

УДК 614.844

doi:10.20998/2413-4295.2024.04.05

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ ДЛЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ: ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВ

М. К. СИЛІН\*, Д. О. ПШЕНИЧНИКОВ

Автоматизовані електромеханічні системи, НТУ "ХПІ", м. Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: volt.education@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Проведено аналіз загальної інформації про мобільні роботичні платформи, їх типи та особливості. Висловлена думка про те, що у сфері переміщення та сортування роботичні платформи сприяють більш ефективному управлінню складськими процесами та доставці товарів. Сортування предметів або посилок на мобільних роботичних платформах здійснюється в зонах консолідації замовлень або відправлень на складах і перевантажувальних центрах, часто з використанням автоматизованих конвеєрних систем. Сортування таких елементів, як окремі товари, посилки чи контейнери за визначеними критеріями, є важливою логістичною функцією і відіграє ключову роль у багатьох складах і центрах розподілу. Цей процес стає необхідним, особливо коли в зоні підбору використовуються методи упаковки та зонування для підвищення ефективності роботи. Висловлена думка, що технологічні досягнення в області автоматизованих мобільних роботів (AMR) значно підвищили оперативну гнучкість, продуктивність, якість і, в деяких випадках, економічну ефективність. Використання штучного інтелекту для автономного прийняття рішень сприяє децентралізації процесів, пов'язаних з AMR. Ці системи часто впроваджуються швидко, особливо там, де є досвід з попередніми проектами. Проте оцінка користі від використання AMR та вибір оптимальних стратегій для досягнення максимальних результатів залишаються складними завданнями. Дане дослідження літератури ретельно аналізує ключові технологічні розробки і визначає області прийняття рішень для планування та контролю в області AMR. Констатовано, що нові технології в робототехніці, засновані на мобільних платформах, дозволяють роботам виходити з ізольованих умов у більш хаотичні й динамічні середовища, де вони співпрацюють із людьми і виконують завдання, що виходять за межі їхньої програмованої поведінки.

**Ключові слова:** мобільний робот; роботизована платформа; двигун; системи керування; сортування; автономні мобільні роботи (AMR)

## OPTIMIZATION AND MANAGEMENT OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS FOR LOGISTICS PROCESSES: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND PERSPECTIVES

M. SYLIN, D. PSHENICHNIKOV

Automated electromechanical systems, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** An analysis of general information about mobile robotic platforms, their types, and features has been conducted. It has been suggested that in the field of transportation and sorting, robotic platforms contribute to more efficient management of warehouse processes and the delivery of goods. Sorting items or parcels on mobile robotic platforms takes place in order consolidation or dispatch areas in warehouses and transshipment centers, often using automated conveyor sorting systems. Sorting elements such as individual products, parcels, or containers based on specific criteria is an important logistical function and plays a key role in many warehouses and distribution centers. This process becomes essential, especially when packaging and zoning methods are used in the picking area to increase work efficiency. It has been noted that technological advancements in automated mobile robots (AMR) have significantly improved operational flexibility, productivity, quality, and, in some cases, economic efficiency. The use of artificial intelligence for autonomous decision-making contributes to the decentralization of processes associated with AMR. These systems are often rapidly implemented, particularly in environments where there is prior experience with similar projects. However, evaluating the benefits of AMR use and selecting optimal strategies to achieve maximum results remain challenging tasks. This literature review thoroughly analyzes key technological developments and identifies decision-making areas for planning and controlling AMR. It is stated that new technologies in robotics, based on mobile platforms, allow robots to move from isolated conditions into more chaotic and dynamic environments, where they collaborate with humans and perform tasks that go beyond their programmed behavior.

**Keywords:** mobile robot; robotic platform; motor; control systems; sorting; autonomous mobile robots (AMR).

### Вступ

В останні десятиліття технології обробки матеріалів зазнали значного розвитку. Одним із важливих досягнень стало перетворення автоматизованих керованих транспортних засобів

(AGV, англ. Automated Guided Vehicles) на автономні мобільні роботи (AMR, англ. Autonomous Mobile Robots) [1]. AGV – це високотехнологічні мобільні платформи, що призначені для автономного переміщення вантажів у виробничих та складських умовах. AGV забезпечують ефективне

транспортування матеріалів по заздалегідь визначених маршрутах, використовуючи складні навігаційні системи, які включають лазерне, магнітне, оптичне або інерціальне наведення. Основними елементами структури AMR є навігаційні сенсори, системи керування, приводи та комунікаційні модулі. Навігаційні сенсори, зокрема LiDAR (англ. Light Detection and Ranging), ультразвукові датчики та камери, забезпечують картографування і визначення місця розташування в режимі реального часу, що дозволяє роботам орієнтуватися у складних умовах [2,3]. Система керування на основі штучного інтелекту обробляє інформацію, отриману від сенсорів, і приймає рішення, необхідні для виконання завдань. Приводи та мобільні системи, які зазвичай включають колісні або гусеничні механізми, надають AMR можливість пересуватися по різних поверхнях з високою точністю. Для взаємодії з іншими пристроями та центральною системою використовуються комунікаційні модулі, що забезпечують швидкий обмін даними [4].

Структура AMR дозволяє цим роботам працювати автономно та в децентралізованих системах управління, забезпечуючи адаптивність та гнучкість у промислових і логістичних середовищах.

AGV можна класифікувати за кількома основними категоріями. За типом конструкції виділяють нижньопідйомні, буксирні, AGV для одиничних вантажів, вилкові та рельсові моделі, які розроблені для виконання різноманітних транспортних завдань, таких як переміщення піддонів, вантажних контейнерів або робота на спеціальних коліях [5]. За типом навігаційної технології AGV поділяють на системи з лазерним, магнітним, візуальним, інерційним, геонаведенням та супутниковою навігацією, що дозволяє досягти високої точності позиціонування [5].

Залежно від призначення, AGV класифікують як транспортні, складські, призначені для виробничих ліній та сортувальні [6]. Окрім того, AGV розподіляють за типом системи керування: централізоване, децентралізоване та гібридне керування [5,6]. За джерелом живлення розрізняють акумуляторні, дотові системи та безпілотні AGV з бездротовою підзарядкою, що підвищує їхню автономність [7]. Нарешті, AGV також поділяють за способом інтеграції у виробничу інфраструктуру на автономні та колаборативні, де останні взаємодіють з персоналом, автоматизуючи окремі процеси виробництва [7].

### Мета роботи

Метою роботи є аналіз існуючих систем перевезень та сортування на базі мобільних роботичних платформ, а також визначення напрямів їх вдосконалення та оптимізації засобами

електроприводу. Робота спрямована на розробку підходів до підвищення ефективності керування та продуктивності роботичних систем у складських умовах.

### Виклад основного матеріалу

Традиційні сфери використання AGV включають виробничі системи, склади та контейнерні термінали. Більшість сучасних виробництв переживають етап повної автоматизації на основі мобільних роботичних платформ, зосереджуючи увагу на стаціонарному обладнанні, такому як промислові роботи та конвеєри, що робить ці системи менш гнучкими і важкими для швидкого масштабування. Для уникнення цих проблем наступне покоління автоматизованих рішень буде спиратися на більш гнучкі автономні мобільні роботи [8].

Традиційні системи сортування на основі мобільних платформ, такі як похилі лотки, ковзаючі черевики або поперечні конвеєри, зазвичай використовують стаціонарні конвеєри для транспортування продукції вздовж кількох сортувальних шляхів, на які перенаправляються проходячі продукти. Ці системи є негнучкими, займають багато місця на виробничих площах і важко піддаються масштабуванню після встановлення.

Сортування предметів або посилок на мобільних роботичних платформах відбувається в зонах консолідації замовлень або відправлення на складах і перевантажувальних центрах, зазвичай з використанням автоматизованих конвеєрних сортувальних систем. Сортування елементів на мобільних платформах, таких як окремі продукти, посилки чи контейнери за певними критеріями, є важливою функцією логістики і відіграє ключову роль у багатьох складах і розподільчих центрах. Сортування є необхідним, якщо в зоні підбору застосовуються методи упаковки та зонування для підвищення продуктивності.

Автономність AMR на базі мобільних роботичних платформ вимагає безперервного прийняття рішень про їхню поведінку в робочому середовищі відповідно до чинних правил і обмежень. Суттєвою проблемою є відсутність людини-керівника, яка могла б оцінити можливості системи. Тому AMR повинні автономно контролювати свій стан, виявляти потенційні збої та реагувати на них. Предмети для сортування подаються до сортувальної машини через ручні або автоматизовані станції подачі, ідентифікуються і сортуються на різні вихідні доріжки (або жолоби), звідки їх збирають для пакування чи відправлення.

В залежності від предметів або посилок, які потрібно обробити, а також від необхідної продуктивності, доступні різні технології сортування, такі як сортувальники з поперечними ремнями,

бомбовими відсіками, нахильними лотками та ковзаючими черевиками. У цій роботі ми зосередимося на дослідженнях автоматизованих сортувальних систем на базі мобільних роботичних платформ, які аналізують тактичні питання оцінки продуктивності та операційних політик.

Аналіз показує, що стратегія наступної доступності може бути більш оптимальною у порівнянні зі стратегією фіксованого пріоритету в умовах, де є незначне блокування вихідних доріжок [9]. У роботах з сортування на мобільних роботичних платформах оцінка пропускної здатності на основі процесу Бернуллі виділяється як можливе рішення для усунення вузьких місць у процесі подачі [10].

Сьогодні багато дослідників та установ створили експериментальні платформи для мобільних роботичних платформ. Розроблені аналітичні концептуальні моделі для системи автоматизованого вертикального зберігання і сортування (AVS/RS, англ. Automated Vertical Storage and Retrieval Systems) з урахуванням переміщення між ярусами, одно- та двокомандних циклів, сприяють кращому розумінню продуктивності таких систем [11]. Розроблені моделі часу циклу, які враховують випадкове зберігання та опортуністичне поєднання транзакцій зберігання і вилучення, дозволяють підвищити ефективність роботи систем зберігання [12]. Оцінка продуктивності систем AVS/RS з фіксацією на ярусі досягається через застосування моделі відкритої мережі черг, що забезпечує більш детальний аналіз їх роботи [13]. Для оцінки продуктивності AVS/RS, що працюють з товарними ящиками, було розроблено мережеву модель, яка враховує процеси прискорення та гальмування транспортних засобів і ліфтів [14]. Всі ці дослідження припускають послідовний рух транспортних засобів і ліфтів. Для оцінки продуктивності мобільних роботичних платформ була розроблена мережа черг із розгалуженням і злиттям потоків, що враховує можливість паралельного руху [15]. Паралельний рух забезпечує більшу пропускну здатність системи, коли швидкість прибуття транзакцій вилучення є низькою.

Таким чином, AMR можуть виконувати безліч функцій, які виходять за рамки простого транспортування і вантажно-розвантажувальних робіт, включаючи патрулювання та співпрацю з операторами. Завдяки здатності приймати автономні рішення, ці мобільні платформи можуть запропонувати гнучкі рішення. Автономність AMR передбачає безперервне прийняття рішень про поведінку в робочому середовищі, відповідно до встановлених правил і обмежень. На відміну від систем AGV, де центральний блок приймає рішення щодо маршрутизації та диспетчеризації для всіх AGV, AMR здатні самостійно взаємодіяти та

узгоджувати дані з іншими ресурсами, такими як машини і системи, наприклад, програмне забезпечення для планування ресурсів або контролю вантажно-розвантажувальних робіт, що зменшує потребу в централізованому управлінні.

## Обговорення результатів

При складанні автомобілів AMR можуть допомагати працівникам у спільному монтажі важких кузовних деталей на різних етапах виробничої лінії, що підвищує продуктивність і якість, знижуючи при цьому рівень втоми робітників. Ефективність систем AMR особливо помітна в умовах вузьких проходів і інтенсивного транспортного руху, наприклад, на складах і в лікарнях.

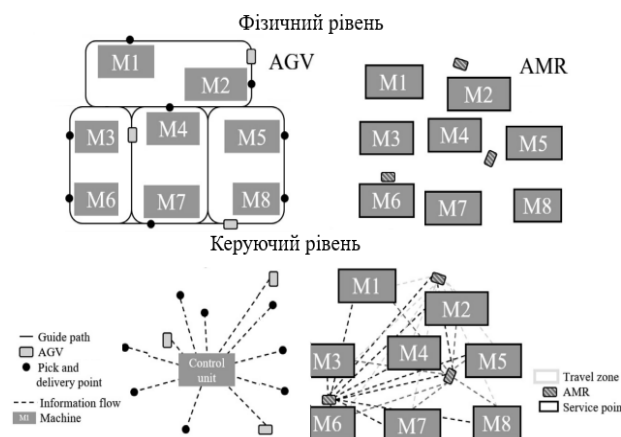


Рис. 1 – Схематичне зображення централізованого управління AGV та децентралізованого управління AMR

Зростаюча здатність AMR виконувати різноманітні завдання, а також їхня здатність орієнтуватися, управляти й взаємодіяти з людьми та машинами по-іншому, ніж AGV, вимагає нової структури прийняття рішень. Велика автономія, гнучкість і універсальність AMR призводять до необхідності ухвалення безлічі рішень на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях, і ця кількість постійно зростає.

На рис. 1 показано схематичне зображення централізованого управління для AGV та децентралізованого управління для AMR. Фізичний рівень відображає розташування AGV і AMR, включаючи траєкторії руху та точки завантаження і вилучення, тоді як керуючий рівень демонструє потоки інформації та основні взаємодії між контрольним блоком і машинами.

Сенсори AMR, що базуються на мобільних роботичних платформах, зазвичай оснащені різноманітними невеликими, недорогими та енергоефективними сенсорними технологіями, які забезпечують дані для автономної навігації.

Вбудовані лазерні сканери, такі як LiDAR 3D-камери, акселерометри, гіроскопи та датчики положення коліс, надають інформацію про розташування коліс, що дозволяє розрахувати пройдену дистанцію, а також збирають і передають великі обсяги даних про найближче, розширене та очікуване середовище AMR, а також про його внутрішній стан.

Лазерні сканери LiDAR забезпечують високу точність визначення відстані до об'єктів у навколишньому середовищі, в той час як 3D-камери надають ширококутний огляд, що дозволяє візуально ідентифікувати перешкоди. Ці технології стали популярними завдяки своїй простоті використання та швидкій візуалізації результатів. На відміну від AGV, AMR не є «сліпими», а повністю розпізнають навколишнє середовище, що впливає на ухвалення рішень щодо вибору траєкторії руху, прогнозування і уникнення зіткнень, а також управління відмовами.

Технологія бездротової передачі енергії (WPT англ. Wless Power Transfer) на базі мобільних роботичних платформ значно впливає на управління акумуляторами таких автономних роботів (AMR). Дослідження свідчать, що бездротова передача енергії може використовуватися у багатьох ситуаціях, усуваючи необхідність у дротових з'єднаннях. Обмежена ємність акумулятора та тривалий час зарядки були слабкими місцями автоматизованих керованих транспортних засобів (AGV), що знижувало їхню продуктивність, використання та обчислювальні можливості. Традиційні свинцево-кислотні акумулятори великої ємності вимагали збільшення розміру транспортних засобів. Натомість нові літій-іонні акумулятори забезпечують триваліший час роботи і більше енергії для обчислень, необхідних для автономної навігації і виконання завдань. Вони також дозволяють AMR бути меншими, що дозволяє їх використовувати в обмежених просторах, наприклад, у вузьких проходах.

Поєднуючи AMR з різними маніпуляторами в єдину систему, можна виконувати нові операції з обробки матеріалів. Роботизовані маніпулятори дозволяють AMR не тільки піднімати вантажі, але й вибирати окремі предмети. AMR можуть співпрацювати з людьми та іншими AMR для спільного виконання транспортних завдань. Розширений спектр операцій, які можуть виконувати AMR, потребує планування як на короткострокову, так і на довгострокову перспективу, включаючи прийняття рішень щодо надання цих послуг і інтеграції їхніх графіків з виробничими розкладами.

Здатність AMR орієнтуватися і працювати в динамічному середовищі залежить від їхньої можливості приймати рішення в реальному часі. Раніше можливості інтелектуального прийняття рішень у мобільних роботах були обмежені через

велику обчислювальну потужність, необхідну для цього. Завдяки появі енергоефективних AI-процесорів прийняття рішень у реальному часі для AMR стало можливим. Сьогодні потужні архітектури процесорів, орієнтовані на штучний інтелект, такі як Intel Nervana, NVIDIA Xavier і Kneron AI SoC, широко використовуються для розпізнавання облич, тіл, жестів, об'єктів і сцен. Цей розвиток особливо впливає на операційний рівень прийняття рішень у AMR, дозволяючи реалізувати нові методи динамічного маршрутування, планування, навігації та реагування на перешкоди.

Планування руху дозволяє AMR на мобільних роботичних платформах обчислювати безпечні траєкторії та адаптуватися до динамічних умов, таких як уникання заторів чи обхід перешкод. Планувальник руху надає команди швидкості й напрямку для виконавчих механізмів AMR і може динамічно оновлювати маршрути у разі появи нових перешкод.

Наприклад, у системах виконання замовлень (RMF) може діяти кілька сотень мобільних роботів, що формують велику інтегровану систему. Найбільші склади Amazon управляють тисячами таких роботів. Ці системи часто складаються з модулів, які включають комірки в структурі сітки, станції для вибору і поповнення запасів, а також транспортні засоби. Легко масштабується шляхом додавання нових транспортних одиниць або модулів.

Транспортні засоби AMR більше не прив'язані до фіксованих маршрутів, вони можуть самостійно планувати свої шляхи та вільно пересуватися у визначених зонах. Тому проектування напрямків вже не є необхідним, але потрібно приймати нові рішення, такі як визначення зон автономної роботи AMR. Ці зони можуть щоденно або щотижня змінюватися, або динамічно адаптуватися самими AMR. Швидке встановлення та зміна зон забезпечують оперативну гнучкість, що підтримує високу реактивність AMR. В межах цих зон можна легко призначати чи налаштовувати робочі позиції для виконання завдань, таких як вибір предметів або співпраця з людьми.

Зони можуть також забезпечувати інформацію про напрямки руху, трафік та інші важливі дані, щоб зменшити затори та ризики нещасних випадків. Розташування обслуговуючих зон і точок сильно впливає на час подорожі та виконання завдань. Підвищена гнучкість вимагає нових принципів для складання графіків і диспетчеризації, а також оптимального розподілу незайнятих AMR для максимальної реактивності.

Механізми руху робота і його обладнання дозволяють AMR виконувати операції, недоступні для AGV. AMR можуть координувати роботу з кількома роботами для зменшення трафіку (наприклад, у системах RMF), підніматися на полиці (у деяких системах зберігання) або усувати блокуючі вантажі в системах зберігання на основі

головоломок. Ця гнучкість у навігації має бути врахована в плануванні маршрутів.

Як і всі внутрішньологістичні транспортні засоби, AMR повинні відповідати багатьом стандартам, зокрема стандартам безпеки, перед виходом на ринок. Вони також мають бути міцними та надійними. Наразі AGV не можуть працювати без нагляду людини, оскільки їхня чутливість до динамічного середовища вимагає зосередження людей на управлінні помилками. Штучний інтелект може допомагати AMR відновлюватися після збоїв та знаходити стратегії для їх подолання, роблячи їх більш надійними.

В дослідженнях було представлено та обговорено AMR з різними рівнями децентралізації. Розроблено хмарний механізм прийняття рішень, який поєднує централізоване планування з децентралізованою навігацією, що дозволяє розподіляти ресурси між AMR [16]. Менший розмір системи полегшує централізоване управління, і рішення можуть ухвалюватися хмарною системою. Дослідження показує, що використання простих AMR та передача прийняття рішень до хмари можуть знизити загальні витрати, а застосування моделювання на основі статусу та місцезнаходження AMR може покращити їх енергетичну продуктивність.

Моделювання та обчислювальні експерименти використовувалися для аналізу доцільності ієрархічного управління AMR. Аналіз продуктивності на складальних лініях у автомобільній промисловості досягається за допомогою імітації дискретних подій [7]. За цим підходом, централізовані хмарні системи можуть визначати потреби в матеріалах, запускати постачання, планувати їх і передавати плани AMR, що зменшує частоту дефіциту деталей і обмежує відстань подорожі, підвищуючи продуктивність складальних ліній.

У системах сортування з розподілом потоку (PBS, англ. Parcel-Based Sorting) мобільні роботи можуть автономно переміщати вантажі зі входу до зони зберігання або навпаки. Ці системи не мають визначених шляхів: роботи повинні співпрацювати для переміщення вантажів, створюючи шляхи. Вони узгоджують та розподіляють транспортні завдання для швидкого та безпроблемного переміщення предметів.

Деякі дослідження розглядають децентралізацію управлінських зон поза рамками планування маршрутів. AMR можуть бути економічно вигідною альтернативою іншим системам обробки матеріалів, дозволяючи швидко впроваджувати рішення. Описано децентралізований розподіл завдань, де AMR можуть узгоджувати або торгуватися за призначення завдань. Управління зв'язком між робочими станціями під час простою покладається на AMR.

У дослідженнях пропонуються нові методології для порівняльного аналізу та вибору між централізованими та децентралізованими системами управління [8]. Модифікований метод аналізу сірого відношення, поєднаний з аналітичним ієрархічним підходом, застосовується для багатокритеріального вибору [16]. Розроблена нова структура, яка інтегрує аналіз режимів і наслідків відмов з аналітичними ієрархічними процесами для підтримки рішень у дизайні, експлуатації та управлінні AMR на мобільних роботичних платформах [10].

При аналізі централізованих і децентралізованих управлінських структур основними цілями є максимізація використання ресурсів та пропускну здатності, а також зменшення витрат.

Національна лабораторія інтелектуальних технологій і систем в університеті Цінхуа розробила ефективну і надійну систему під назвою THMR-V (Tsinghua Mobile Robot V), яка забезпечує автоматичне управління шляхом аналізу ліній руху на зображеннях у відтінках сірого. Створено мобільну платформу Segway, основу на самобалансуючому транспортному засобі Segway Human Transporter (HT), здатну розвивати швидкість близько 13 км/год у приміщенні [1]. На основі turtlebot розроблено навчальну платформу для робототехніки з можливістю автономної навігації за допомогою лазерного сканера на 360° [1]. Oltean створив платформу для мобільних роботів, яка отримала високу оцінку завдяки використанню Raspberry Pi та Arduino Uno, дозволяючи рухатися як робот-послідовник лінії з функціями картографування, навігації та обходу перешкод. Проте, існуючі платформи мобільних роботів мають обмежену масштабованість, що ускладнює їх інтеграцію з різними ринковими датчиками.

Запропоновано підхід, що комбінує графічні нейронні мережі з глибоким навчанням, що дозволяє приймати рішення на основі графіків, які містять дослідницьку інформацію для прогнозування оптимальних дій робота в умовах невизначеності [14]. Проте ці алгоритми мають високу обчислювальну складність і рідко дозволяють створювати 3D-карти внутрішнього середовища.

У найближчому майбутньому ефективне управління ресурсами стане ще важливішим у плануванні та контролі AMR на мобільних роботичних платформах. На відміну від AGV, які використовують обмежений набір обладнання для обробки, AMR матимуть доступ до ширшого асортименту, що вимагатиме ефективного управління. Повністю децентралізоване управління ресурсами на рівні AMR без певної координації призведе до неоптимальних результатів на рівні системи. Ітераційне децентралізоване прийняття рішень для всіх AMR та обмін результатами між

ними є важливими для досягнення глобальної оптимізації. Використання результатів децентралізованих рішень для тактичного планування, такого як розміщення станцій зарядки чи зон зберігання, може скоротити час подорожі. Нові підходи до моделювання AMR необхідні для ефективного вирішення цих завдань.

Математичне моделювання та оптимізаційні методи на базі мобільних роботичних платформ широко використовуються для вирішення проблем планування, особливо у виробництві, де кількість і тип завдань зазвичай перевищують ті, що є на складах.

Для вирішення міжроботних обмежень використовується модель багатотоварного мережевого потоку, що точно відображає складні взаємодії між агентами контейнерного терміналу [17]. Використовуючи генетичний алгоритм, можна зменшити середній час виконання системи та середній час передачі ресурсів для всіх роботів. Зростання обчислювальної потужності та технологій штучного інтелекту робить можливим використання моделей планування з багатьма цілями або обмеженнями, особливо в складних умовах, як-от виробництво з численними завданнями та центрами обробки. Сучасні технології обміну інформацією та обчислень на основі мобільних роботичних платформ відкривають нові можливості для онлайн-планування, надаючи гнучкість. Високий рівень комунікації необхідний для децентралізації розподілу завдань.

Для децентралізації завдань пропонується колективний і розподілений підхід до планування, що передбачає динамічну комунікацію між транспортними [7].

Перспективним є підхід до децентралізованого планування на основі аукціонних методів, де оголошувач (машина) та учасник торгів (AMR) співпрацюють для досягнення високої продуктивності в розподілі завдань. Для руху мобільних роботичних платформ розроблено класифікацію аукціонних методів, що охоплює єдиний, об'єднаний і комбінований варіанти розподілу завдань [9]. Розрахунок ставки є критично важливим, оскільки він відображає витрати AMR на виконання конкретного завдання і впливає на планування та розподіл завдань. Навіть під час виконання конкретного завдання AMR можуть подавати ставки на нові завдання, локально оптимізуючи свій список і використовуючи цю інформацію для розрахунку наступної ставки. Ставки можуть базуватися на витратах на виконання завдань або граничних витратах, враховуючи інші завдання. Кожен тип розрахунку має свій підходящий алгоритм. Для перших витрат використовують CNET, OCA-Alloc, CBAA та CBBA, тоді як граничні витрати розраховуються в алгоритмах Prim Allocation, SIT- і SET-MASR. Ці дії долають обмеження попередніх підходів до

операційних досліджень, дозволяючи розширити їх на великі флоти транспортних засобів, впроваджуючи гнучкість і масштабованість. Обчислення виконуються розподілено, що дозволяє їх застосування до складних задач з багатьма обмеженнями. Проте, побічним ефектом є зростання попиту на обчислювальну потужність для кожного AMR, що негативно впливає на споживання батареї.

Додаткові можливості для вдосконалення цих методів полягають у інтеграції процесу прийняття рішень з управління ресурсами та диспетчеризацією. Різноманітні багатокритеріальні правила диспетчеризації були розроблені для розподілу завдань між відповідними AMR на базі мобільних роботичних платформ, здебільшого використовуючи математичне моделювання, мережі черг та симуляцію для оцінки їхньої ефективності. Ці підходи в основному застосовуються у виробництві, а реалізації у складських приміщеннях і контейнерних терміналах зустрічаються рідше. Розроблено кілька математичних методів для моделювання проблеми диспетчеризації, які враховують різноманітні фактори, такі як маршрути, ємність транспортних засобів і обмеження, а також цілі, як-от мінімізація часу виконання, часу подорожі та затримки. Розроблено алгоритм динамічного програмування для позиціонування бездіяльних транспортних засобів у системі AGV з єдиним контуром [3]. Ця проблема була розширена до загальної схеми руху, яка вирішується за допомогою генетичного алгоритму [11].

На відміну від маршрутизації AGV, що використовує направляючу дорогу як вхідні дані, пошук шляху для AMR базується на математичному представленні середовища для знаходження найкоротшого та безконфліктного маршруту. AMR завжди створює новий, унікальний шлях під час переміщення з однієї точки в іншу. Обмеження статичних і динамічних перешкод, можливого радіусу повороту, розміру робота, розміру смуг і швидкості можуть бути враховані для визначення оптимального шляху з однією або кількома цілями. У статичних середовищах планування траєкторії виконується один раз, тоді як у динамічних це може вимагати повторного пошуку безколізійного маршруту, щоб кілька транспортних засобів могли обійти або усунути перешкоди.

Розглядаються графічні представлення середовища та алгоритми пошуку графів для одного AMR. Зокрема, алгоритми A і DLite, як модифікації алгоритму Дейкстри, відзначаються популярністю для пошуку найкоротшого шляху [13]. Алгоритм Дейкстри дозволяє пріоритизувати напрямки, надаючи перевагу менш затратним шляхам, тоді як A\* використовує евристичний підхід, який пріоритизує шляхи, що, на перший погляд, ведуть ближче до цілі. A\* вибирає маршрут, який мінімізує

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (1)$$

де  $g(n)$  – це довжина шляху від початкового вузла до вузла  $n$ , а  $h(n)$  – евристично обчислена найменша відстань до цільового стану. Алгоритм D·Lite, навпаки, працює в зворотному напрямку, від цілі до початку, і є особливо корисним для знаходження найкоротшого шляху в великих та складних зонах. Згідно з дослідженнями, симуляції наразі не можуть адекватно відтворити шляхи та поведінку AMR у динамічних середовищах [1]. У таких ситуаціях рухомі перешкоди можуть тимчасово блокувати шлях AMR, що вимагає адаптації планування руху для уникнення перешкод. Дослідження надають протоколи, які підвищують точність і якість симуляцій у динамічних умовах.

Ключовою характеристикою AMR є здатність працювати без нагляду людини та відновлюватися після збоїв, забезпечуючи надійність і стійкість системи. Тому важливо вивчити внутрішні та зовнішні фактори, які впливають на надійність системи, та запровадити методи прийняття рішень, що підтримують планування та контроль AMR.

Збільшена навігаційна гнучкість AMR може призводити до зростання невизначеності в часі подорожі. Для забезпечення стабільності системи введено оптимізаційну модель, що враховує як часові, так і вартісні показники для аналізу надійності виробничої системи [15].

Одним із сучасних підходів для підвищення енергоефективності AMR є використання алгоритму мінімізації втрат (Loss Minimization Algorithm, LMA), що дозволяє знижувати споживання енергії та збільшувати загальну ефективність роботи двигунів. Зокрема, для синхронних двигунів з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSM) цей підхід передбачає регулювання струмів на основі енергетичного балансу системи. Випробування показали, що використання LMA забезпечує зниження втрат на 4,5–7% у порівнянні з традиційними методами, зберігаючи при цьому стабільність та точність роботи двигунів [2].

Ще одним напрямом оптимізації є застосування технології динамічного моторного керування (Dynamic Motor Drive, DMD), яка використовує періодичне імпульсне керування для зниження навантаження на двигун при невеликих значеннях потужності. Цей підхід значно скорочує витрати енергії при роботі AMR у режимах легкого навантаження, збільшуючи автономність роботи та зменшуючи загальні експлуатаційні витрати [2,3].

### Висновки

Технологічні досягнення у сфері автономних мобільних роботів (AMR) суттєво підвищили

гнучкість, продуктивність та якість операцій, водночас знижуючи енергоспоживання й економічні витрати на автоматизацію процесів. Інтеграція технологій штучного інтелекту сприяє децентралізованому управлінню, що дає змогу AMR самостійно приймати рішення та адаптуватися до змінних умов, особливо в складських і виробничих середовищах. Розробка нових методів керування електроприводами, таких як алгоритми мінімізації втрат і динамічне моторне керування, дозволяє досягти значної економії енергії, що підвищує автономність і знижує експлуатаційні витрати.

Попри значний прогрес, оптимізація процесів планування, управління та впровадження AMR залишається викликом. Це дослідження детально розглядає сучасні технології в структурі AMR і системах контролю, а також виділяє ключові рішення для підвищення продуктивності. На основі аналізу літератури були запропоновані підходи до планування і контролю, з урахуванням специфіки децентралізованого управління та оптимального вибору між централізованим і децентралізованим підходами залежно від умов експлуатації. Більшість існуючих досліджень зосереджені на оптимізації AMR для виробництва та складських операцій, проте інші аспекти інтралогістики залишаються недостатньо вивченими. Дослідження показують, що вибір способу керування, кількості одиниць AMR, зон обслуговування та маршрутів є критично важливими факторами для досягнення збалансованих результатів і забезпечення економічної ефективності.

Застосування технологій штучного інтелекту і алгоритмів оптимізації у сфері управління електроприводами для AMR дозволяє інтегрувати різні аспекти прийняття рішень і досягати кількох цілей одночасно, зокрема підвищення автономності, зменшення енергоспоживання та підвищення загальної продуктивності систем.

### Список літератури

1. Зінько Р. В., Крайник Л. В., Горбай О. З., Поляков А. П. Роботизовані мобільні платформи для вибухонебезпечних предметів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 1. С. 52–62.
2. Huang S., Li L., Kato T. An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. № 19. P. 4093. doi: 10.3390/app9194093.
3. Salvini P., Paez-Granados D., Billard A. On the Safety of Mobile Robots Serving in Public Spaces. *Journal of Human–Robot Interaction*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 1–27. doi: 10.1145/3442678.
4. Shen Z., Du H., Yu L., Zhu W., Zhu M. A Path Planning and Tracking Control Algorithm for Multi-Autonomous Mobile Robot Systems Based on Spatiotemporal Conflicts and Nonholonomic Constraints. *Actuators*. 2024. Vol. 13. № 10. P. 399. doi: 10.3390/act13100399.

5. Li M., Guo B., Zhang J., Liu J., Liu S., Yu Z., Li Z., Xiang L. Decentralized Multi-AGV Task Allocation Based on Multi-Agent Reinforcement Learning with Information Potential Field Rewards. arXiv:2108.06886. 2021.
6. Azangoo M., Taherkordi A., Blech J. O., Vyatkin V. Digital Twin-Assisted Controlling of AGVs in Flexible Manufacturing Environments. arXiv:2112.01367. 2021.
7. Li Z., Liu Y., Chang F., Zhang J., Lu M. Research on UWB and LiDAR Fusion Positioning Algorithm in Indoor Environment. *Computer Engineering and Applications*. 2021. Vol. 57. № 6. P. 260–266. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2005-0435.
8. Loganathan A., Ahmad N. S. A Systematic Review on Recent Advances in Autonomous Mobile Robot Navigation. *Engineering Science and Technology*. 2023. Vol. 40. Article ID: 101343. doi: 10.1016/j.jestch.2023.101343.
9. Maia D., Coelho A., Ricardo M. Obstacle-Aware On-Demand 5G Network Using a Mobile Robotic Platform. *18th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. 2022. P. 470–473. doi: 10.1109/WiMob55322.2022.9941633.
10. Małopolski W., Skoczypiec S. The Concept of an Autonomous Mobile Robot for Automating Transport Tasks in High-Bay Warehouses. *Advances in Science and Technology*. 2024. Vol. 18. № 2. P. 1–10. doi: 10.12913/22998624/182932.
11. Jiang T. Y., Zhang S. L., Wang R., Wang S. Development and Verification of an Autonomous and Controllable Mobile Robot Platform. *Mechatron. Intell. Transp. Syst.* 2023. Vol. 2. № 1. P. 11–19. doi: 10.56578/mits020102.
12. Raj R., Kos A. Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 6951. doi: 10.3390/app12146951.
13. Lu D., Zhang Y., Gong Z., Wu T. A SLAM Method Based on Multi-Robot Cooperation for Pipeline Environments Underground. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 20. Article ID: 12995. doi: 10.3390/su142012995.
14. Zhao S., Wang C., Wang J., Li C. Design and Implementation of Low-Cost Autonomous Navigation System for Mobile Robot Platform. *Unmanned Systems Technology*. 2022. Vol. 5. № 4. P. 50–62. doi: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.4.038.
15. Xu X., Chen Y., Zou B., Gong Y. Assignment of Parcels to Loading Stations in Robotic Sorting Systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2022. Vol. 164. Article ID: 102808. doi: 10.1016/j.tre.2022.102808.
16. Zeng L., Guo S., Wu J., Markert B. Autonomous Mobile Construction Robots in Built Environment: A Comprehensive Review. *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 19. Article ID: 100484. doi: 10.1016/j.dibe.2024.100484.
17. Ткачук А. Г. Градуированная характеристика чувливого элемента системы стабилизации оптических устройств на базе роботизированной платформы. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 159–163.
18. Merabet A. Advanced Control for Electric Drives: Current Challenges and Future Perspectives. *Electronics*. 2020. Vol. 9. № 11. P. 1762. doi: 10.3390/electronics9111762.

## References

1. Zinko R. V., Kravnyk L. V., Gorbay O. Z., Polyakov A. P. Robotic mobile platforms for explosive devices. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 2018, No. 1, pp. 52–62.
2. Huang S., Li L., Kato T. An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, No. 19, pp. 4093, doi: 10.3390/app9194093.
3. Salvini P., Paez-Granados D., Billard A. On the Safety of Mobile Robots Serving in Public Spaces. *Journal of Human–Robot Interaction*, 2021, vol. 10, No. 3, pp. 1–27, doi: 10.1145/3442678.
4. Shen Z., Du H., Yu L., Zhu W., Zhu M. A Path Planning and Tracking Control Algorithm for Multi-Autonomous Mobile Robot Systems Based on Spatiotemporal Conflicts and Nonholonomic Constraints. *Actuators*, 2024, vol. 13, No. 10, pp. 399, doi: 10.3390/act13100399.
5. Li M., Guo B., Zhang J., Liu J., Liu S., Yu Z., Li Z., Xiang L. Decentralized Multi-AGV Task Allocation Based on Multi-Agent Reinforcement Learning with Information Potential Field Rewards. arXiv:2108.06886, 2021.
6. Azangoo M., Taherkordi A., Blech J. O., Vyatkin V. Digital Twin-Assisted Controlling of AGVs in Flexible Manufacturing Environments. arXiv:2112.01367, 2021.
7. Li Z., Liu Y., Chang F., Zhang J., Lu M. Research on UWB and LiDAR Fusion Positioning Algorithm in Indoor Environment. *Computer Engineering and Applications*, 2021, vol. 57, No. 6, pp. 260–266, doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2005-0435.
8. Loganathan A., Ahmad N. S. A Systematic Review on Recent Advances in Autonomous Mobile Robot Navigation. *Engineering Science and Technology*, 2023, vol. 40, Article ID: 101343, doi: 10.1016/j.jestch.2023.101343.
9. Maia D., Coelho A., Ricardo M. Obstacle-Aware On-Demand 5G Network Using a Mobile Robotic Platform. *18th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2022, pp. 470–473, doi: 10.1109/WiMob55322.2022.9941633.
10. Małopolski W., Skoczypiec S. The Concept of an Autonomous Mobile Robot for Automating Transport Tasks in High-Bay Warehouses. *Advances in Science and Technology*, 2024, vol. 18, No. 2, pp. 1–10, doi: 10.12913/22998624/182932.
11. Jiang T. Y., Zhang S. L., Wang R., Wang S. Development and Verification of an Autonomous and Controllable Mobile Robot Platform. *Mechatron. Intell. Transp. Syst.*, 2023, vol. 2, No. 1, pp. 11–19, doi: 10.56578/mits020102.
12. Raj R., Kos A. Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, Article ID: 6951, doi: 10.3390/app12146951.
13. Lu D., Zhang Y., Gong Z., Wu T. A SLAM Method Based on Multi-Robot Cooperation for Pipeline Environments Underground. *Sustainability*, 2022, vol. 14, No. 20, Article ID: 12995, doi: 10.3390/su142012995.
14. Zhao S., Wang C., Wang J., Li C. Design and Implementation of Low-Cost Autonomous Navigation System for Mobile Robot Platform. *Unmanned Systems Technology*, 2022, vol. 5, No. 4, pp. 50–62, doi: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.4.038.
15. Xu X., Chen Y., Zou B., Gong Y. Assignment of Parcels to Loading Stations in Robotic Sorting Systems.



- Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, vol. 164, Article ID: 102808, doi: 10.1016/j.tre.2022.102808.
16. Zeng L., Guo S., Wu J., Markert B. Autonomous Mobile Construction Robots in Built Environment: A Comprehensive Review. *Developments in the Built Environment*, 2024, vol. 19, Article ID: 100484, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100484.
17. Tkachuk A. G. Gradual Characteristics of the Sensitive Element of the Stabilization System of Optical Devices Based on a Robotic Platform. *Scientific Notes of TNU Named After V. I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*, 2022, vol. 33 (72), No. 5, pp. 159–163.
18. Merabet A. Advanced Control for Electric Drives: Current Challenges and Future Perspectives. *Electronics*, 2020, vol. 9, No. 11, Article ID: 1762, doi: 10.3390/electronics9111762.
17. Tkachuk A. G. Gradual Characteristics of the Sensitive Element of the Stabilization System of Optical Devices

#### Відомості про авторів (About authors)

**Силін Максим Костянтинович** - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри Автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8053-056X>; e-mail: [maksim.silin2010@gmail.com](mailto:maksim.silin2010@gmail.com).

**Sylin Maksym** - National technical university "Kharkiv polytechnic institute", postgraduate student of the department Automated electromechanical systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8053-056X>; e-mail: [maksim.silin2010@gmail.com](mailto:maksim.silin2010@gmail.com).

**Пшеничников Дмитро Олексійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Автоматизовані електромеханічні системи; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1243-168X>; e-mail: [pshenichdm@gmail.com](mailto:pshenichdm@gmail.com).

**Pshenychnykov Dmytro** – candidate of technical sciences, National technical university "Kharkiv polytechnic institute", associate professor of the department Automated electromechanical systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1243-168X>; e-mail: [pshenichdm@gmail.com](mailto:pshenichdm@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Силін М. К., Пшеничников Д. О. Оптимізація та управління автономними мобільними роботами для логістичних процесів: огляд технологій і перспектив. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 4 (22). С. 38-46. doi: 10.20998 / 2413–4295.2024.04.05.

*Please cite this article as:*

Sylin M., Pshenychnykov D. Optimization and management of autonomous mobile robots for logistics processes: A review of technologies and perspectives. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU «KhPI», 2024, no. 4 (22), pp. 38-46, doi: 10.20998 / 2413–4295.2024.04.05.

*Надійшла (received) 25.10.2024  
Прийнята (accepted) 13.12.2024*