

УДК 621.865:658.7

МЕХАТРОННА АРХІТЕКТУРА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ГІБРИДНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ В УМОВАХ СТРУКТУРНОЇ ГЕТЕРОГЕННОСТІ

Полюхович А.Г., аспірант

Київський національний університет технологій та дизайну

Ковальов Ю.А., кандидат технічних наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну

Ключові слова: гібридна транспортно-логістична платформа, автономні мобільні роботи, мехатронна система, адаптивна навігація, розподіл завдань.

Сучасні транспортно-логістичні об'єкти характеризуються високою динамікою матеріальних потоків і одночасною присутністю персоналу (людей) та автоматизованих транспортних засобів. У таких умовах виникає інженерна задача забезпечення безпечного та ефективного переміщення вантажів у змішаному середовищі з динамічними перешкодами та необхідністю взаємодії людини і технічних систем.

Традиційні автоматизовані керовані транспортні засоби (AGV — Automated Guided Vehicle) орієнтовані на функціонування у структурованому середовищі з фіксованими маршрутами, що обмежує їх застосування в умовах змінної конфігурації простору. Це зумовлює потребу у створенні адаптивних мобільних платформ, здатних реагувати на зміни середовища в режимі реального часу та забезпечувати безпечну взаємодію людина–робот (Human–Robot Interaction).

Актуальність дослідження визначається тенденціями цифровізації логістики, зокрема розвитком інтелектуальних транспортних систем, автоматизацією внутрішніх процесів та підвищенням енергоефективності логістичних операцій [4].

Метою роботи є формування концепції гібридної транспортно-логістичної платформи та розробка підходу до моделювання її поведінки в умовах динамічного змішаного середовища.

Дослідження має концептуальний характер і спрямоване на узагальнення принципів побудови таких систем як складних мехатронних об'єктів, що поєднують сенсорні, навігаційні та алгоритмічні компоненти. Запропонований підхід орієнтований на опис логіки прийняття рішень і адаптивної поведінки платформи з урахуванням взаємодії з людиною та змін параметрів середовища.

Гібридну транспортно-логістичну платформу доцільно розглядати як складну мехатронну систему, проектування якої базується на інтеграції механічних, електронних та програмних компонентів у межах єдиного життєвого циклу. Такий підхід відповідає сучасним принципам проектування мехатронних систем, що передбачають інтегровану

розробку механічних, електронних та програмних компонентів у межах єдиної архітектури [3].

Структурно платформа включає кілька взаємопов'язаних модулів: сенсорний, навігаційний, механічний та модуль обробки даних. Сенсорний модуль забезпечує збір інформації про навколишнє середовище за допомогою камер, лідарів та інерціальних вимірювальних пристроїв (IMU) [1]. Навігаційний модуль відповідає за визначення положення платформи та планування траєкторії руху. Механічний модуль реалізує фізичне переміщення та маніпулювання вантажем, тоді як модуль обробки даних забезпечує інтеграцію сенсорної інформації та формування керуючих впливів.

Ключовим елементом функціонування платформи є застосування методів сенсорного злиття даних, що дозволяє підвищити точність локалізації та надійність сприйняття середовища. На цій основі реалізується підхід одночасної локалізації та побудови карти середовища (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM), що дозволяє платформі одночасно визначати власне положення та формувати модель навколишнього простору без використання жорстко заданої інфраструктури.

Таким чином, гібридна платформа виступає не як окремий логістичний інструмент, а як інтегрована мехатронна система, здатна адаптуватися до змін середовища та підтримувати прийняття рішень у режимі реального часу.

Функціонування гібридної транспортно-логістичної платформи в умовах змінного середовища вимагає реалізації адаптивної навігації, здатної враховувати як статичні, так і динамічні фактори. Особливістю таких умов є змінний характер появи перешкод у реальному середовищі, зокрема рухомого персоналу та інших транспортних засобів, що унеможлиблює використання виключно детермінованих маршрутів.

У цьому контексті навігаційна система повинна забезпечувати безперервне оновлення траєкторії руху з урахуванням поточного стану середовища, а також оперативне прийняття рішень щодо обходу перешкод. Важливим аспектом є узгодження глобального планування маршруту з локальною реакцією на змінні умови, що забезпечує баланс між ефективністю переміщення та безпекою взаємодії з людиною.

Для реалізації таких функцій доцільно застосовувати підходи локальної навігації, зокрема методи штучних потенційних полів, у яких цільова точка формує силу притягання, а перешкоди — сили відштовхування, що дозволяє формувати адаптивну траєкторію руху. Альтернативно можуть бути використані методи векторних гістограм (Vector Field Histogram, VFH), які забезпечують вибір оптимального напрямку руху на основі аналізу конфігурації перешкод з урахуванням кінематичних обмежень платформи [1].

Застосування таких алгоритмічних підходів створює основу для побудови системи навігації, здатної функціонувати в умовах невизначеності та підтримувати ефективну взаємодію у середовищі типу «людина–робот».

Однією з ключових задач функціонування гібридної транспортно-логістичної платформи є формування узгодженої поведінки у системі з гетерогенними (неоднорідними) агентами, де одночасно діють як роботизовані засоби, так і персонал. У цьому контексті актуалізується задача розподілу завдань у багатоагентному середовищі (Multi-Agent Task Allocation Problem), що ускладнюється відмінностями у продуктивності, швидкості, енергоефективності та експлуатаційних обмеженнях різних агентів [2].

Для опису такої взаємодії запропоновано адаптацію класичної чотирикровокової моделі транспортного попиту до мікрорівня внутрішньооб'єктної логістики. Зокрема, етап генерації інтерпретується як формування потоку логістичних завдань, тоді як етап вибору виду транспорту трансформується у задачу вибору виконавця — людини або роботизованої платформи — залежно від умов виконання.

Такий підхід дозволяє формалізувати процес прийняття рішень щодо розподілу завдань із урахуванням характеристик середовища та ресурсних обмежень системи. У перспективі для кількісного опису цього вибору можуть бути використані імовірнісні моделі дискретного (альтернативного) вибору, зокрема Logit-моделі, що дозволяють оцінювати функцію корисності альтернатив на основі узагальнених витрат часу та енергії [5].

Запропонована інтерпретація створює основу для поєднання підходів транспортного моделювання та задач керування роботизованими системами, забезпечуючи узгоджене функціонування гібридного середовища «людина–робот».

Для оцінки ефективності запропонованого підходу до функціонування гібридної транспортно-логістичної платформи запропоновано використання сценарного моделювання, що дозволяє відобразити поведінку системи в різних умовах експлуатації.

Передбачається розгляд трьох базових сценаріїв: базового, обхідного та аварійного.

Очікується, що порівняння зазначених сценаріїв дозволить оцінити вплив різних умов функціонування на такі показники, як час виконання завдань, кількість змін маршруту, енергоспоживання та рівень безпеки.

Запропонований підхід формує основу для подальшої реалізації імітаційного моделювання та кількісної верифікації отриманих результатів.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості інтеграції гібридної транспортно-логістичної платформи в існуючі цифрові контури управління підприємством, зокрема системи класу MES

(Manufacturing Execution Systems) та WMS (Warehouse Management Systems). Це забезпечує узгодження фізичних логістичних процесів із інформаційними потоками та підвищує прозорість і керованість внутрішньооб'єктних операцій.

Запропоновані рішення відповідають сучасним тенденціям розвитку інтелектуальних транспортних систем, зокрема у частині автоматизації, адаптивного керування та взаємодії людини і технічних засобів. Крім того, впровадження гібридних платформ сприяє підвищенню енергоефективності логістичних процесів і створює передумови для зниження вуглецевого навантаження за рахунок оптимізації маршрутів та раціонального використання ресурсів.

Таким чином, розробка та впровадження подібних систем узгоджується зі стратегічними напрямками розвитку транспортної та логістичної інфраструктури, орієнтованими на цифровізацію, безпеку та сталий розвиток [4].

У роботі сформовано концептуальні засади побудови гібридної транспортно-логістичної платформи як інтегрованої мехатронної системи та запропоновано підхід до моделювання її поведінки в умовах динамічного змішаного середовища. Показано потенціал поєднання методів транспортного моделювання, алгоритмів адаптивної навігації та підходів до розподілу завдань у багатоагентних системах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на емпіричну перевірку запропонованих рішень, розвиток алгоритмічного забезпечення навігації та прийняття рішень, а також поглиблення моделей взаємодії людини та роботизованих систем у логістичних процесах.

Список використаних джерел

1. Keith R., La H. M. Review of Autonomous Mobile Robots for the Warehouse Environment. Reno : University of Nevada, 2024. 25 p.
2. Zhang M., Grosse E. H. How to Model Human–Robot Collaborative Logistics Systems: Systematic Literature Review and Future Perspectives. IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58, № 19. P. 379–384.
3. Gerschütz B., Sauer C., Kormann A. та ін. Digital Engineering Methods in Practical Use during Mechatronic Design Processes. Designs. 2023. Vol. 7, № 4. Art. 93.
4. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках : Постанова Кабінету Міністрів України від 27 груд. 2024 р. № 1550. Офіційний вісник України. 2025. № 8. Ст. 665.
5. Методичні рекомендації з моделювання транспортних потоків під час оцінювання ефективності проєктних рішень щодо дорожньої інфраструктури : МР Б.2.2-37641918-928:202X (перша редакція) / ДП «ДерждорНДІ». Київ, 2023. 64 с.