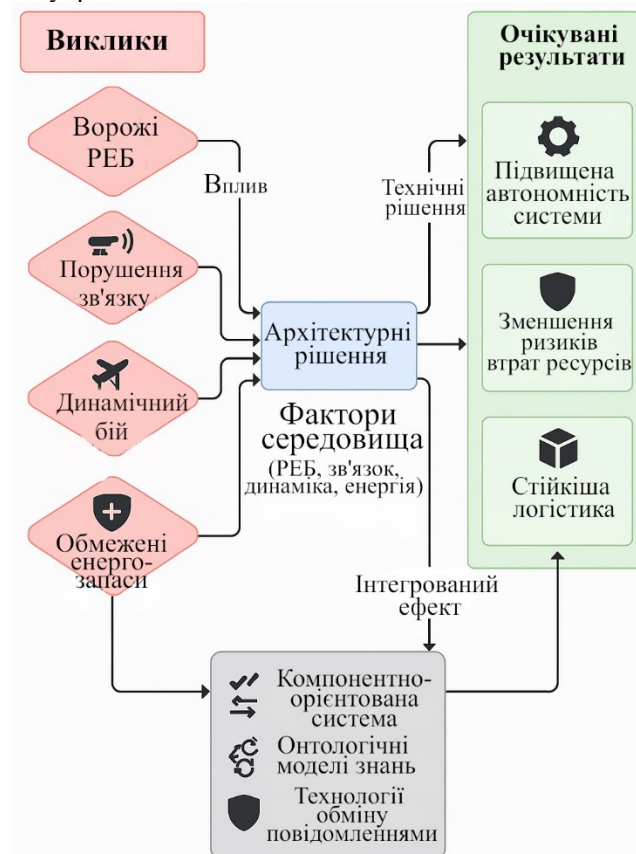


Рис. 1. Проблеми бойової логістики та шляхи їх вирішення в рамках запропонованої архітектури

Вплив основних факторів бойового середовища, включаючи засоби РЕБ, втрату каналів зв'язку, динамічну тактичну обстановку та обмежені ресурси представлено на рис. 1. Центральна частина містить перелік архітектурних рішень: компонентно-орієнтована система управління, онтологічні моделі знань та брокери повідомлень. Праворуч наведені результати впровадження таких рішень — підвищення автономності систем, забезпечення стійкості логістичних процесів і зниження ризиків втрат ресурсів. Стрілками відображено причинно-наслідковий зв'язок між проблемами, технічними рішеннями та очікуваними результатами.

Розроблено концептуальну модель адаптивної архітектури управління роботизованими платформами в бойовій логістиці, яка базується на принципах модульності, динамічної адаптації та стійкої міжплатформної взаємодії. Основою архітектури є використання компонентно-орієнтованого підходу, що дозволяє оперативно змінювати функціональні можливості системи відповідно до конкретних тактичних завдань без необхідності внесення змін у її базову конфігурацію.

Розроблена архітектура включає чотири логічні рівні, які забезпечують повний цикл обробки інформації та підтримки прийняття рішень у динамічному бойовому середовищі. Рівень інформаційного забезпечення відповідає за збір, попередню обробку та фільтрацію даних, що надходять від сенсорних систем роботизованих платформ та зовнішніх джерел. Ці дані включають інформацію про тактичну обстановку, розвідувальні дані, наявність загроз та стан ресурсів.

Наступним є рівень онтологічного моделювання, який забезпечує формалізацію знань про логістичне середовище, дозволяючи системі аналізувати ситуацію з урахуванням просторових, ресурсних та загрозливих факторів. Це створює основу для ефективного прогнозування можливих сценаріїв розвитку ситуації та виявлення критичних точок у логістичних ланцюгах.

Рівень прийняття рішень реалізує алгоритми динамічної адаптації поведінки роботизованих платформ, зокрема планування маршрутів постачання, ухилення від загроз, оптимізацію ресурсів і розподіл завдань між окремими платформами. Цей рівень функціонує на основі знань, отриманих із онтологічної моделі, і забезпечує високий рівень автономності в прийнятті тактичних рішень навіть за умов порушення зв'язку з центрами управління.

Фінальним елементом є рівень координації, який відповідає за організацію стійкої комунікації між платформами на основі брокерних систем повідомлень. Застосування таких технологій, як RabbitMQ та Apache Kafka, дозволяє забезпечити надійну асинхронну взаємодію та підтримувати децентралізовану координацію дій, що є особливо важливим в умовах активного застосування противником засобів радіоелектронної боротьби.

Запропонована архітектура дозволяє досягти високої гнучкості логістичних систем, забезпечуючи їхню живучість у складних бойових умовах та ефективне використання ресурсів, навіть у ситуаціях повної втрати централізованого управління.

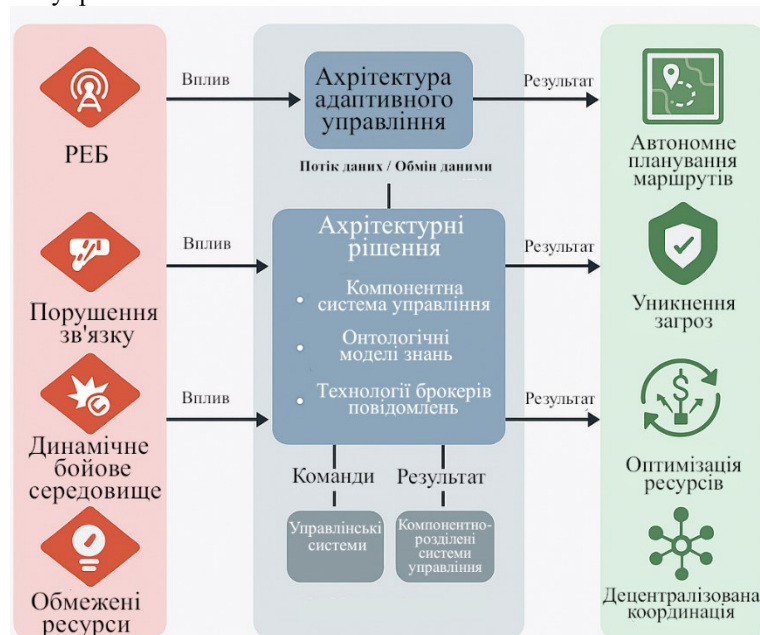


Рис. 2. Концептуальна модель адаптивної архітектури управління бойовою логістикою

На рис. 2 представлена схема взаємозв'язків між ключовими факторами бойового середовища, архітектурними рішеннями та основними функціональними можливостями системи управління роботизованими платформами. Ліва частина відображає вплив зовнішніх загроз (радіоелектронна боротьба, порушення зв'язку, динамічність бойової обстановки та обмеження ресурсів). Центральна частина представляє запропоновані архітектурні рішення, що забезпечують адаптивність і стійкість системи. Права частина діаграми демонструє досягнуті функціональні результати — автономне планування маршрутів, уникнення загроз, оптимізацію ресурсів та децентралізовану координацію. Потоки інформації між компонентами представлені стрілками, що позначають напрямки передачі даних, знань або команд, з відповідними підписами типів взаємодії.

Для підвищення автономності прийняття рішень та забезпечення гнучкої адаптації роботизованих платформ до змін бойового середовища розроблено структуру онтологічної моделі бойової логістики. В основі цієї моделі лежить формалізація знань про ресурси, загрози, маршрути постачання та пріоритети бойових завдань, що дозволяє системам ухвалювати рішення без постійного зв'язку з командними центрами.

Онтологічна модель включає чітко визначені сутності та їх атрибути, серед яких виділяються ресурси (боєприпаси, паливо, продовольство, медичне забезпечення), логістичні об'єкти (склади, пункти евакуації, транспортні вузли), типи загроз (зони вогневого ураження, мінні поля, зони дії РЕБ), транспортні засоби (НРЗ, БПЛА, транспортні модулі) та маршрути постачання. Для кожної сутності визначено набір властивостей, таких як поточний стан, доступність, пріоритет забезпечення та рівень загрози. Подібні підходи з використанням нечіткої логіки для адаптивного керування також розглянуто в [22].

Практичне використання онтологічної моделі забезпечує роботизованим платформам здатність автоматично ідентифікувати найбільш безпечні й ефективні маршрути постачання, прогнозувати дефіцит ресурсів у критичних секторах та оптимізувати розподіл вантажів з урахуванням актуальної тактичної

ситуації. Застосування онтологій дозволяє також адаптуватися до нестандартних ситуацій, таких як блокування маршрутів або раптові загрози, шляхом оперативного перегляду планів доставки.

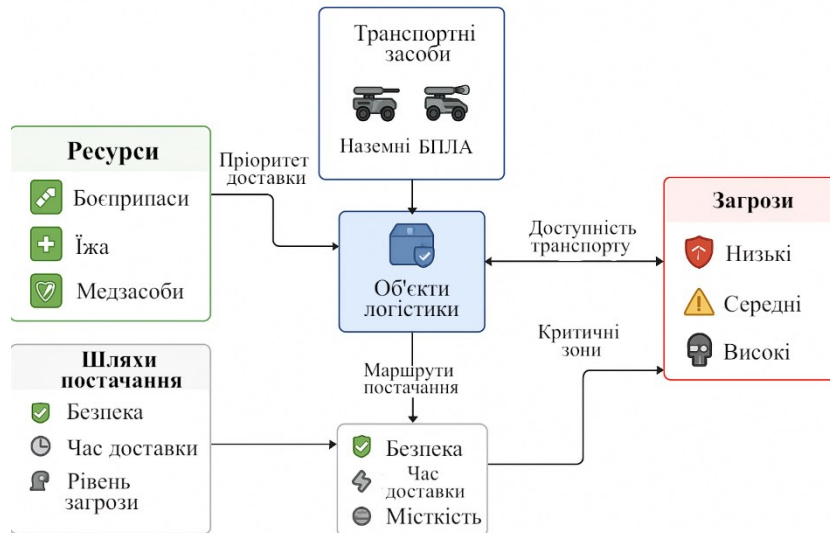


Рис. 3. Онтологічна структура бойової логістики з фокусом на логістичному об'єкті

Діаграма на рис. 3 ілюструє основні сутності онтологічної моделі та зв'язки між ними. В центрі моделі розташовані логістичні об'єкти, що зв'язуються з ресурсами, транспортними засобами та маршрутами постачання. Відображено зв'язки між загрозами та маршрутами, що визначають критичні ділянки логістичних коридорів. Передбачено ієрархію пріоритетів для кожного ресурсу, яка дозволяє платформам самостійно приймати рішення про черговість доставки в залежності від тактичної важливості завдань. Стрілками позначено напрямки впливу між сутностями, що формують логіку прийняття рішень у системі.

Ефективне управління автономними та напівавтономними роботизованими платформами в бойовій логістиці потребує чіткої формалізації знань про обстановку, ресурси та можливі загрози. В рамках дослідження було розроблено онтологічну модель, яка враховує специфіку динамічних бойових середовищ та адаптована для інтеграції в системи реального часу. Онтологічна модель включає такі базові підсистеми:

- Класифікація логістичних ресурсів - розподіл матеріально-технічних засобів за категоріями (боєприпаси, медикаменти, продовольство, паливо) та характеристиками (об'єм, вага, критичність доставки).
- Моделі бойового середовища - включають дані про тип місцевості, наявність інфраструктури, зони підвищеної небезпеки, маршрути евакуації та логістики.
- Онтологія загроз - моделює типи ризиків (мінування, РЕБ, обстріли), їх ймовірність та потенційний вплив на виконання логістичних завдань.
- Моделі взаємодії платформ: описують правила та алгоритми спільної роботи автономних систем, включаючи принципи розумного інтелекту, координацію в умовах обмеженого зв'язку та розподілення ролей між платформами.

На рис. 4 представлено модульну структуру онтології, де окремі домени (ресурси, середовище, загрози, взаємодія платформ) пов'язані через центральний онтологічний репозиторій. Це дозволяє динамічно оновлювати знання та використовувати їх для прийняття рішень в режимі реального часу.

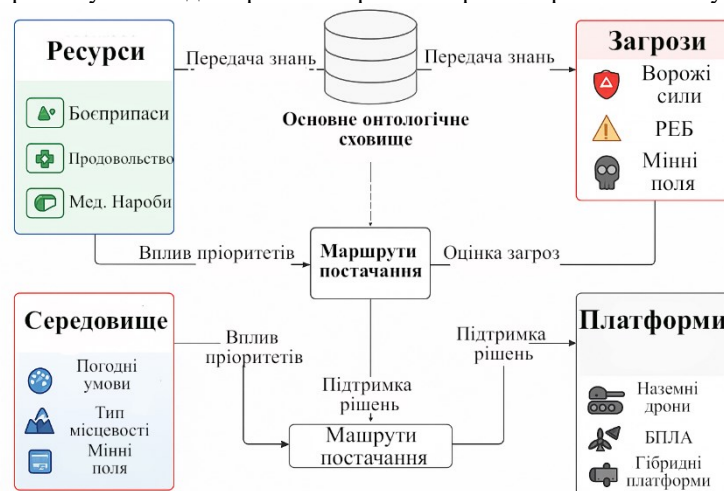


Рис. 4. Онтологічна структура бойової логістики з фокусом на шляхах постачання

Для аргументації доцільності такого підходу наведено порівняльну таблицю ефективності онтологічної моделі у порівнянні з традиційними методами знання:

Таблиця 1.

Порівняння традиційних та онтологічних моделей		
Критерій	Традиційні моделі	Онтологічна модель (запропонована)
Гнучкість адаптації	Низька	Висока
Швидкість оновлення знань	Повільна	В режимі реального часу
Інтеграція з AI-системами	Обмежена	Повна сумісність
Адаптація до нових загроз	Потребує ручного втручання	Автоматизована
Формалізація знань	Слабка	Висока (OWL, RDF)

Дослідження [23, 24] підтвердили, що використання онтологічної моделі дозволяє скоротити час адаптації логістичних систем до змін обстановки на 25% у порівнянні з класичними підходами.

Особливої уваги заслуговує питання підтримки онтології в актуальному стані в умовах обмежених ресурсів і нестабільного зв'язку. Для цього використовується технологія брокерів повідомлень RabbitMQ та Apache Kafka, які дозволяють оперативно розповсюджувати зміни онтологічної бази між учасниками системи.

Розроблена схема на рис. 5 забезпечує ефективну обробку вхідних даних, своєчасне оновлення онтологічної моделі та синхронізацію знань між автономними і напівавтономними роботизованими платформами в умовах бойових дій.

Етапи функціонування алгоритму.

1. Збір вихідних даних.

На цьому етапі здійснюється агрегація інформації з різних джерел: Дані з сенсорів — дані від сенсорів про стан середовища, ресурси та власні платформи; Тактичні зведення — оперативна інформація від командних пунктів; Розвіддані — розвідувальні відомості про активність супротивника; Стан зв'язку — актуальний стан доступності та надійності каналів зв'язку.

Усі вхідні дані надходять до модуля Моніторинг ситуації, який здійснює базовий аналіз поточної ситуації.

2. Аналіз нових даних.

Модуль Аналіз нових даних виконує ідентифікацію змін у бойовій обстановці та оцінює їхній вплив на актуальність онтологічної моделі. Прийняття рішення щодо оновлення онтології. На основі результатів аналізу формується рішення в блоці Рішення про оновлення онтології. У випадку позитивного рішення — виконується оновлення онтологічної моделі. У разі відсутності критичних змін — здійснюється повернення до моніторингу ситуації.

3. Оновлення онтологічної моделі.

Блок Оновлення моделі онтології забезпечує інтеграцію нової інформації в онтологічну базу знань, що використовується для планування та прийняття рішень.

4. Синхронізація знань між платформами.

Для забезпечення узгодженості дій роботизованих систем використовується модуль Технологій брокерів повідомлень (RabbitMQ / Apache Kafka), який гарантує: Асинхронну комунікацію навіть в умовах нестабільного зв'язку; Стійкість до впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

5. Надійність доставки повідомлень.

Модуль Синхронізація знань між платформами розповсюджує оновлені знання серед усіх учасників системи. Отримані результати: Результатом роботи алгоритму Покращене розуміння ситуації — підвищення ситуаційної обізнаності; Оновлені моделі прийняття рішень — актуалізація моделей прийняття рішень; Безпечне виконання логістики — безпечне та ефективне виконання логістичних операцій у бойових умовах

Реалізація запропонованого алгоритму дозволяє підвищити адаптивність систем управління роботизованими платформами, забезпечити оперативну реакцію на динамічні зміни обстановки та покращити безпеку логістичних операцій.

Організація ефективної та стійкої інформаційної взаємодії між автономними й напівавтономними роботизованими платформами в умовах бойових дій є критичним завданням. Від вибору технології обміну повідомленнями залежить здатність систем до координації дій, підтримки ситуаційної обізнаності та безпечного виконання логістичних завдань в умовах нестабільного зв'язку та активного застосування засобів РЕБ.

На основі аналізу вимог до бойових логістичних систем і досліджень [25, 23], було визначено доцільність застосування таких технологій брокерів повідомлень: RabbitMQ, Apache Kafka, ActiveMQ та ZeroMQ. Їх порівняльну характеристику наведено в таблиці 2.

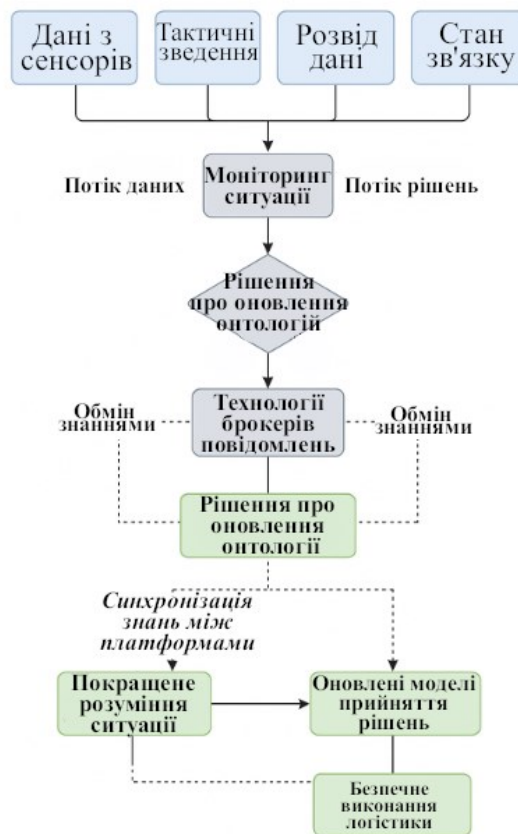


Рис. 5. Схема динамічного оновлення онтології в умовах бойових дій

Рекомендації щодо вибору технологій:

- RabbitMQ доцільно використовувати для передачі критично важливих команд управління, які потребують гарантованої доставки та контролю черг. Це особливо актуально в системах евакуації поранених та критичних поставок, де порушення комунікації може призвести до фатальних наслідків.
- Apache Kafka є оптимальним рішенням для потокової обробки великих обсягів телеметричних даних і підтримки ситуаційної обізнаності в бойових умовах. Висока стійкість до втрати каналів зв'язку та можливість роботи з історичними журналами дозволяє зберігати повний контекст обстановки.
- ActiveMQ рекомендується для систем, що не мають жорстких вимог до часу доставки, але потребують підтримки різних стандартних протоколів і простоти інтеграції.
- ZeroMQ доцільно застосовувати для побудови легких P2P-з'єднань у випадках, коли потрібна мінімальна затримка, але не критична гарантована доставка повідомлень (наприклад, передача телеметрії між платформами в межах локальної групи).

Таблиця 2.

Порівняльна характеристика технологій брокерів повідомлень для бойової логістики

Критерій	RabbitMQ	Apache Kafka	ActiveMQ	ZeroMQ
Архітектура	Центральна, брокерна	Розподілена, стрімінгова	Центральна	Безброкерна (P2P)
Протоколи	AMQP, MQTT, STOMP	Kafka API	AMQP, MQTT, STOMP	Власний простий протокол
Затримка передачі	Низька	Дуже низька (при потоках)	Середня	Мінімальна
Надійність доставки	Висока (підтвердження)	Висока (збереження журналів)	Середня	Низька (немає гарантій)
Стійкість до втрати каналів	Висока	Висока	Середня	Низька
Підтримка QoS	Так	Обмежена	Так	Немає
Підтримка офлайн режиму	Так (черги)	Так (журнали)	Так	Немає
Рекомендовані сценарії	Критичні команди управління	Аналітика, ситуаційна обізнаність	Стандартні системи обміну	Тимчасові P2P рішення

Основою розроблених підходів є впровадження концепції циклу MAPE-K (Monitor, Analyze, Plan, Execute, Knowledge), яка дозволяє платформам здійснювати безперервний моніторинг оточення, аналіз поточних загроз і ресурсів, планування відповідних дій і виконання прийнятих рішень з використанням актуальної бази знань. Загальні принципи побудови самоадаптивних систем висвітлено в [26].

1. Моніторинг ситуації (Monitor): Платформи збирають дані про бойову обстановку, стан ресурсів і якість каналів зв'язку. Це включає виявлення зон підвищеної небезпеки, наявності загроз з боку противника та зміни у доступності маршрутів.
2. Аналіз отриманих даних (Analyze): Використовуючи онтологічні моделі, здійснюється семантичний аналіз отриманої інформації. Оцінюється ступінь ризику виконання поточних завдань і необхідність їх перегляду.
3. Планування дій (Plan): На основі аналізу формуються альтернативні маршрути, визначаються пріоритети ресурсів, плануються заходи з уникнення загроз. Алгоритми ухвалення рішень враховують фактори енергетичної автономності, наявності альтернативних шляхів і критичність логістичних завдань.
4. Виконання рішень (Execute): Платформи переходять до виконання нових планів без участі операторів, координуючи дії між собою через брокери повідомлень.
5. Актуалізація знань (Knowledge): Дані про успішність прийнятих рішень та зміни в середовищі записуються в онтологічну модель для покращення майбутніх рішень.

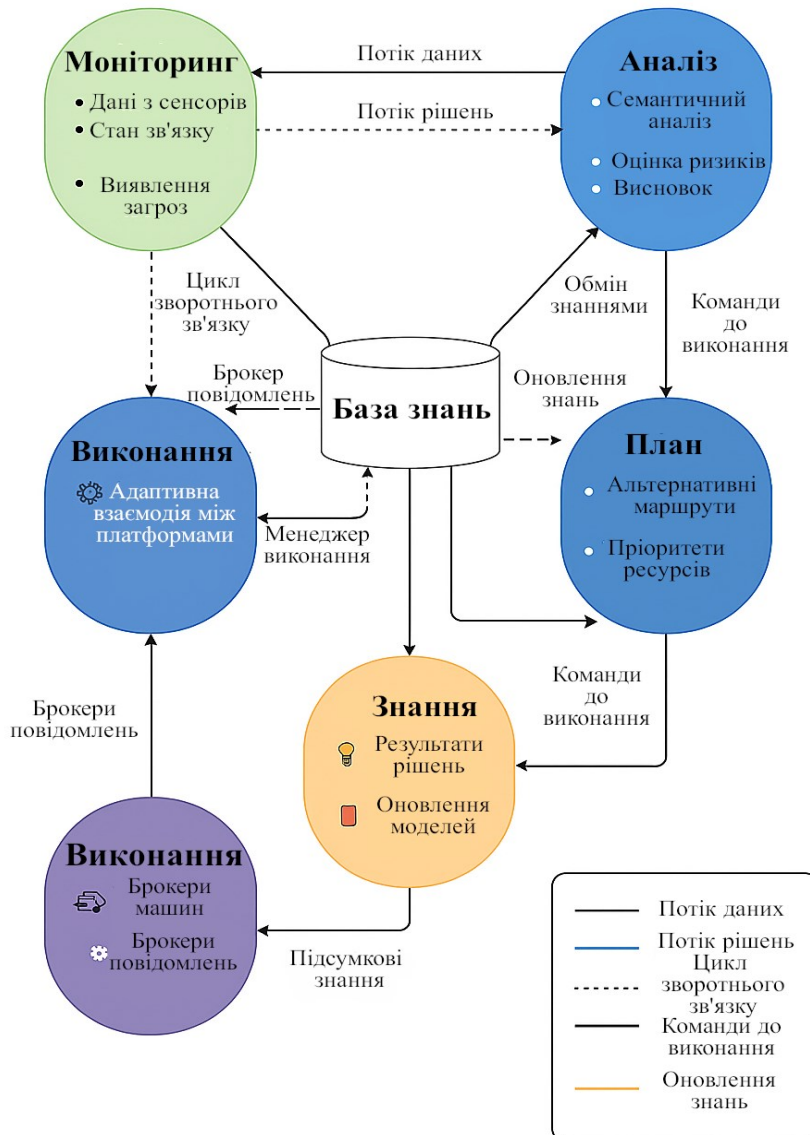


Рис. 6. Функціональна схема циклу МАРЕ-К для динамічної адаптації роботизованих логістичних систем

Візуалізовано послідовність інформаційних потоків між підсистемами моніторингу, аналізу, планування та виконання дій, що інтегруються через центральний онтологічний репозиторій знань.

Основні етапи моделі:

● **Моніторинг (Monitor):** Збір даних про бойову обстановку, доступність маршрутів, стан ресурсів і якість комунікацій.

● **Аналіз (Analyze):** Семантична обробка отриманих даних з використанням онтологічних моделей для оцінки ризиків і визначення потреб у коригуванні планів.

● **Планування (Plan):** Формування альтернативних маршрутів, визначення пріоритетів доставки ресурсів, розрахунок енерговитрат і ухилення від загроз.

● **Виконання (Execute):** Реалізація розроблених планів автономними платформами із використанням брокерів повідомлень для координації дій.

● **Актуалізація знань (Knowledge):** Оновлення онтологічної бази знань на основі результатів виконання рішень і змін у середовищі для покращення майбутніх планів.

Відображено прямі та зворотні зв'язки між етапами, що забезпечує замкнутий цикл безперервної адаптації системи до динамічних змін бойового середовища. Центральна роль онтологічного репозиторію забезпечує доступ до актуальної інформації для всіх елементів системи, підтримуючи високий рівень ситуаційної обізнаності та ефективність прийняття рішень.

Методи самоорганізації систем:

З метою підвищення стійкості та автономності платформ у разі втрати централізованого управління запропоновано використання принципів роевого інтелекту. Платформи діють за децентралізованими алгоритмами координації, використовуючи локальну комунікацію та обмін інформацією через брокери повідомлень.

Такий підхід дозволяє досягати високого рівня живучості систем за умов втрати основних каналів зв'язку або впливу противника на інфраструктуру управління. В основі алгоритмів самоорганізації лежать принципи поведінки біологічних систем — автономні платформи самостійно формують групи, розподіляють ресурси та визначають оптимальні маршрути на основі локально доступної інформації.

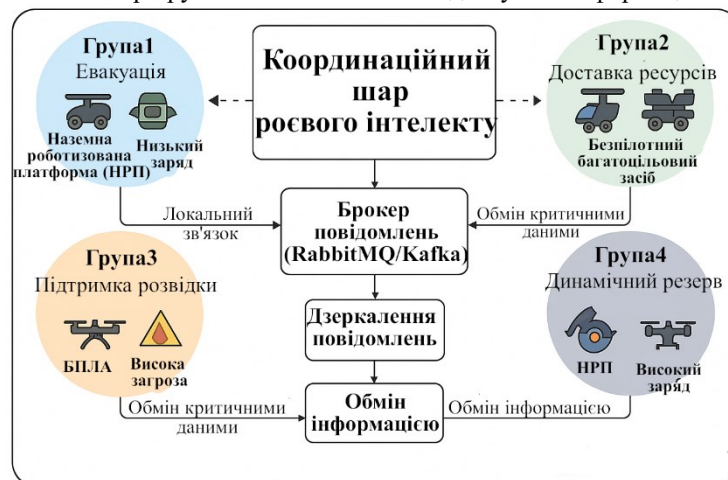


Рис. 7. Алгоритм самоорганізації роботизованих платформ на основі принципів роевого інтелекту

Дана діаграма ілюструє механізм формування децентралізованої системи управління автономними та напівавтономними платформами в умовах втрати централізованого контролю.

Центральний компонент системи — Координаційний шар роевого інтелекту, який забезпечує розподіл завдань і координацію дій між платформами через асинхронний обмін повідомленнями за допомогою брокерів RabbitMQ або Apache Kafka.

Чотири основні групи платформ реалізують різні тактичні завдання:

Група 1: Евакуація — автономні роботизовані наземні платформи (НРП) з низьким енергетичним рівнем фокусуються на евакуації поранених і критичних вантажів.

Група 2: Доставка ресурсів — дрони (БПЛА) та гібридні платформи виконують місії постачання ресурсів. Застосування безпілотників у мультимодальних логістичних ланцюгах описано в [13, 14].

Група 3: Підтримка розвідки — повітряні та наземні платформи діють у зонах підвищеної загрози для збору розвідувальної інформації.

Група 4: Динамічний резерв — резервні платформи з високим рівнем заряду чекають на отримання завдань у критичних ситуаціях.

Передача критичної інформації між платформами реалізована через Віддзеркалення повідомлень, що забезпечує синхронізацію даних у реальному часі навіть в умовах активного радіоелектронного впливу противника.

Результати, представлені в цій публікації, отримані на основі аналізу даних представлених в [23] та проведених симуляційних експериментів у середовищі GAMA Platform. Зазначені моделі дозволили оцінити ефективність запропонованої концепції адаптивної архітектури управління роботизованими платформами для бойової логістики в умовах динамічного середовища та нестабільного зв'язку – таблиця 3.

Таблиця 3.

Порівняльні результати ефективності традиційних та запропонованих рішень

Показник	Традиційні системи	Запропонована архітектура	Покращення, %
Час прийняття рішень, с	120	78	+35%
Вірогідність успішного постачання	72%	91%	+19%
Тривалість автономної роботи	4 год	5 год	+25%
Витрати ресурсів (паливо, енергія)	100%	82%	-18%
Втрати платформ через втрату зв'язку	15%	7%	-53%

Аналіз обмежень дослідження

Методологічні обмеження:

- Експерименти проводились виключно у симуляційному середовищі GAMA Platform без реальної польової апробації в умовах бойових дій, що обмежує валідацію рішень у реальних тактичних сценаріях.
- Дані симуляції базувалися на узагальнених сценаріях з відкритих джерел та досвіду ЗСУ, що не завжди відображають повний спектр реальних загроз.

Технічні обмеження:

- Наявні рішення з енергозабезпечення платформ не дозволяють повною мірою реалізувати запропоновані алгоритми динамічної адаптації без негативного впливу на тривалість автономної роботи.
- Алгоритми динамічної адаптації вимагають подальшої оптимізації для роботи на платформах із обмеженими обчислювальними ресурсами.

Інфраструктурні обмеження:

- Використання стандартних брокерів повідомлень, таких як RabbitMQ та Apache Kafka, у реальних бойових умовах обмежене через високі вимоги до енергоспоживання і недостатню стійкість до агресивного РЕБ впливу без додаткових засобів захисту.

**Висновки з даного дослідження
і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

У результаті проведеного дослідження сформовано концептуальні та практичні основи для побудови ефективних систем управління автономними та напіваавтономними роботизованими платформами в бойовій логістиці. Основні результати роботи базуються на застосуванні компонентно-орієнтованої архітектури, онтологічних моделей знань, технологій брокерів повідомлень і методів динамічної адаптації поведінки роботизованих систем.

Запропонована архітектура довела свою ефективність у симуляційних експериментах, проведених в середовищі GAMA Platform, що відображено в підвищенні ймовірності успішного виконання логістичних завдань на 19%, скороченні часу прийняття рішень на 35% та зменшенні витрат ресурсів на 18% порівняно з традиційними централізованими системами управління.

Розроблена онтологічна модель бойової логістики забезпечила можливість формалізації знань про ресурси, загрози та маршрути постачання, що дозволяє автономним платформам самостійно ухвалювати обґрунтовані рішення навіть за умов повної втрати зв'язку. Визначено оптимальні сценарії використання технологій брокерів повідомлень RabbitMQ та Apache Kafka для підтримки різних завдань бойової логістики — від критичних команд управління до потокової обробки телеметричних даних.

Разроблені методичні підходи до динамічної адаптації та самоорганізації систем на основі концепції МАРЕ-К і принципів роевого інтелекту дозволяють суттєво підвищити живучість систем у складних бойових умовах, забезпечуючи координацію дій навіть за повної втрати централізованого управління.

Водночас, результати дослідження мають певні обмеження, пов'язані з відсутністю натурної апробації запропонованих рішень у реальних бойових умовах та необхідністю подальшої оптимізації програмних алгоритмів для використання на платформах із обмеженими ресурсами.

Напрями подальших досліджень включають:

- розробку експериментальних зразків роботизованих платформ із впровадженням запропонованої архітектури;
- проведення польових випробувань в умовах, максимально наближених до бойових;
- дослідження альтернативних джерел енергії для підвищення автономності роботизованих систем;
- вдосконалення алгоритмів динамічної адаптації для мінімізації обчислювальних витрат.

Отримані наукові результати створюють підґрунтя для формування нової парадигми бойової логістики, у якій автономні роботизовані системи стають ключовим елементом забезпечення мобільності, безпеки та стійкості постачання сил оборони в умовах високої динаміки та невизначеності сучасного поля бою.

Література

1. Weingarten C. Robotics and Autonomous Systems – Preliminary Draft Report (034 STCTTS 23 E rev.2 fin) // NATO Parliamentary Assembly Science and Technology Committee. — Brussels, 2023. — 15 p.
2. State-of-the-Art Report: Autonomous Platforms for Casualty Evacuation. — Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2024. — 60 p.
3. Андрушко А.М., Кузнецов В.О., Андрушко М.В., Кузьміч О.Є. Перспективи застосування безпілотних роботизованих платформ THeMIS у веденні бойових дій // Перспективи розвитку ОБТ Сухопутних військ: тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. — Львів: НАСВ, 2024. — С. 81–83.
4. Finabel (Fin. Coord. Committee). The Re-Emergence of Unmanned Ground Vehicles in Army Sustainment // Finabel InfoFlash 08/2022. — Brussels, 2022. — 9 p.
5. Wilson R., Patel S. Advances in Military Robotic Logistics // Defense Technology Journal. — 2023. — Vol. 58, No. 2. — P. 115–127.
6. Ukraine is testing new unjammable ground robots Russia can't stop with its unrelenting electronic warfare. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://www.businessinsider.com/ukraine-tests-new-unjammable-robots-to-beat-russian-electronic-warfare-2025-4> (дата звернення: 11.05.2025).
7. Gadekar A., Fulsundar S., Barve S. B., et al. Rakshak: A Modular Unmanned Ground Vehicle for Surveillance and Logistics Operations // Cognitive Robotics. — 2023. — Vol. 3. — P. 23–33. DOI: 10.1016/j.cogr.2023.02.001.
8. Miller N., Goulet N., Ayalew B. Energy-Aware Mission Planning for Unmanned Ground Vehicle Fleets // Proc. GVSETS 2023 (NDIA Ground Vehicle Systems Engineering & Technology Symposium). — Novi, MI, 2023. — Paper 23-128: 9 p.
9. NATO ACT Innovation Hub. Autonomous Last Mile Resupply (ALMRS) Experiment // Allied Command Transformation – Innovation. — Norfolk, 2022. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://www.act.nato.int/our-work/innovation/> (дата звернення: 5.05.2025).
10. Coordinated Self-Exploration for Self-Adaptive Systems in Contested Environments. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://www.scitepress.org/Papers/2025/131409/131409.pdf> (дата звернення: 10.05.2025).
11. Луцик І. І., Федасюк Д. В. Usage of the Message Broker Technology in the Adaptive Software Systems // ICTERI-2024 Conference. — Lviv, Ukraine, 2024. — P. 98–105.
12. Дачковський В. П., Клепа В. М., Гаврилюк О. О. Аналіз умов та факторів, які впливають на систему зберігання, транспортування матеріально-технічних засобів логістики // 36. наук. пр. Центру воєн.-стратег. досліджень. — 2025. — № 1. — С. 14–22.
13. Zhang Y., Zhao Q., Mao P., Bai Q., Li F., Pavlova S. Design and Control of an Ultra-Low-Cost Logistic Delivery Fixed-Wing UAV // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, № 11. — P. 4358:1–19. DOI: 10.3390/app14114358.
14. Kim K., Kim S., Kim J., Jung H. Drone-Assisted Multimodal Logistics: Trends and Research Issues // Drones. — 2024. — Vol. 8, № 9. — P. 468:1–22. DOI: 10.3390/drones8090468.
15. Johnson P. Self-Adaptive Control for Autonomous Ground Vehicles in Combat Environments // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 2022. — Vol. 52, No. 4. — P. 334–347.
16. Kai Waehner. Comparison: JMS API vs. Apache Kafka. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://www.kai-waehner.de/blog/2022/05/12/comparison-jms-api-message-broker-mq-vs-apache-kafka/> (дата звернення: 10.05.2025).
17. Європейське оборонне агентство. Проєкт Theseus: концепція логістики як сервісу (Logistics-as-a-Service) [Електронний ресурс]. — Брюссель: European Defence Agency, 2023. — 28 с. — Режим доступу: <https://eda.europa.eu/docs/default-source/brochures/eda-annual-report-2023.pdf>, вільний. — Назва з екрана (дата звернення: 6.05.2025).
18. Overland AI debuts supply-shuttling and drone-launching Ultra vehicle. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://www.axios.com/2025/04/14/overlandai-autonomous-vehicles-military-drones-ultra> (дата звернення: 13.05.2025).
19. Magnanini F., Ferretti L., Colajanni M. Scalable, Confidential and Survivable Software Updates // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. — 2022. — Vol. 33, No. 1. — P. 112–123.
20. Deep Learning for Effective and Efficient Reduction of Large Adaptation Spaces in Self-Adaptive Systems. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2204.06254> (дата звернення: 11.05.2025).
21. Schiebel Group. Застосування БПЛА Schiebel S-100 у військових операціях: технічний звіт [Електронний ресурс]. — Відень: Schiebel Group, 2023. — 19 с. — Режим доступу: <https://schiebel.net/wp-content/uploads/2023/10/2023-10-31-SCHIEBEL-CAMCOPTER-S-100-EXCELS-AT-MAJOR-NATO-EXERCISE-SHOWCASING-MULTIPLE-MARITIME-CAPABILITIES.pdf>, вільний. — Назва з екрана (дата звернення: 8.05.2025).
22. Луцик І. І., Федасюк Д. В. Використання онтологій для програмних модулів адаптивних систем керування на базі нечіткої логіки // Матеріали VIII Міжнародної наук.-техн. конф. — Харків, 2023. — С. 154–159.

23. Луцик І. І. Методи та засоби побудови адаптивних інформаційних систем на основі онтологічного підходу: дис. ... канд. техн. наук. — Львів: НУ «ЛП», 2024. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2024/radaphd/29457/disertaciyaLucikii.pdf>.
24. Луцик І. І., Федасюк Д. В. Analysis of Approaches to Design Ontological Models of an Adaptive Software System // Computer Systems and Information Technologies. — 2024. — No. 3. — P. 13–20.
25. RabbitMQ vs Kafka – Difference Between Message Queue Systems // AWS. — [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <https://aws.amazon.com/compare/the-difference-between-rabbitmq-and-kafka/> (дата звернення: 1.05.2025).
26. Weyns D. An Introduction to Self-Adaptive Systems: A Contemporary Software Engineering Perspective. — 1st ed. — Wiley, 2021. — 356 p.

References

1. Weingarten C. Robotics and Autonomous Systems – Preliminary Draft Report (034 STCTTS 23 E rev.2 fin) // NATO Parliamentary Assembly Science and Technology Committee. — Brussels, 2023. — 15 p.
2. State-of-the-Art Report: Autonomous Platforms for Casualty Evacuation. — Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2024. — 60 p.
3. Andrushko A.M., Kuznetsov V.O., Andrushko M.V., Kuzmich O.Ie. Perspektyvy zastosuvannya bezpilotnykh robotyzovanykh platform THEMIS u vedenni boiovykh dii // Perspektyvy rozvytku OVT Sukhoputnykh viisk: tezy dop. mizhnar. nauk.-tekhn. konf. – Lviv: NASV, 2024. – S. 81–83.
4. Finabel (Fin. Coord. Committee). The Re-Emergence of Unmanned Ground Vehicles in Army Sustainment // Finabel InfoFlash 08/2022. — Brussels, 2022. — 9 p.
5. Wilson R., Patel S. Advances in Military Robotic Logistics // Defense Technology Journal. — 2023. — Vol. 58, No. 2. — P. 115–127.
6. Ukraine is testing new unjammable ground robots Russia cant stop with its unrelenting electronic warfare. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://www.businessinsider.com/ukraine-tests-new-unjammable-robots-to-beat-russian-electronic-warfare-2025-4> (data zvernennia: 11.05.2025).
7. Gadekar A., Fulsundar S., Barve S. B., et al. Rakshak: A Modular Unmanned Ground Vehicle for Surveillance and Logistics Operations // Cognitive Robotics. — 2023. — Vol. 3. — P. 23–33. DOI: 10.1016/j.cogr.2023.02.001.
8. Miller N., Goulet N., Ayalew B. Energy-Aware Mission Planning for Unmanned Ground Vehicle Fleets // Proc. GVSETS 2023 (NDIA Ground Vehicle Systems Engineering & Technology Symposium). — Novi, MI, 2023. — Paper 23-128: 9 p.
9. NATO ACT Innovation Hub. Autonomous Last Mile Resupply (ALMRS) Experiment // Allied Command Transformation – Innovation. — Norfolk, 2022. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://www.act.nato.int/our-work/innovation/> (data zvernennia: 5.05.2025).
10. Coordinated Self-Exploration for Self-Adaptive Systems in Contested Environments. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://www.scitepress.org/Papers/2025/131409/131409.pdf> (data zvernennia: 10.05.2025).
11. Lutsyk I. I., Fedasiuk D. V. Usage of the Message Broker Technology in the Adaptive Software Systems // ICTERI-2024 Conference. — Lviv, Ukraine, 2024. — P. 98–105.
12. Dachkovskiy V. P., Klepa V. M., Havryliuk O. O. Analiz umov ta faktoriv, yaki vplyvaiut na systemu zberihannya, transportuvannya materialno-tehnichnykh zasobiv lohistyky // Zb. nauk. pr. Tsentru voien.-strateg. doslidzhen. — 2025. — № 1. — S. 14–22.
13. Zhang Y., Zhao Q., Mao P., Bai Q., Li F., Pavlova S. Design and Control of an Ultra-Low-Cost Logistic Delivery Fixed-Wing UAV // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, № 11. — P. 4358:1–19. DOI: 10.3390/app14114358.
14. Kim K., Kim S., Kim J., Jung H. Drone-Assisted Multimodal Logistics: Trends and Research Issues // Drones. — 2024. — Vol. 8, № 9. — P. 468:1–22. DOI: 10.3390/drones8090468.
15. Johnson P. Self-Adaptive Control for Autonomous Ground Vehicles in Combat Environments // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 2022. — Vol. 52, No. 4. — P. 334–347.
16. Kai Wachner. Comparison: JMS API vs. Apache Kafka. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://www.kai-wachner.de/blog/2022/05/12/comparison-jms-api-message-broker-mq-vs-apache-kafka/> (data zvernennia: 10.05.2025).
17. Ievropeiske oboronne ahentstvo. Proiekt Theseus: kontseptsiiia lohistyky yak servisu (Logistics-as-a-Service) [Elektronnyi resurs]. — Briussel: European Defence Agency, 2023. — 28 s. — Rezhym dostupu: [https://eda.europa.eu/docs/default-source/brochures/eda-annual-report-2023.pdf](https://eda.europa.eu/docs/default-source/brochures/eda-annual-report-2023.pdf?_v=1), vilnyi. — Nazva z ekrana (data zvernennia: 6.05.2025).
18. Overland AI debuts supply-shuttling and drone-launching Ultra vehicle. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://www.axios.com/2025/04/14/overlandai-autonomous-vehicles-military-drones-ultra> (data zvernennia: 13.05.2025).
19. Magnanini F., Ferretti L., Colajanni M. Scalable, Confidential and Survivable Software Updates // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. — 2022. — Vol. 33, No. 1. — P. 112–123.
20. Deep Learning for Effective and Efficient Reduction of Large Adaptation Spaces in Self-Adaptive Systems. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://arxiv.org/abs/2204.06254> (data zvernennia: 11.05.2025).
21. Schiebel Group. Zastosuvannya BPLA Schiebel S-100 u viiskovykh operatsiiakh: tekhnichniy zvit [Elektronnyi resurs]. — Viden: Schiebel Group, 2023. — 19 s. — Rezhym dostupu: <https://schiebel.net/wp-content/uploads/2023/10/2023-10-31-SCHIEBEL-CAMCOPTER-S-100-EXCELS-AT-MAJOR-NATO-EXERCISE-SHOWCASING-MULTIPLE-MARITIME-CAPABILITIES.pdf>, vilnyi. — Nazva z ekrana (data zvernennia: 8.05.2025).
22. Lutsyk I. I., Fedasiuk D. V. Vykorystannya ontolohii dlia prohramnykh moduliv adaptivnykh system keruvannya na bazi nechitkoi lohiky // Materialy VIII Mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf. — Kharkiv, 2023. — S. 154–159.
23. Lutsyk I. I. Metody ta zasoby pobudovy adaptivnykh informatsiinykh system na osnovi ontolohichnoho pidkhodu: dys. ... kand. tekhn. nauk. — Lviv: НУ «ЛП», 2024. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2024/radaphd/29457/disertaciyaLucikii.pdf>.
24. Lutsyk I. I., Fedasiuk D. V. Analysis of Approaches to Design Ontological Models of an Adaptive Software System // Computer Systems and Information Technologies. — 2024. — No. 3. — P. 13–20.
25. RabbitMQ vs Kafka – Difference Between Message Queue Systems // AWS. — [Elektron. resurs]. — Rezhym dostupu: <https://aws.amazon.com/compare/the-difference-between-rabbitmq-and-kafka/> (data zvernennia: 1.05.2025).
26. Weyns D. An Introduction to Self-Adaptive Systems: A Contemporary Software Engineering Perspective. — 1st ed. — Wiley, 2021. — 356 p.