

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Математична модель управління рухом  
чотириколісного мобільного роботу

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-1  
Злобін О.С.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Лебедєв О.Г.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Системне програмування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Злобіну Олександр Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Математична модель управління рухом чотириколісного мобільного  
роботу

затверджена наказом по університету від “ 06 ” листопада 2023 р. № 1299Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 15 січня 2024р.

3. Вхідні дані до роботи 1) провести огляд та аналіз мобільних роботів при взаємодії з  
неорганізованим середовищем; 2) провести огляд та класифікацію методів планування  
маршруту мобільним роботом; 3) провести огляд та аналіз базових типів мобільних  
роботів; 4) провести дослідження між траєкторією руху мобільного робота та  
кривими Без'є.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 18 слайдів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	07.11.23 - 13.11. 23	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	14.11. 23 - 20.11. 23	
3	Вибір інструментальних засобів	21.11. 23 - 23.11. 23	
4	Розробка моделей протоколів	24.11. 23 - 06.12. 23	
5	Проведення експериментів	07.12.23 - 23.12.23	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	26. 12. 23 - 02.01. 24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	03. 01. 24 - 06.01. 24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	09.01.24 - 12.01. 24	

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Лебедєв О.Г.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 63 с., 26 рис., 2 табл., 1 дод., 14 джерел.

### АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ, МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ, ФІЗИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження математичної моделі управління рухом чотириколісним мобільним роботом.

У ході виконання кваліфікаційної роботи досліджується можливість планування маршрутів та виконання завдань мобільним роботом на території логістичного центру. Вирішення поставленого завдання передбачає розробку алгоритмів формування маршрутів колісного мобільного робота, які враховують особливості конструкції мобільної платформи та робочого простору, в якому функціонує робот.

Розв'язання цього завдання дозволить мінімізувати витрати часу на переміщення об'єктів складування територією логістичного центру за допомогою розробки групи алгоритмів автоматичного управління траєкторій руху мобільного робота.

## ABSTRACT

Master's thesis: 63 pages, 26 figures, 2 tables, 1 appendices, 14 sources.

CONTROL ALGORITHM, MOBILE ROBOT, PHYSICAL ENVIRONMENT, ROUTE PLANNING

The purpose of the qualification work is to study the mathematical model of the movement control of a four-wheel mobile robot.

In the course of the qualification work, the possibility of planning routes and performing tasks with mobile works on the territory of the logistics center is investigated. The solution to the task involves the development of algorithms for the formation of routes for a wheeled mobile robot, taking into account the features of the mobile platform design and the workspace in which the robot functions.

The solution of this task will allow to minimize the time spent on the movement of storage objects on the territory of the logistics center by means of the development of a group of algorithms for the automatic control of the movement trajectories of mobile robots.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП .....	9
1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА НА СКЛАДСЬКІЙ ТЕРИТОРІЇ ЛОГІСТИЧНОГО ЦЕНТ.....	11
1.1 Огляд складської логістики.....	11
1.2 Опис логістичного мобільного робота.....	23
2 ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ СКЛАДСЬКОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА.....	26
2.1 Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі графів.....	27
2.2 Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі клітинної декомпозиції.....	28
2.3 Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі потенційних полів .....	29
2.4 Методи планування маршруту робота на основі оптимізаційних методів.....	30
2.5 Методи планування маршруту робота на основі інтелектуальних методів.....	31
2.6 Огляд максимально допустимої швидкості руху складського мобільного робота .....	34
2.7 Аналіз кінематики повороту чотириколісного транспортного засобу..	36
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ .....	41
3.1 Математична модель управління рухом складського мобільного робота .....	41

3.2 Пошук опорної траєкторії та уникнення зіткнення з перешкодою при русі складського мобільного робота .....	45
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	51
ДОДАТОК А ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

ААУ – адаптивне автономне управління

АСК - автоматизована система керування

БЗ – база знань

МРЧ – метод рою частинок

ПЗ – програмне забезпечення

СSP – проблема задоволення обмежень (англ., Constraint Satisfaction Problem)

RRT – алгоритм швидкозростаючого випадкового дерева (англ., Rapidly -exploring Random Tree)

## ВСТУП

В даний час розроблено цілу низку мобільних робототехнічних систем, спрямованих на комп'ютеризацію процесів транспортування, обліку та зберігання вантажів в умовах складських комплексів великих логістичних центрів. Однак, незважаючи на це, існує широке коло завдань, де обробка вантажів досі здійснюється в «ручному режимі».

По-перше, це ділянка «первісного приймання», на якій відбувається розвантаження об'єктів, що прибули на зберігання.

По-друге, ділянка транспортування вантажу від місця «первісного приймання» до пункту «обліку та сортування», де переміщення вантажів здійснюється за допомогою різноманітних транспортерів під керуванням оператора.

Слід зауважити, що питання комп'ютеризації ділянки «первісного приймання» не має суто технічного рішення, оскільки вимагає наявності узгоджених стандартів зберігання та розміщення об'єктів, що переміщуються при транспортуванні між складськими приміщеннями логістичних центрів і постачальником продукції. Водночас питання виключення людського чинника з процесу переміщення вантажів територією логістичних центрів є актуальним технічним завданням, оскільки автоматизація даної ділянки складського комплексу дозволить збільшити швидкість обробки вантажів, що у свою чергу призведе до збільшення «пропускної спроможності» логістичного центру загалом. Крім цього, комп'ютеризація даної ділянки транспортування, по-перше, дозволить виключити помилки на етапі кінцевого зберігання, зумовлені людським фактором (вантаж доставлений не на ту полицю/стрічку), по-друге, забезпечить максимально ефективне використання всіх наявних транспортерів, виключаючи їх простій або «баластні» переміщення. Слід зазначити, що сьогодні існує безліч технічних засобів, які успішно вирішують завдання автоматизації

внутрішньоскладських перевезень. Однак у силу особливостей умов, у яких здійснюється транспортування об'єктів зберігання територією логістичних центрів, робототехнічні пристрої, які набули широкого поширення, у даному разі не застосовні. Таким чином, одним із базових завдань, яке має бути вирішено в рамках кваліфікаційної роботи, є завдання планування маршрутів та виконання завдань мобільним роботом на складській території логістичного центру.

# 1 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА НА СКЛАДСЬКІЙ ТЕРИТОРІЇ ЛОГІСТИЧНОГО ЦЕНТРУ

## 1.1 Огляд складської логістики

Впровадження робототехнічних комплексів на виробництві почалося з 1960-х років минулого століття з появою першого серійного промислового робота «Юнімейт», виробництва фірми «Юнімейшн». Процес роботизації набув масштабного характеру до середини 80-х років минулого століття і продовжується до теперішнього часу. Так, наприклад, за останні 4 роки (2019 - 2022) кількість відвантажень промислових роботів у світі показує впевнене зростання в середньому на 13,5% відсотків щорічно (рисунок 1.1).

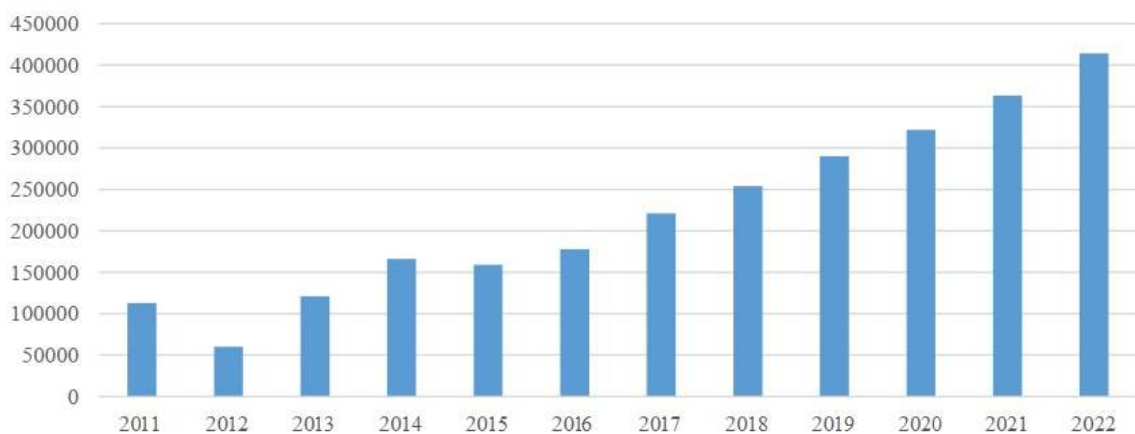


Рисунок 1.1 – Щорічне відвантаження інтелектуальних мобільних роботів у світі

Причому загальний рівень промислової автоматизації, який виражається у кількості інтелектуальних мобільних роботів на кожні 10000 працівників, також демонструє впевнене зростання. Лідером промислової автоматизації є Південна Корея, в якій на 2022 рік на кожні 10000 робітників

налічується 631 робот, за середньосвітового показника 74 робота на кожні 10000 працівників. Загальний характер показника роботизації промисловості по країнах наведено на рисунку 1.2.

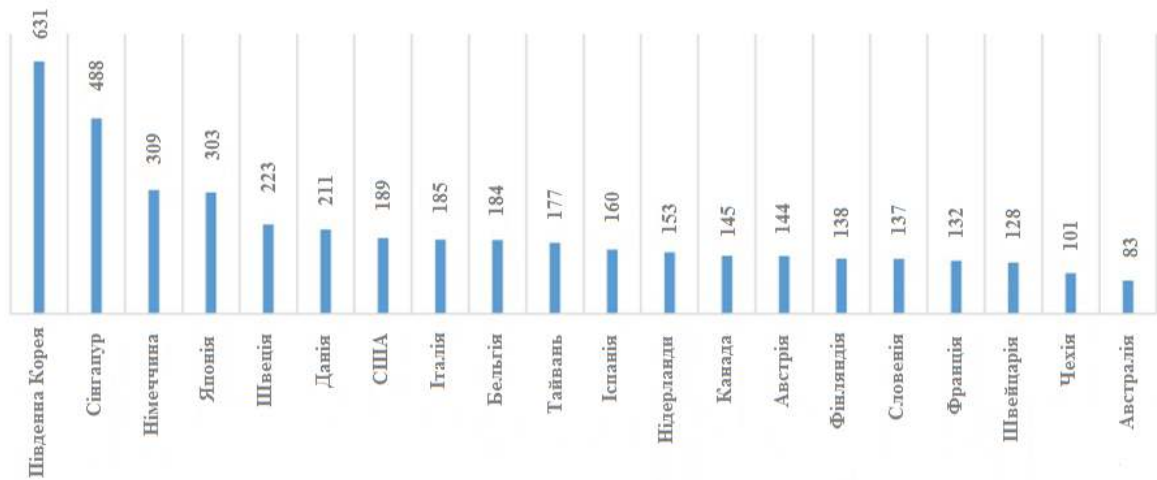


Рисунок 1.2 – Кількість встановлених інтелектуальних мобільних роботів на 10000 робітників на 2022 рік

Незважаючи на те, що склад є важливою та невід'ємною частиною будь-якого логістичного центру, комп'ютеризація складського господарства тривалий час була «вузким» місцем у створенні комп'ютеризованих виробництв. Так, наприклад, навіть для складських комплексів категорії А+, за міжнародною класифікацією Кнайт Франк (Knight Frank) до 2020 року існувала проблемна, з точки зору комп'ютеризації, ділянка транспортування об'єктів складування – між зоною приймання/відвантаження та зоною зберігання (рисунок 1.3).

Фактично до середини 2000-х років робототехнічні рішення застосовувалися виключно в зонах С і D (рисунок 1.3) складських комплексів і використовувалися для автоматизації:

- обліку об'єктів складування;
- сортування (роботи-сортирувальники);

- палетування (роботи-паллетайзери);
- стелажного зберігання (автоматичні крани-штабелери).

Однак у 2008 році, з появою на ринку складських мобільних роботів, ситуація змінилася кардинально. Сьогодні в складській логістиці взагалі відбуваються революційні зміни. ІТ-технології принципово змінили логістику. Будуються роботизовані склади, де немає навантажувачів, все комп'ютеризовано.

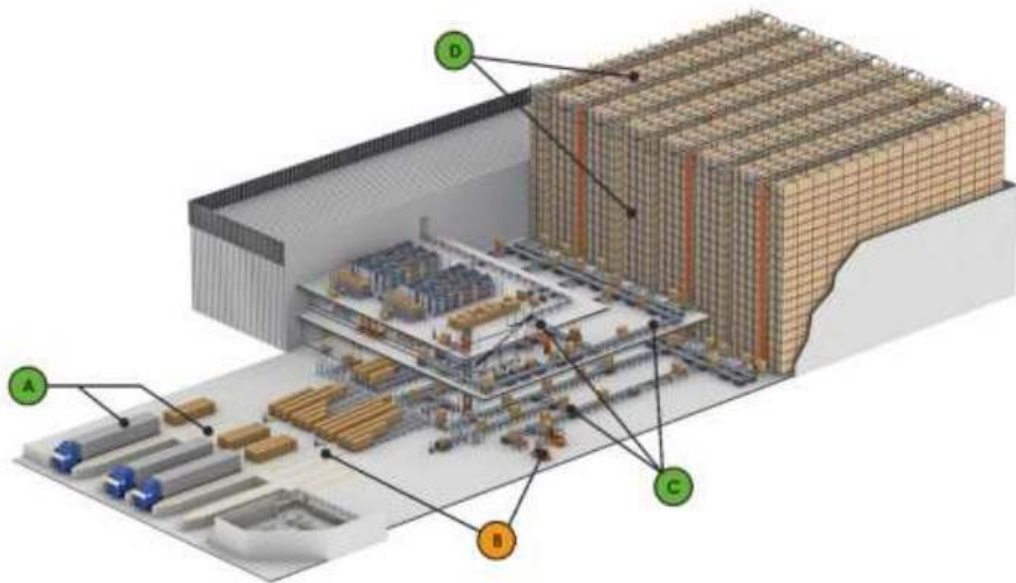


Рисунок 1.3 – Загальна схема ділянки обробки та зберігання вантажів складського комплексу промислового підприємства: де А – прийом/відвантаження; В – неавтоматизоване транспортування із застосуванням навантажувачів під керуванням оператора; С, D – автоматизоване транспортування

З появою складських мобільних роботів почався новий ступінь комп'ютеризації складського господарства. Так, наприклад, до 2025 року очікується, що понад 50 тисяч складських комплексів повністю перейдуть на використання складських мобільних роботів, які замінять класичні способи транспортування об'єктів зберігання територією складу. Що взагалі не дивно,

оскільки економічний ефект від впровадження складських мобільних роботів складно переоцінити. Так, наприклад, компанія Amazon, першопрохідник у галузі застосування складських мобільних роботів для комп'ютеризації складської логістики, заявляє про те, що з впровадженням складських мобільних роботів ефективність використання складських площ у період з 2018 по 2021 рік збільшилася на 42%, а швидкість обробки замовлень зросла на 50%, що дозволило компанії перейти до системи доставки «День у день».

Парк складських мобільних роботів, що функціонують на складах Amazon на 2022 рік, налічував 45000 одиниць. Компанія DHL у звіті про впровадження складських мобільних роботів на тестовому складському комплексі за 2022 рік показала збільшення ефективності використання площ складського комплексу на 60%, скорочення часу обробки вантажів на 36%, а також збільшення продуктивності праці співробітників у 2,5 рази.

При цьому до планів компанії до 2025 року входить модернізація 60% складських комплексів по всій території Північної Америки, шляхом впровадження складських мобільних роботів. Це понад 360 складських комплексів та логістичних центрів. Британська компанія Ocado повідомляє про скорочення часу обробки вантажів на 35% і збільшення ефективності використання складських площ на 15% за рахунок впровадження рейкових складських мобільних роботів, розроблених власним технічним підрозділом компанії.

Таким чином, незважаючи на низку технічних обмежень, кількість впроваджень логістичних складських мобільних роботів неухильно зростає по всьому світу і за прогнозами аналітиків до 2025 досягне позначки 486 тисяч одиниць на рік. Лідруючі позиції виробництва логістичних складських мобільних роботів належить компанії Amazon Robotics, в недавньому минулому Kiva Systems, піонера в розробці складських мобільних роботів для складських комплексів (рисунок 1.4).

Керівники проекту Mick Mountz, автори Kiva Systems, професор Raffaello D'Andrea та професор Peter R. Wurman. Рішення розроблялося на

замовлення компанії Amazon. Перші успішні випробування було проведено у 2008 році. Демонстрація проводилася на спеціально побудованому для цієї мети складському комплексі загальною площею 1000 м<sup>2</sup>. Демонструвалися складські мобільні роботи Kiva Systems першого покоління, вантажопідйомністю 450 кг (рисунок 1.5).



Рисунок 1.4 – Складські мобільні роботи виробництва компанії Amazon Robotics



Рисунок 1.5 – Складські мобільні роботи виробництва компанії Kiva Systems

Основна ідея, яка покладена в основу проекту робототехнічного комплексу, полягала в тому, щоб не співробітник переміщався по складу до стелажу з об'єктами зберігання, а спеціально спроектований стелаж, так званий – род, доставлявся до співробітника за коштами складського мобільного робота. Таким чином, співробітник складу завжди залишається статичним. Слід зазначити, що доступ людей до робочої зони складського мобільного робота заборонено. Схема взаємодії людина-робот, характерна на вирішення Kiva Systems, наведена на рисунку 1.6. Орієнтація складського мобільного робота в робочій зоні здійснюється за рахунок магнітної розмітки покриття підлоги. Групова взаємодія та виключення колізій забезпечується за допомогою системи керування верхнього рівня. Для першого покоління складського мобільного робота стелажі маркувалися магнітними мітками.

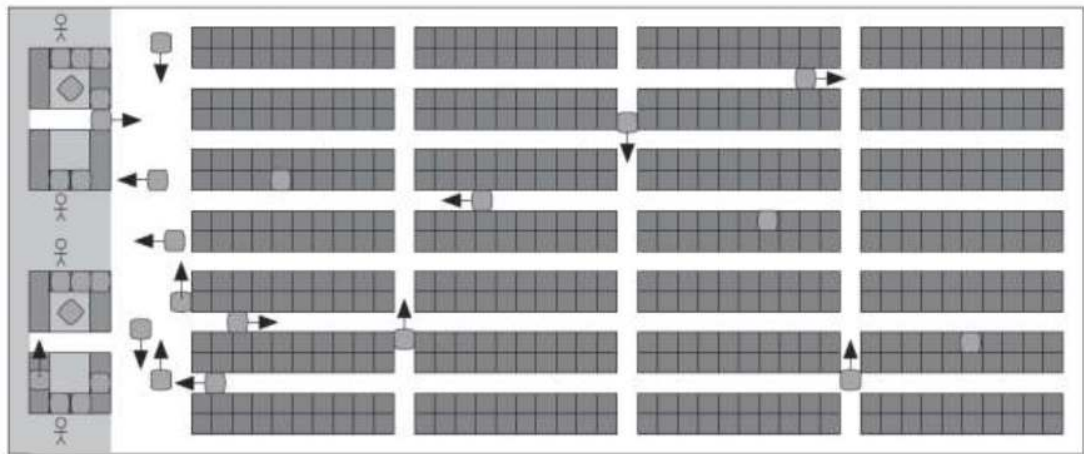


Рисунок 1.6 – Схема взаємодії співробітників складу та складського мобільного робота Kiva Systems

Сучасні модифікації складського мобільного робота виробництва компанії Amazon Robotics оснащені системою технічного зору, яка здатна зчитувати штрих-коди, якими маркуються стелажі, мають електричну силову установку, однієї підзарядки батареї вистачає на 90 хвилин безперервної роботи. Кінематична схема чотириколісна, з двома провідними колесами і

двома рояльними колісними модулями, що вільно котяться. Тип маневрування – силовий. Прокладання маршруту та дозвіл колізій здійснюється системою управління верхнього рівня. Система прокладання маршруту реалізована методом орієнтованих графів. Слід зазначити, що на 2021 рік у компанії Amazon Robotics стали з'являтися конкуренти – Ronavi Robotics. Технічні рішення, що покладені в основу системи управління складського мобільного робота Ronavi Robotics, аналогічні технічним рішенням Amazon Robotics. Початок серійного виробництва складського мобільного робота Ronavi Robotics намічено на 2025 рік.

Інший підхід до створення складських мобільних роботів у 2016 році продемонструвала компанія Ocado. Для автоматизації процесу транспортування технічний підрозділ компанії під керівництвом Paul Clark розробив складський мобільний робота для власних потреб (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Складський мобільний робот компанії Ocado

Переміщення складського мобільного робота здійснюється по ортогональних рейках, що утворюють секції, під якими знаходяться складські осередки. Управління складським мобільним роботом, формування маршрутів та дозвіл колізій здійснюється системою управління верхнього рівня. Складські мобільні роботи мають чотириколісні пари, що

забезпечують рух у взаємно перпендикулярних напрямках. Складські мобільні роботи реалізовані у вигляді куба зі стороною 0,9 м і при переміщенні розвивають швидкість до 1,4 м/с. Характер робочої зони виключає появу у ній людини. В основі системи формування маршруту лежить метод сіток, запропонований Ельфом. Взаємодія між системою верхнього рівня та складським мобільним роботом здійснюється за допомогою бездротового каналу зв'язку з використанням обладнання стандарту 4G. Слід зазначити, що система логістичних складських мобільних роботів, яка розроблена компанією Ocado, є вузькопрофільною і не придатна для впровадження, як засіб автоматизації складів загального призначення. У тому числі складів великих логістичних центрів. Про що свідчить відсутність упроваджень системи сторонніми, по відношенню до Ocado, компаніями.

Одним з найбільш перспективних рішень у галузі розробки логістичних складських мобільних роботів є проект PAN-Robots, який є спільною розробкою цілої групи великих промислових фірм та університетів Західної Європи. До робочої групи проекту входять світовий лідер у галузі виробництва промислових датчиків зовнішньої інформації німецька компанія SICK, італійська компанія Elettric80, група компаній Casbega, науково-дослідні центри Модени та Фінляндії. Починаючи з 2019 року проектною групою зроблено понад 60 публікацій з даної проблематики. Результатом досліджень, проведених робочою групою проекту, є PAN-Robots (скорочення Plug&Navigate robots for smart factories). Це робототехнічний комплекс, який дозволяє реалізувати переміщення об'єктів складування територією логістичного центру, повністю виключаючи присутність оператора. PAN-Robots має дворівневу архітектуру, що складається із системи управління верхнього рівня, інтегрованої з приміщенням логістичного центру, та кількох складських мобільних роботів. Система управління верхнього рівня включає в себе:

- центральну обчислювальну систему;
- базу даних;

- масив розподілених по приміщенню логістичного центру стельових лазерних сканерів, що здійснюють збір інформації про зміну геометрії простору приміщення складу.

Переміщення об'єктів, що складуються, здійснюється складським мобільним роботом з електричною силовою установкою, що має кінематичну схему трициклу і здатним розвивати швидкість до 1,3 м/с (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Складський мобільний робот проекту PAN-Robots

Складські мобільні роботи проекту PAN-Robots оснащені розвиненою системою датчиків зовнішньої інформації, що дозволяє розпізнавати, класифікувати, визначати орієнтацію, швидкість та напрямок руху об'єктів, що оточують складський мобільний робот. Система датчиків зовнішньої інформації складського мобільного робота є гібридною. Вона складається з масиву лазерних далекомірів та системи технічного зору, реалізованої за допомогою 3D стереокамер.

Реалізація складського мобільного робота проекту PAN-Robots має оптику типу Fisheye. Система лазерних далекомірів, взаємодіючи з

розподіленими на території складського комплексу маяками, забезпечує можливість здійснювати визначення власної орієнтації транспортерів у робочій зоні. Система технічного зору на основі оптики Fisheye розроблена за участю науково-дослідної групи компанії SICK. Основною особливістю запропонованої системи є можливість одночасного контролю всього простору, що оточує складський мобільний робот проекту PAN-Robots (360°). Ядром системи технічного зору – є модуль розпізнавання образів. Запропонована система розпізнавання образів складського мобільного робота проекту PAN-Robots дозволяє визначати факт наявності об'єктів-перешкод на дистанції до 20м, класифікувати такі об'єкти, а також визначати їхню орієнтацію, напрямок та швидкість руху щодо складського мобільного робота та своєчасно приймати рішення про коригування маршруту руху, як це показано на рисунку 1.9.

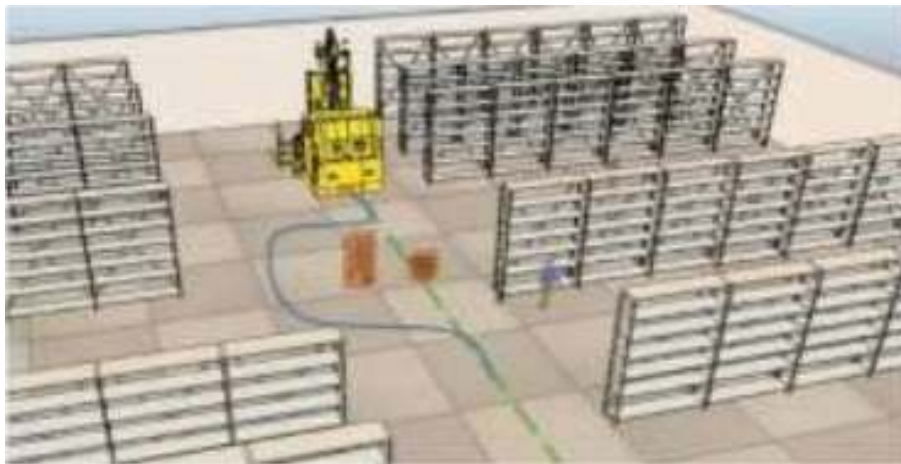


Рисунок 1.9 – Поведінка складського мобільного робота проекту PAN-Robots при виявленні перешкоди

Складський мобільний робот проекту PAN-Robots є наступним ступенем еволюції логістичних складських мобільних роботів у порівнянні з описаними вище складськими мобільними роботами Amazon Robotics та подібних до них реалізацій. Так у даному випадку система верхнього рівня відповідає виключно за постановку завдання, тобто визначення початкової та

кінцевої точки переміщення, тоді як завдання планування маршруту, а також дозвіл можливих колізій покладається на складські мобільні роботи. Що з одного боку суттєво ускладнює реалізацію системи управління, з іншого – розширює можливості та сферу застосування даного рішення, у тому числі уможливорює присутність оператора в робочій зоні складського мобільного робота.

Планування переміщення складського мобільного робота здійснюється на основі комбінації карти місцевості та координатних сіток робочого простору. Динамічна карта місцевості оновлюється раз на 150мс, що дозволяє уникнути проблем характерних для умовно детермінованих середовищ, а саме невідповідності розташування об'єктів нанесених на карту місцевості їх фактичного просторового розташування.

Формування робочої карти місцевості засноване на тривимірній статичній карті робочого простору, яка записана в систему на етапі впровадження. Перешкоди, до яких належать будь-які об'єкти, що знаходяться в робочій зоні (співробітники складу або інші складські мобільні роботи), наносяться на робочу картку в режимі реального часу. Виявлення перешкод здійснюється:

- по-перше, стаціонарною підстелевою системою стеження;
- по-друге, бортовою системою датчиків зовнішньої інформації.

Система управління «верхнього рівня» GLV – Global Live View здійснює:

- розподіл транспортних завдань між складськими мобільними роботами;
- управління взаємодією між складськими мобільними роботами в робочому просторі;
- накопичення та обробку даних про стан робочого простору;
- формування динамічної 3-мірної карти робочого простору.

На підставі отриманої 3-мірної карти місцевості система PAN-Robots

здійснює формування координатної сітки, що описує поточний стан робочої зони складського мобільного робота. Слід зазначити, що зараз робототехнічний комплекс PAN-Robots функціонує у демонстраційному режимі та перебуває у стадії контрольних випробувань. Серійний випуск системи намічено на 2030 рік. Крім цього в 2020 році ще кілька компаній анонсували подібні PAN-Robots робототехнічні комплекси для автоматизації складської логістики. Це китайська компанія IKV Robot. Зображення аналога виробництва КНР наведено на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 – Складський мобільний робот логістичного комплексу виробництва IKV Robot – КНР

Одним із ключових завдань розробки перспективних логістичних робототехнічних комплексів є делегування завдання планування маршруту складського мобільного робота, що дозволяє суттєво спростити впровадження робототехнічних комплексів на існуючих логістичних підприємствах. Вибір методу формування маршруту складського мобільного робота передбачає наявність хоча б базової інформації про робочу зону, в якій функціонуватиме складський мобільний робот, конструкції шасі самого

складського мобільного робота, його технічне оснащення, а також інформації про тип вантажів, що переміщуються.

## 1.2 Опис логістичного мобільного робота

Об'єктом комп'ютеризації у кваліфікаційній роботі є складське приміщення класу А+ за класифікацією Knight Frank. Склад являє собою умовно детерміноване середовище, обладнане обчислювальною системою верхнього рівня, що здійснює постановку завдань для складського мобільного робота, а також системою контролю за переміщенням об'єктів по території робочої зони, аналогічну системі стельових лазерних сканерів системи PAN-Robots. Територія складу, на якій здійснюється транспортування вантажів, є критою, захищеною від впливів навколишнього середовища, та забезпечена системою, що підтримує постійну температуру, що відповідає нормальним умовам. Транспортування здійснюється на площині у межах одного поверху. Поверхня переміщення являє собою рівну бетонну підлогу (або інше покриття, що припускає, що рух коліс навантажувача відбувається без прослизання).

Складський мобільний робот реалізований у вигляді чотириколісної мобільної платформи, трансмісія якої має чотириколісну автомобільну компоновку, тобто керуюча пара коліс являє собою симетричні поворотні модулі, що вільно котяться. Задні колеса виконані у вигляді симетричних неповоротних колісних модулів і є провідними. Колісний складський мобільний робот забезпечений системою датчиків зовнішньої інформації, аналогічно системі, застосованій у проекті PAN-Robots, тобто у будь-який момент часу системі управління доступні дані про перешкоди навколо нього, їх клас, геометрію, орієнтацію в просторі, швидкість і напрямок руху. Крім цього, бортова обчислювальна система складського мобільного робота у будь-який момент часу має інформацію про власне просторове розташування щодо глобальної системи координат складу. Під час руху швидкість

колісного складського мобільного робота не перевищує 1,5 м/с, колеса транспортера рухаються поверхнею переміщення без прослизання. Мобільна платформа має електричну силову установку і оснащена виконавчою системою, здатною приймати цифровий сигнал і перетворювати його в кут повороту коліс, що управляють напрямом руху. Крім мобільної платформи у складі складського мобільного робота входить пристрій, що дозволяє здійснювати завантаження і розвантаження транспортера в автоматичному режимі.

Система «відчуття» складського мобільного робота має дворівневу реалізацію, схема якої аналогічна застосованій у проекті PAN-Robots. Система управління верхнього рівня виконує функції об'єктивного контролю просторового розташування складського мобільного робота та диспетчера транспортних завдань. Оснащена стельовими лазерними сканерами, що здійснюють збір інформації про зміну геометрії робочого простору, в якому функціонує складський мобільний робот. Як стельові сканери можуть бути використані сканери FARO FOCUS S350, виробництва компанії FARO. Програмний інтерфейс датчиків API може бути реалізований у вигляді програмного модуля FARO SCENE, що забезпечує системну інтеграцію сканерів в інфраструктуру складського мобільного робота, а також попередню обробку отриманих даних. На підставі даних, отриманих зі сканерів, формується карта робочої зони. Кінцева реалізація може бути зроблена за допомогою програмного пакету Origin, який має необхідний набір інструментів, що дозволяє працювати у фоновому режимі, і добре задокументований програмний інтерфейс. Система «відчуття» складського мобільного робота є гібридною і складається з масиву лазерних далекомірів, що формують масив даних про дистанції до потенційних перешкод, в якості яких можуть бути використані далекоміри Scanse Sweep LIDAR, виробництва компанії Scanse, по системній інтеграції. Корекція отриманих даних про перешкоди, що оточують складський мобільний робот, здійснюється за допомогою стереокамер, забезпечених оптикою Zemax за участю компанії

SICK. В якості стереокамер у проекті застосовані камери 3D-A5000, виробництва Cognex на базі програмного забезпечення VisionPro. Реалізація системи розпізнавання образів та обчислення колізій може бути виконана за допомогою програмного забезпечення Zemax OpticStudio.

Передбачається, що об'єкти складування являють собою матеріали, конструкційні елементи та об'єкти готової продукції фірм, що не потребують особливих умов транспортування. Тобто вони не належать до класів прецизійних механізмів, легкозаймистих, вибухових речовин. Таким чином, вважається, що обмеження, пов'язані з лінійними та бічними прискореннями при переміщенні вантажів, відсутні. Також вважається, що при переміщенні вантаж знаходиться на палеті, габарити вантажу за довжиною та шириною не перевищують розмірів палети. Вага вантажу не перевищує 2000 кг.

## 2 ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ СКЛАДСЬКОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

На даний момент у науковій літературі описано безліч методів планування маршруту складського мобільного робота, які реалізують різні підходи, що є наслідком конкретного застосування складського мобільного робота. Фактично, кожна окрема група методів планування маршруту складського мобільного робота є окремою темою для самостійного дослідження. Це завдання лежить далеко за рамками кваліфікаційної роботи, тому обмежимося короткою класифікацією найпоширеніших методів планування маршруту складського мобільного робота. На рисунку 2.1 наведено класифікацію груп методів планування маршруту для складського мобільного робота, що найбільш часто зустрічаються.

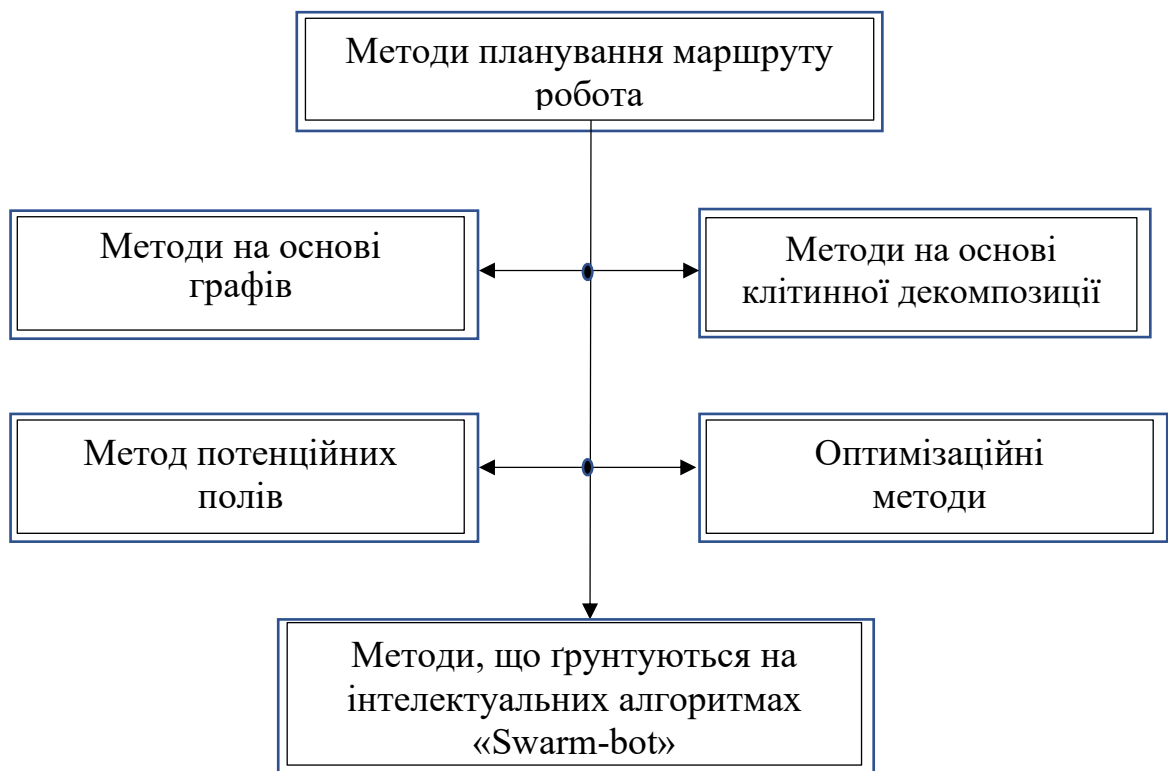


Рисунок 2.1 – Класифікація методів планування маршруту для складського мобільного робота

Слід зазначити, що результатом переважної більшості методів є послідовність опорних точок, що визначають просторове розташування складського мобільного робота на маршруті, що призводить до необхідності згладжування маршруту. Зауважимо, що метод сіток, який відноситься до методів на основі клітинної декомпозиції, використано для реалізації планування маршрутів складського мобільного робота в логістичних центрах компанії Ocado.

## 2.1 Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі графів

Широко поширені методи цього типу показані на рисунку 2.2.

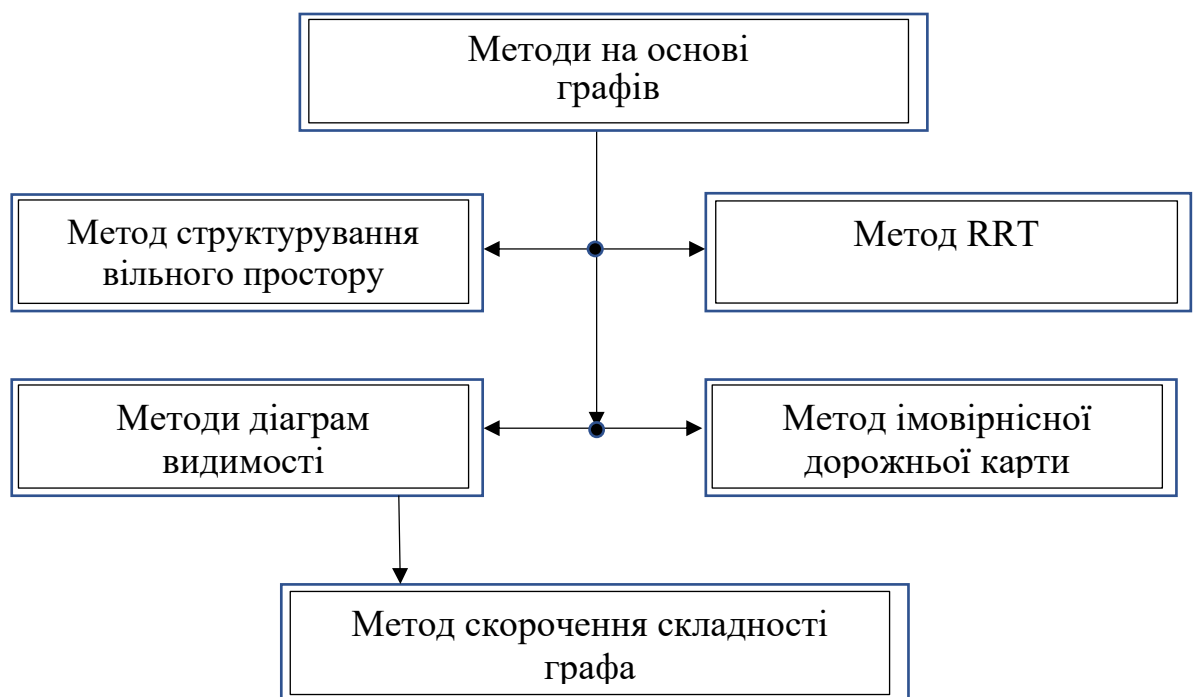


Рисунок 2.2 – Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі графів

В даний час методи планування маршруту на основі графів поділяються на:

- методи діаграм видимості;

- методи структурування вільного простору (та їх різновид – діаграми Воронова);
- метод ймовірнісної дорожньої карти
- методи швидко досліджуваних випадкових дерев (RRT методи).

Методи на основі графів характерні для планування маршруту в детермінованих середовищах (зокрема, вони використовуються для планування руху складського мобільного робота в логістичних центрах складського мобільного робота Amazon Robotics).

## 2.2 Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі клітинної декомпозиції

У основі цієї групи методів лежить ідея дискретизації робочої зони складського мобільного робота. Класифікація методів на основі клітинної декомпозиції наведена на рисунку 2.3.

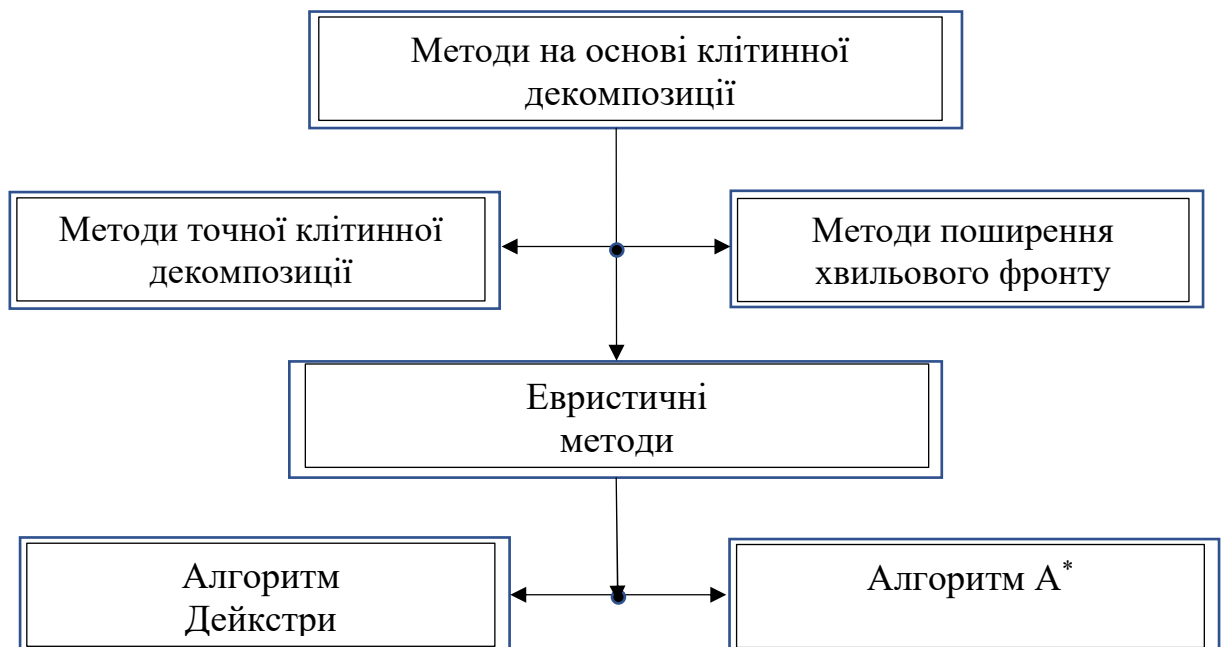


Рисунок 2.3 – Методи планування маршруту робота на основі клітинної декомпозиції

До методів клітинної декомпозиції належать:

- точна клітинна декомпозиція;
- метод поширення хвильового фронту;
- евристичні методи.

### 2.3 Методи планування маршруту складського мобільного робота на основі потенційних полів

Загальна ідея цієї групи методів у тому, що складський мобільний робот переміщається вздовж векторних ліній векторного поля, потенційна функція якого відбиває форму перешкод і задане просторове розташування. Класифікація методів потенційних полів наведена на рисунку 2.4.

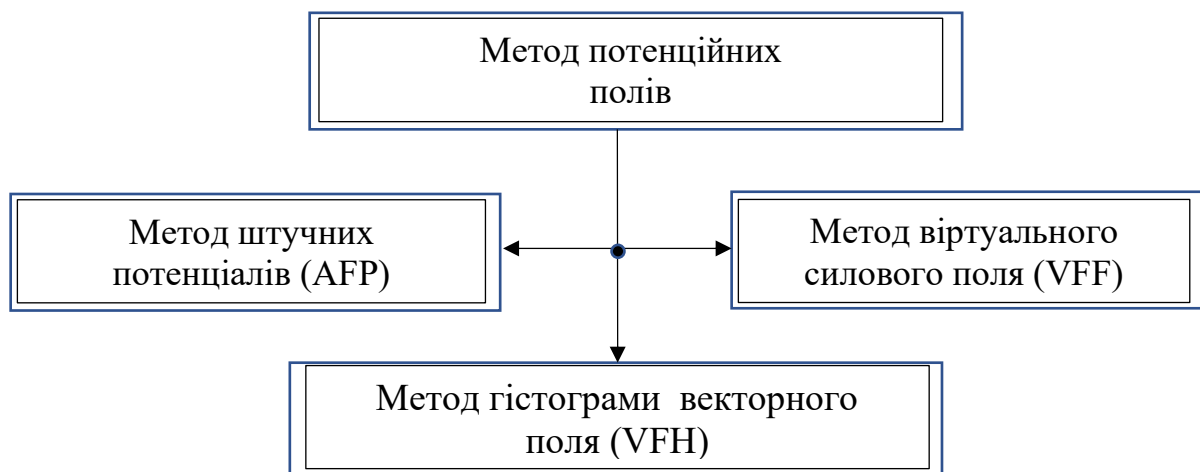


Рисунок 2.4 – Класифікація методів планування маршруту робота на основі потенційних полів

- До цієї групи методів відносяться^
- метод штучних потенціалів;
- метод віртуального силового поля;
- метод гістограми векторного поля.

Незважаючи на те, що дана група методів є однією з найпопулярніших при плануванні локального маршруту складського мобільного робота, проте всі методи цієї групи мають істотний недолік, а саме – можливе існування локальних мінімумів. І незважаючи на те, що в пізніших варіаціях зроблено спробу усунення цього недоліку, цілком задовільного рішення поки не знайдено.

#### 2.4 Методи планування маршруту робота на основі оптимізаційних методів

Задача планування маршруту складського мобільного робота може вирішуватися як завдання оптимального керування. При цьому рух складського мобільного робота необхідно представити у вигляді динамічної системи. Перешкоди описуються як обмеження, а допустима траєкторія оцінюється деякою цільовою функцією. Як правило, при плануванні маршруту складського мобільного робота, пряме завдання оптимального управління зводиться до дискретного завдання нелінійного програмування. Класифікацію оптимізаційних методів наведено на рисунку 2.5.

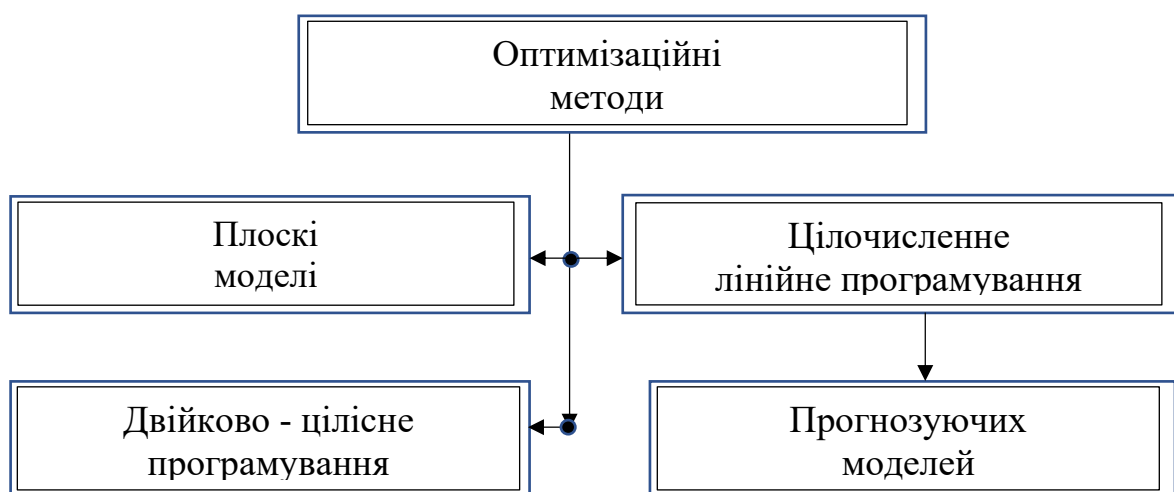


Рисунок 2.5 – Оптимізаційні методи планування маршруту робота

До найпоширеніших підходів до планування маршруту складського мобільного робота як до задачі оптимального управління належать:

- пласкі моделі;
- змішане цілочисленне лінійне програмування;
- двійково-цілочисленне програмування.

Дана група алгоритмів планування маршруту «Swarm-bot» є однією з найбільш універсальних і підходить для вирішення найширшого кола завдань. Однак при цьому реалізація оптимізаційних методів «у залізі» є вкрай трудомістким завданням.

## 2.5 Методи планування маршруту робота на основі інтелектуальних методів

Це алгоритми, які:

- імітують процеси, що протікають у живій природі;
- імітують поведінку біологічних істот;
- імітують мислення людини чи поведінку біологічних угруповань.

Насправді до цієї групи належить безліч алгоритмів, описаних у літературі. На рисунку 2.6 наведено ті алгоритми, які набули широкого поширення під час планування маршруту робота.

До цієї групи алгоритмів планування маршруту «Swarm-bot» належать:

- мурашиний алгоритм, який зазвичай застосовується для планування маршруту на основі карти або графа;
- штучна нейронна мережа, яка використовується у задачах адаптивного керування рухом «Swarm-bot»;
- метод рою частинок (МРЧ), характерний для формування маршрутів drones;
- реактивні методи, що імітують поведінкові реакції живих організмів.

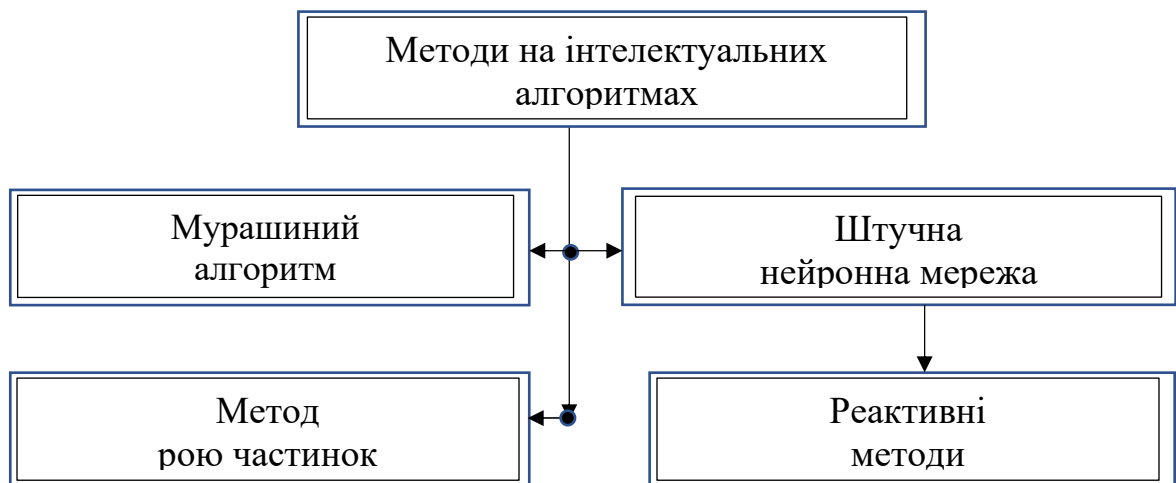


Рисунок 2.6 – Інтелектуальні алгоритми планування маршруту робота

Підсумовуючи під наведеною класифікацією, слід сказати, що методи на основі графів мають просту машинну реалізацію, проте добре працюють тільки в детермінованих середовищах, хоча деякі з них можуть бути модифіковані для використання в середовищах з динамічними перешкодами. Так як граф будується по опорних точках, то отриманий маршрут завжди потребує подальшого згладжування.

Основною перевагою групи методів на основі потенційних полів є простота реалізації і малий час розрахунку, що спричинило його широке поширення в задачах планування локальних маршрутів робота, проте до його недоліків слід віднести наявність локальних мінімумів, в які може потрапити робот в кінцевому рахунку не досягнувши заданого просторового розташування.

Оптимізаційні методи дозволяють вирішувати завдання з урахуванням найскладніших обмежень, при цьому дозволяють вводити додаткові обмеження спрямовані, наприклад, на забезпечення безпеки руху і в принципі є найбільш універсальним інструментом планування маршрутів для робота, але при цьому мало придатні для використання в системах реального часу, так як у більшості випадків вимагають якісно іншого рівня (порівняно з іншими методами) деталізації моделі, що призводить до уповільнення

процесу обчислення маршруту. Методи, що ґрунтуються на інтелектуальних алгоритмах, як і оптимізаційні алгоритми, дозволяють вирішувати завдання зі складними обмеженнями, але часто мають надто тривалий цикл планування. Такі методи найкраще застосовувати при первинному глобальному плануванні маршрутів.

Як правило, сучасні роботи використовують комбіновані алгоритми планування маршруту.

Наприклад, логістичні роботи PAN-Robots одночасно використовують:

- карту місцевості;
- штучну нейронну мережу;
- алгоритм типу Bug.

Роботи Osado одночасно застосовують:

- метод координатних сіток;
- метод рою частинок.

Такий підхід до планування маршруту дозволяє інтегрувати переваги різних методів та нівелювати їхні недоліки. Так, наприклад, поєднання локальних і глобальних методів планування дозволяє планувати глобальний маршрут на підставі конфігурації робочої зони, яка може бути постійною, а локальні методи дозволяти роботу маневрувати при виконанні завдання з метою уникнення зіткнень з рухомими перешкодами. Більшість методів планування маршруту у наведеній вище класифікації належить до методів глобального планування (крім методу потенційних полів). Розглянемо приклад альтернативного широко поширеного алгоритму локального планування маршруту робота Bug-алгоритм – один з найперших і широко поширених алгоритмів для розв’язання колізії робота і перешкоди. Головна ідея, яка покладена в основу алгоритму, ось у чому:

- від поточного просторового розташування до заданого просторового розташування робот прокладає прямий маршрут;

- робот рухається по ньому до тих пір, поки не «зіштовхується» з перешкодою.

На вхід системи, що реалізує Bug-алгоритм, надходить тільки інформація про стан простору безпосередньо навколо робота, а також інформація про задане просторове розташування. Алгоритм реалізує два режими руху:

- рух до заданого просторового розташування;
- обхід перешкод.

Варіації алгоритму різняться методом реалізації обходу перешкоди.

Режим № 1 Bug-алгоритма:

- крок № 1 – рух у напрямку заданого просторового розташування;
- крок № 2 – якщо зустрінуто перешкоду, відбувається обгинання її доти, доки робот не вийде в точку, найближчу до заданого просторового розташування;

- крок № 3 – продовження руху до заданого просторового розташування.

Режим № 2 Bug-алгоритма:

- крок № 1 – рух у напрямку заданого просторового розташування, фіксується нахил прямого маршруту;

- крок № 2 – якщо зустрінуто перешкоду, відбувається обгинання її доти, доки поточний нахил прямого маршруту не збігається із зафіксованим нахилом;

- крок № 3 – продовження руху до заданого просторового розташування.

## 2.6 Огляд максимально допустимої швидкості руху складського мобільного робота

Одним з найважливіших параметрів при проектуванні будь-якого робота є максимально допустима швидкість руху всередині робочої зони.

Тому що саме від бажаних швидкісних характеристик багато в чому залежить вибір конструкції шасі робота, а також вибір технічних рішень розробки системи планування маршруту і виконання завдання. Слід зазначити, що у разі логістичних складських мобільних роботів максимально допустима швидкість руху в робочій зоні залежить не так від технічних можливостей мобільної платформи, як від нормативно-правової бази, що регламентує швидкісні режими на території логістичних центрів. Тож якщо розглядати існуючі моделі логістичних роботів, можна бачити, що максимальні швидкості руху закладені різними виробниками приблизно однакові, що проілюстровано на рисунку 2.7.

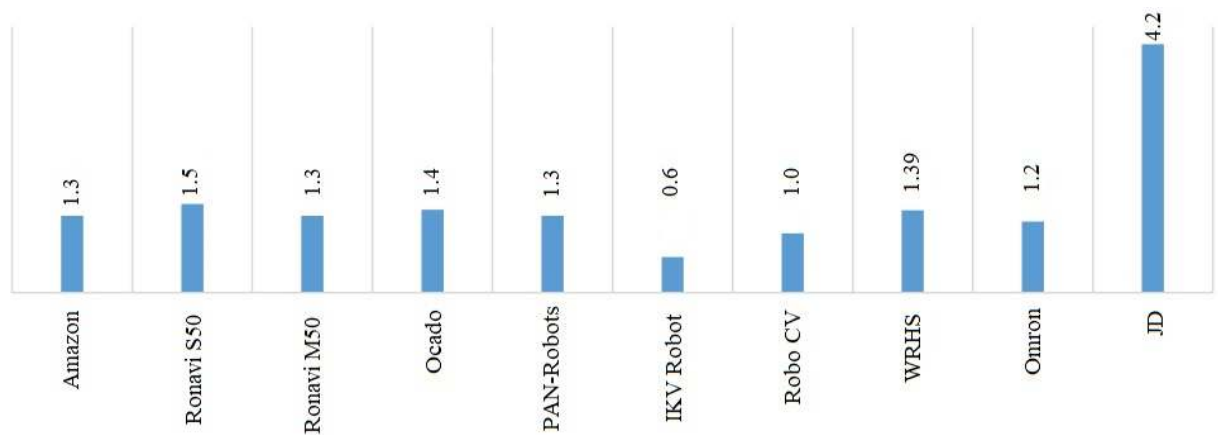


Рисунок 2.7 – Максимальні швидкості, що розвиваються логістичними роботами різних виробників, одиниця виміру м/с

Що насамперед обумовлено міжнародними правилами експлуатації навантажувачів на території логістичних центрів? Так як об'єкт автоматизації з юридичної точки зору класифікується як «логістичний центр», то, принаймні до внесення змін до нормативно-правової бази, розробка більш швидкісних моделей логістичних роботів є недоцільною.

Це з одного боку (економічного) є негативним фактором, що визначає «стелю» пропускної спроможності логістичного центру. З іншого боку (технічного) дані швидкісні обмеження дозволяють спростити процес проектування логістичних роботів. Так як при русі з малими швидкостями можна без втрати практичної цінності отриманого результату застосовувати прості кінематичні моделі під час проектування системи управління рухом робота.

## 2.7 Аналіз кінематики повороту чотириколісного транспортного засобу

Транспортні засоби, що мають автомобільну кінематичну схему, незалежно від функціонального призначення, для маневрування в переважній більшості випадків використовують рульове управління, конструкція якого заснована на принципі Аккермана, детально описаному в класичних роботах присвячених конструкції чотириколісних транспортних засобів. Кермо Аккермана в ряді класичних джерел Жанто має конструкцію, показану на рисунку 2.8.

Принцип Аккермана полягає в нерівномірності кутового переміщення керуючих коліс (рисунок 2.8), що обумовлено встановленням рульового важеля під кутом до поздовжньої осі транспортного засобу. Причому, кутове неузгодження між керуючими колесами є наростаючим. Шарнір кермового важеля транспортного засобу (рисунок 2.9) знаходиться на колі, яке буде описувати точка В при повороті керованого колеса. Розузгодження кутів відхилення керуючих коліс дозволяє одержати паралельне розташування слідів коліс як за прямолінійного руху транспортного засобу, так і під час виконання повороту.

На рисунку 2.10 та рисунку 2.11 показано переміщення рульового важеля при обертанні рульового колеса.

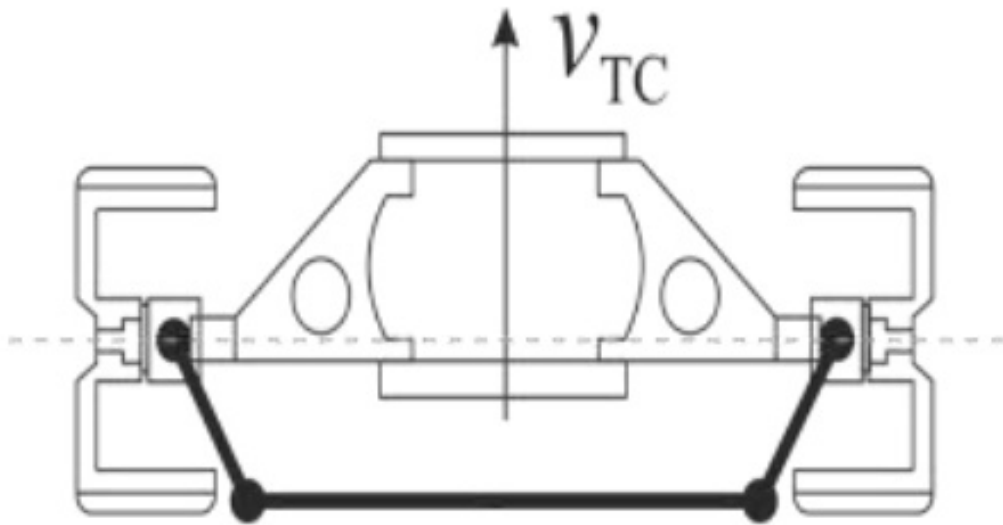


Рисунок 2.8 – Конструкція кермового управління Акермана за джерелами Жанто. Колеса транспортного засобу розташовані прямо

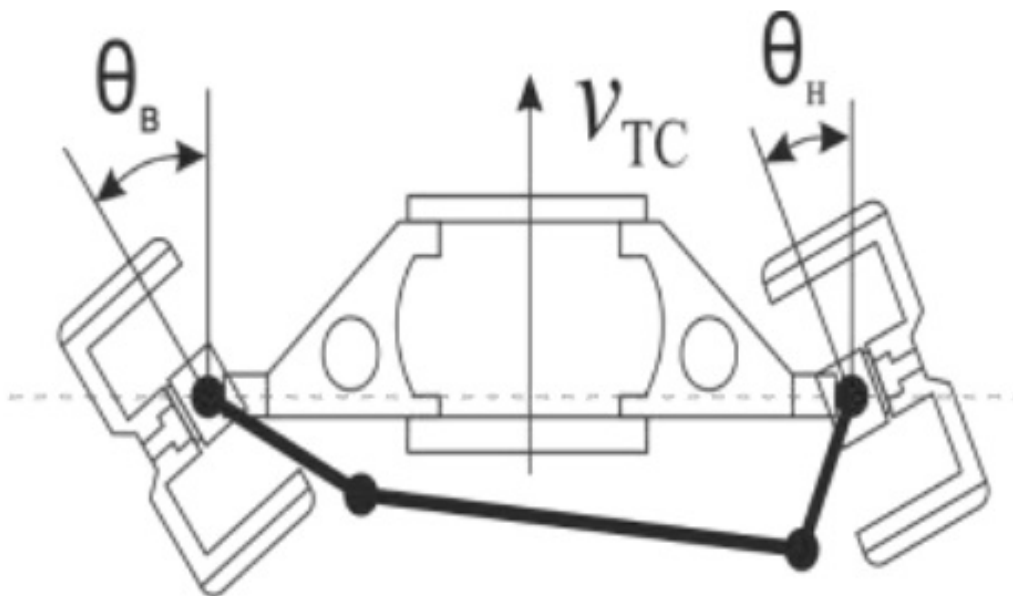


Рисунок 2.9 – Конструкція кермового управління Акермана за джерелами Жанто. Положення коліс транспортного засобу під час повороту вліво

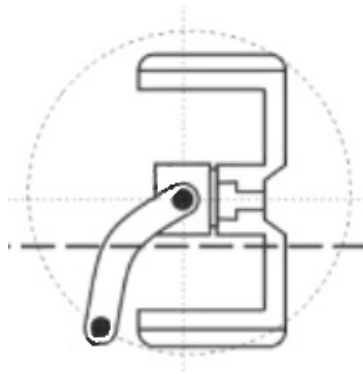


Рисунок 2.10 – Переміщення кермового важеля при обертанні кермового колеса. Колесо транспортного засобу розташоване прямо

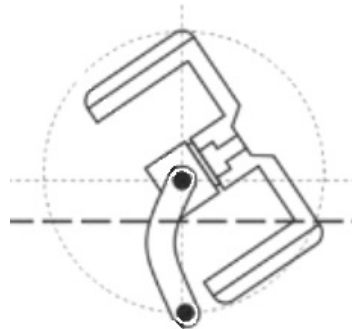


Рисунок 2.11 – Переміщення кермового важеля при обертанні кермового колеса. Колесо транспортного засобу повернуто вліво

Таким чином, при точному куті Аккермана, площини обертань обох передніх коліс належать дотичним, побудованим у центральних точках плям контакту передніх керованих коліс з поверхнею переміщення.

Розглянемо поворот транспортного засобу без урахування бічного уводу. Вважатимемо, що бічне ковзання коліс при виконанні повороту відсутнє. В цьому випадку вектори швидкостей центрів всіх коліс повинні лежати в площинах їх обертання. Отже, керовані колеса необхідно повернути на такі кути, при яких перпендикуляри до площин обертання коліс перетнуться в одній точці – миттєвому центрі швидкостей. Цю точку називають миттєвим центром повороту.

На рисунку 2.12 показано схему повороту транспортного засобу при коченні коліс без бокового відведення. Миттєвий центр повороту знаходиться в точці  $O$  на продовженні осі коліс, що не керуються. Радіусом повороту транспортного засобу (РП) – називається відстань від миттєвого центру повороту  $O$  до поздовжньої осі транспортного засобу, позначеної  $AB$ .

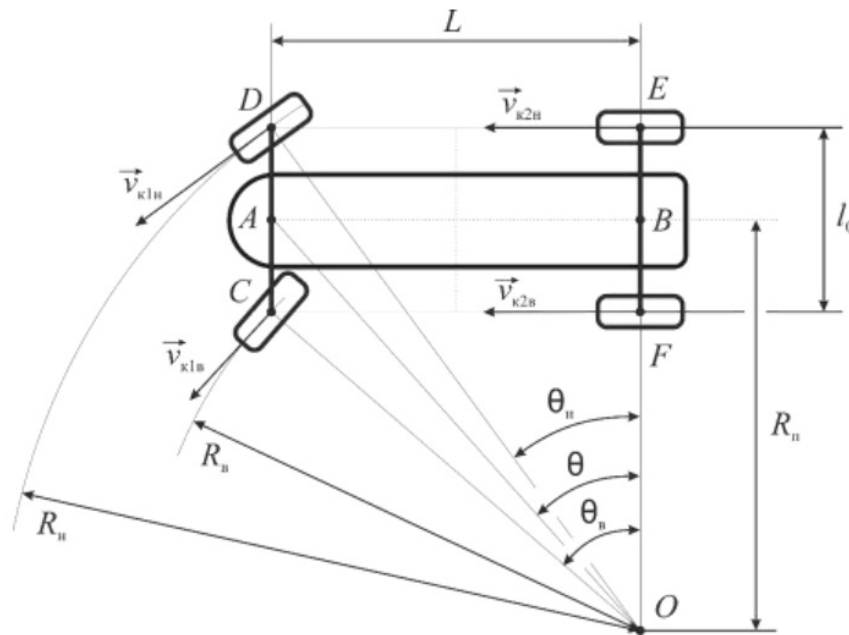


Рисунок 2.12 – Схема повороту транспортного засобу під час кочення коліс без бокового уводу

При зміні кутів повороту в досить широкі межі (для сучасних транспортних засобів максимальні кути повороту коліс досягають  $350 - 460^\circ$ ) класична конструкція кермової трапеції Аккермана Жанто не забезпечує точного виконання умови Аккермана, що компенсується за рахунок:

- зміни кута нахилу важелів керуючих коліс стосовно поздовжньої осі транспортного засобу;
- бічної деформації шин, а також їх бокового ковзання при виконанні повороту.

Таким чином, при проектуванні сучасних транспортних засобів кути нахилу поворотних важелів вибирають таким чином, щоб у положенні кермової трапеції, що відповідає руху транспортного засобу по прямій, осьові лінії важелів перетиналися в деякій точці E, розташованій всередині корпусу транспортного засобу.



$\theta_B$  та  $\theta_H$  – кут повороту керованих коліс внутрішнього та зовнішнього відповідно, які визначаються з урахуванням положення миттєвого центру швидкостей  $O$ . Рульова трапеція Жанто із достатнім ступенем точності забезпечує реалізацію принципу Аккермана.

Таким чином коло радіусом  $R_{\Pi}$  буде відповідати траєкторії руху центру мас складського мобільного робота:

$$R_{\Pi} = \sqrt{a^2 + L^2 \operatorname{ctg}^2 \theta}, \quad (3.1)$$

де  $\theta$  – є кутом, еквівалентному куту повороту двоколісної моделі, що має базу  $L$  і здійснює рух по колу радіусу  $R_{\Pi}$ .

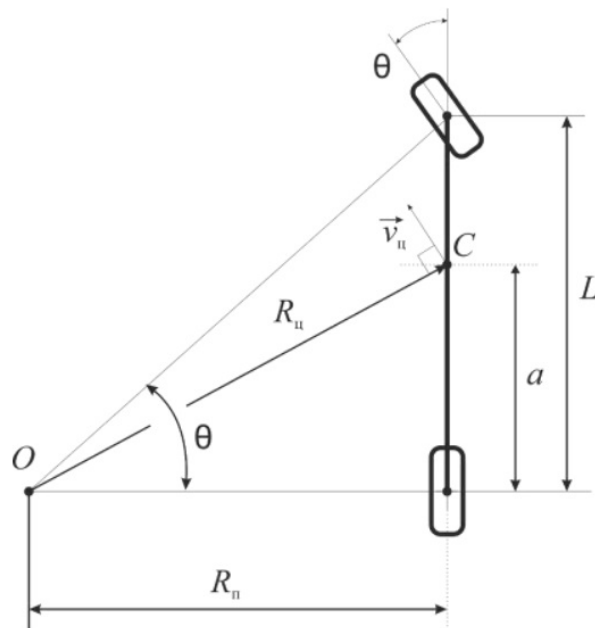


Рисунок 3.2 – Двоколісна модель складського мобільного робота

Приймемо  $\theta$  як параметр управління та введемо його в натуральне рівняння руху центру мас складського мобільного робота:

$$k = k(s), \quad (3.2)$$

де

$$k(s) = \frac{1}{R_{ц}}, \quad (3.3)$$

Таким чином із (3.1) можна знайти закон управління рухом складським мобільним роботом по заданій траєкторії:

$$\theta = \frac{k(s)}{|k(s)|} \operatorname{arccctg} \sqrt{\frac{\frac{1}{k^2(s)} - a^2}{L^2}}, \quad (3.4)$$

Закон зміни кутів повороту передніх коліс складського мобільного робота визначається як:

$$\operatorname{ctg} \theta_B = \operatorname{ctg} \theta - \frac{l_0}{2L}, \quad (3.5)$$

$$\operatorname{ctg} \theta_H = \operatorname{ctg} \theta + \frac{l_0}{2L}, \quad (3.6)$$

Наступним етапом управління рухом складським мобільним роботом по заданій траєкторії є визначення типу кривих, які будуть використовуватися як опорні траєкторії. Причому обраний тип кривих повинен забезпечувати можливість передбачуваного маніпулювання результуючої кривої та легко піддаватися машинній обробці.

У кваліфікаційній роботі в результаті проведеного огляду та аналізу вибір був зроблений на користь кривих Безье. Тому як потенційні опорні траєкторії розглядаються криві Безье. Це зумовлено тим, що кінцева форма

кривої Безьє залежить тільки від взаємного розташування вершин опорного багатокутника (впливає з їхньої математичної основи – базису Бернштейна, що дозволяє легко керувати формою кривої, а також забезпечує передбачуваність зміни її форми). Таким чином, завдання планування опорної кривої зводиться до визначення координат вершин опорного багатокутника, при яких отримана крива задовольнятиме необхідним умовам, накладеним на опорну траєкторію.

Математичне параметричне подання кривої Безьє має вигляд:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t), \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (3.7)$$

де  $B_i$  –  $i$ -й вертекс полігону,  $J_{n,i}$  – базис Безьє або Бернштейна, або функція апроксимації.

В якості опорних кривих будемо використовувати криві Безьє третього порядку, що обумовлено геометрією траєкторій руху чотириколісного мобільного робота. У разі генерації опорної траєкторії, що визначає маршрут складського мобільного робота, доводиться мати справу не з однією кривою, а здійснювати вибір найбільш підходящої кривої з деякого сімейства кривих, кожна з яких визначена чотирма точками, заданими на деякій множині точок. Визначення найкращої альтернативи будемо здійснювати з міркувань відповідності кривої заданим обмеженням, а також загальної довжини кривої, від якої залежить час виконання завдання. Звідки впливає, що нам знадобиться легко реалізований з програмного погляду спосіб оцінки довжини кривої.

У більшості випадків задача виконання завдання складським мобільним роботом розглядається як задача оптимального управління, рішення якої здійснюється за допомогою складних динамічних моделей, що визначають зв'язки між центром мас, програмною траєкторією руху і кутом

повороту керуючих коліс. Однак у рамках цього дослідження застосовано інший підхід, основними відмінностями якого є:

- по-перше, використання простого геометричного уявлення мобільної платформи як об'єкта управління;
- по-друге, базисна точка системи координат мобільної платформи.

У разі класичного підходу, базисна точка мобільної платформи, як правило, збігається із положенням центру мас робота. В даному випадку вона зміщена і прив'язана до точки торкання неповоротного колісного модуля поверхні переміщення. Це дозволяє повною мірою використовувати переваги, зумовлені особливостями конструкції чотириколісних мобільних роботів із автомобільною кінематичною схемою.

### 3.2 Пошук опорної траєкторії та уникнення зіткнення з перешкодою при русі складського мобільного робота

Експериментальна перевірка математичної моделі управління рухом робота виконувалася за допомогою середовища моделювання MATLAB, що зумовлено його функціональністю. Так як мобільна платформа має автомобільну кінематичну схему, то вибір схеми маневрування здійснювався з переліку типових маневрів, характерних для легкових автомобілів з однією парою колес, що управляють. Схема маневру зображена на рисунку 3.1.

Через особливості типу кривих, обраних як опорних траєкторій, ми маємо можливість спланувати опорну траєкторію для маневру такого типу цілком, тобто маневрування має здійснюватися за два кроки:

- крок № 1. Спочатку необхідно уникнути зіткнення (рисунок 3.1), ділянка  $A_1$ .
- крок № 2. Потім виконати повернення до колишньої траєкторії, ділянка  $A_2$ .

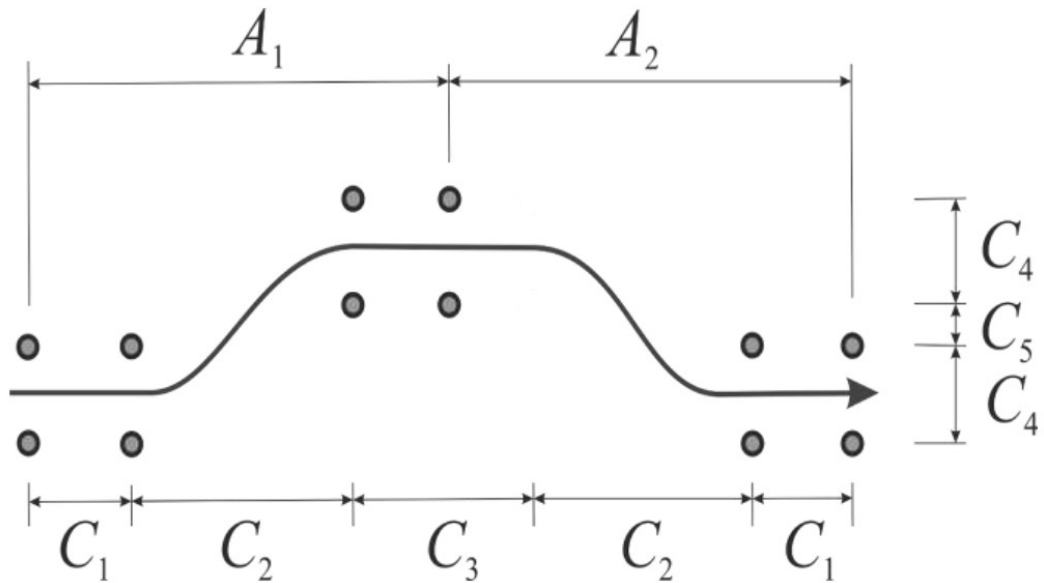


Рисунок 3.3 – Схематичне уявлення маневру під час руху робота

З міркувань лаконічності представлено трасування експерименту тільки для ділянки  $A_1$ . Спеціально зазначимо, що на момент початку пошуку нам відомо, що найкраща крива для даних умов має наступні координати вершин опорного багатокутника:  $V_0[0;20]$ ,  $V_1[17.8;20]$ ,  $V_2[16.6;0]$ ,  $V_3[60;0]$ . Цю криву за умовою експерименту вважатимемо еталонною. Вхідні дані, використані в процесі пошуку кривої опорної траєкторії, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для пошуку опорної траєкторії

$b_{1x}, b_{2x}, \text{ м}$	$d$	$p$	$v, \text{ м/с}$	$r, \text{ min}$	$\Delta r, \text{ м}$
$[0; 20]$	100	$10^{-3}$	2,777	20	2

Позначення у таблиці 3.1 наступні:

$b_{1x}, b_{2x}$  – інтервал, на якому здійснюється пошук координат  $x$  точок опорного багатокутника опорної кривої траєкторії;

$d$  – кількість кроків алгоритму ( $\Delta x = L/d = 0,2$ );

$p$  – точність машинних обчислень;

$v$  – швидкість руху робота;

$r_{\min}$  – мінімальний радіус розвороту мобільної платформи;

$\Delta r$  – радіус буферної зони.

При впровадженні систем управління рухом колісних роботів на етапі випробувань, як правило, спостерігається ефект «нишпорення» при відпрацюванні пролітних точок виконуваного завдання в момент зміни поперечних по відношенню до напрямку руху прискорень, обумовлений силами реакції, що діють на робота в момент зміни напрямку руху. Так як «нишпорення» – безперервні, незначні кутові відхилення в той і інший бік від основного напрямку руху робота, такий ефект негативно впливає на таку експлуатаційну характеристику мобільної платформи як «плавність ходу», яка у свою чергу відіграє важливу роль при транспортуванні вантажів по території логістичного центру.

Існують різні методи, спрямовані на зниження таких відхилень, зокрема за рахунок модифікації пристрою підвіски транспортного засобу. Однак, якщо управляючі впливу є дискретними, то істотного зниження даного ефекту за рівних інших умов можна досягти за рахунок коригування величини кутів одноразового відхилення управляючих коліс мобільної платформи від його поздовжньої осі.

Отже, регулюючи кількість пролітних точок завдання робота (кількість виданих управляючих на виконавчі вузли системи управління напрямом руху) протягом одного циклу управління, можна досягти зміни плавності ходу.

Для визначення залежності розглянутого типу відхилень, від кількості впливів, що управляли, була проведена серія експериментів.

Результати усереднених значень відхилень зведені у таблиці 3.2., на основі якої побудовано графік, що відображає залежність «плавності» ходу мобільної платформи від кількості пролітних точок у завданні (рисунок 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати моделювання

Кількість керуючих впливів	25	37	50	75	87	100	150	175	200
Відхилення в м, $10^{-3}$	4,47	4,22	3,24	1,44	1,36	1,52	2,56	2,82	2,87

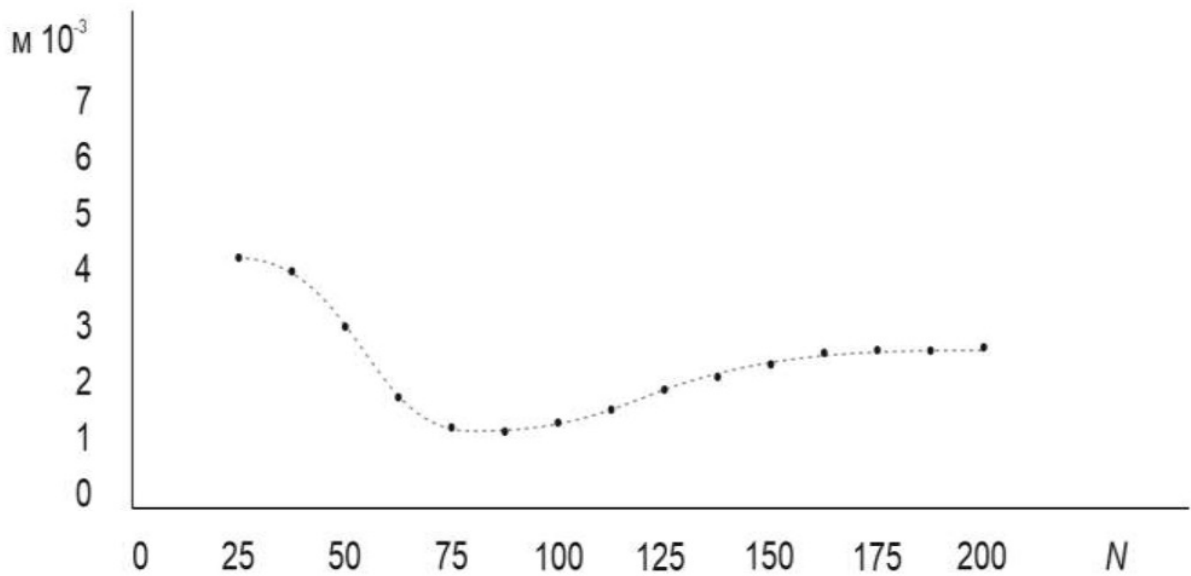


Рисунок 3.4 – Графік, що відображає залежність «плавності» ходу мобільної платформи від кількості прольотних точок

Проаналізувавши отриманий графік можна зробити такі висновки:

- зі збільшенням кількості управляючих впливів, значення відхилень спочатку різко знижуються;
- потім спостерігається полого ділянка, на якій відхилення наближаються до значень люфтів у підвісці мобільної платформи;
- при подальшому збільшенні кількості керуючих впливів значення відхилення починають зростати, що пов'язано з надмірною кількістю керуючих впливів, що викликає «підстрибування» в системі.

З графіка випливає висновок, що на етапі контрольних випробувань при впровадженні системи управління напрямом руху колісного робота на основі досліджуваної математичної моделі, доцільно встановити кількість керуючих впливів, що видаються на виконавчі вузли системи управління роботом в діапазоні від 75 до 100 в одиницю часу.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було досліджено математичну модель управління руху чотириколісним мобільним роботом, за допомогою якої вирішується наукове завдання, яке дозволяє скоротити тимчасові витрати на транспортування об'єктів зберігання територією логістичного центру за рахунок застосування мобільних колісних роботів-транспортів, що реалізують планування та виконання завдань за допомогою алгоритмів заснованих на методі опорних траєкторій та кривих Безьє третього порядку.

Встановлено зв'язок між траєкторією руху мобільного колісного робота та кривими Без'є третього порядку, обумовлений жорсткими механічними зв'язками, характерними для підвісок мобільних платформ, що реалізують чотириколісну кінематичну схему з автомобільним компонованням коліс. На підставі встановленого зв'язку розроблено алгоритм планування маршруту мобільного робота, особливістю якого є використання кривих Безьє третього порядку як опорну криву для побудови маршруту робота. Досліджено алгоритм вибору маршруту виконання завдань мобільним роботом, визначених кривими Безьє третього порядку. Особливість запропонованого алгоритму полягає у використанні еволюційних методів пошуку на заданій множині рішень.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер-сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. Пат. 118921 Україна, МПК Н04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
3. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.М. Мобільна система передачі даних на базі динамічно реконфігурованих мультикоптерних пристроїв / В.О. Радченко, В.В. Токарев, В.М. Ткачов // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
4. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації 0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. И. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.
5. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - P. 105-111.
6. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, W.

Nannan // The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.

7. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

8. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.

9. Krivoulya G., Tokariiev V., Iilina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Iilina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.197 - 201.

10. Krivoulya G., Tokariiev V., Iilina I., Lebediev O., Shcherbak V. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022). CEUR Workshop Proceedings., 12-13 may. 2022 y. - Gliwice, Poland. - P. 1531-1541.

11. Koshevoy N., Iilina I., Tokariiev V., Malkova A., Muratov V. Implementation Of The Gravity Search Method For Optimization By Cost Expenses Of Plans For Multifactorial Experiments // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. Vol. 1(105). - P. 23-32. Doi: 10.32620/reks.2023.1.02

(Scopus).

12. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Ільїна І.В., Кравець В.Є. Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі. // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2023. №1(71). - С.108-111. Doi: 10.26906/SUNZ.

13. Krivoulya G., Koshevoy N., Tokariiev V., Iliina I., Dubinsky D. Solving the Task of Topological Formation Intelligent Mobile «S-bots» for One «Swarm-bot» System // Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2023). CEUR Workshop Proceedings., 20-21 april. 2023 y. - Kharkiv, Ukraine. - pp. 273-282.

14. Лебедев О.Г., Злобін О.С. Математична модель управління рухом чотириколісним мобільним роботом / О.Г. Лебедев, О.С. Злобін // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 20 вер. 2023р. - Тернопіль: 2023. - випуск 80. - С.54 - 55.