

## ДОДАТОК А

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра ЕОМ

Математична модель управління рухом  
чотириколісного мобільного роботу

Кваліфікаційна робота  
Другий (магістерський) рівень

Автор:

Злобін О.С.  
студ. гр. СПм-22-1

Керівник:

Лебедєв О.Г.  
доц. каф. ЕОМ

2024

## МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

2

**МЕТОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ** є дослідження математичної моделі управління рухом чотириколісним мобільним роботом.

**ЗАВДАННЯ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ МЕТИ:**

- ❖ провести огляд логістичних складських мобільних роботів;
- ❖ провести огляд і класифікацію методів планування маршруту складського мобільного робота.

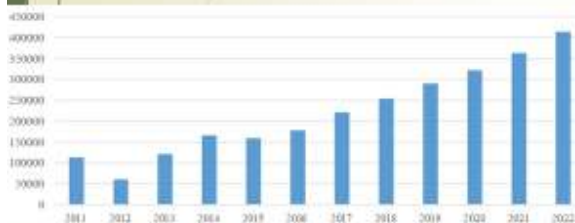
## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

3

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». 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.

## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

4

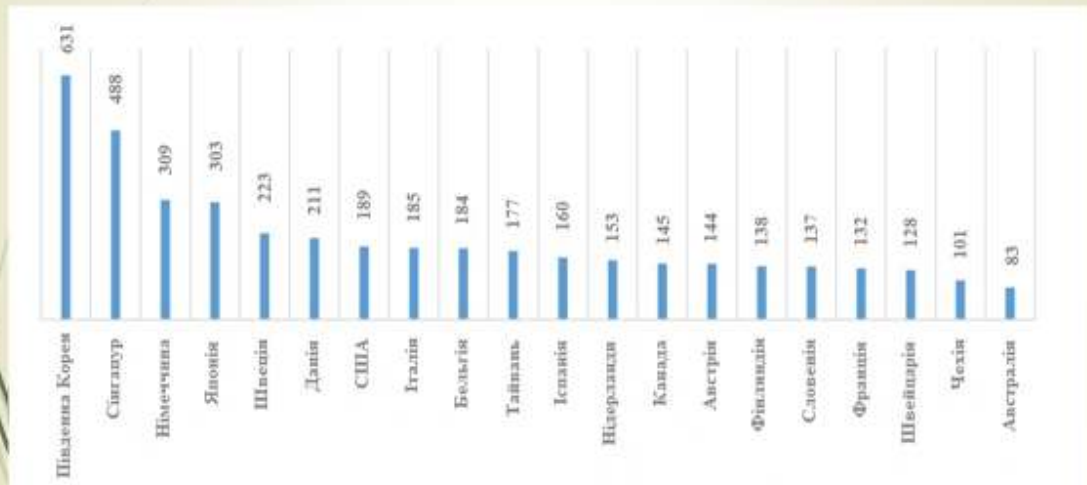


Впровадження робототехнічних комплексів на виробництві почалося з 1960-х років минулого століття з появою першого серійного промислового робота «Юнімейт», виробництва фірми «Юнімейшн». Процес роботизації набув масштабного характеру до середини 80-х років минулого століття і продовжується до теперішнього 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

## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

5

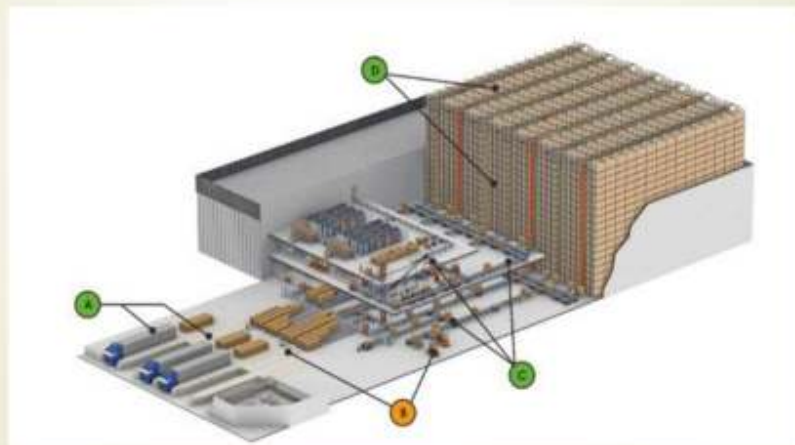
Кількість встановлених інтелектуальних мобільних роботів на 10000 робітників на 2022 рік



## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

6

ІТ-технології принципово змінили логістику. Будуються роботизовані склади, де немає навантажувачів, все комп'ютеризовано.



## ЛОГІСТИЧНІ СКЛАДСЬКІ МОБІЛЬНІ РОБОТИ

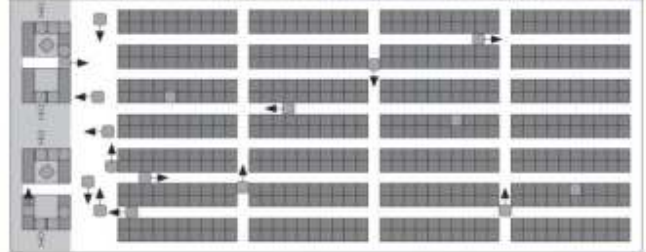
7

Лідуючі позиції виробництва логістичних складських мобільних роботів належить компанії Amazon Robotics

Складські мобільні роботи виробництва компанії Amazon Robotics



Схема взаємодії співробітників складу та складського мобільного робота Kiva Systems



Складський мобільний робот проекту PAN-Robots



## ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ СКЛАДСЬКОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

8

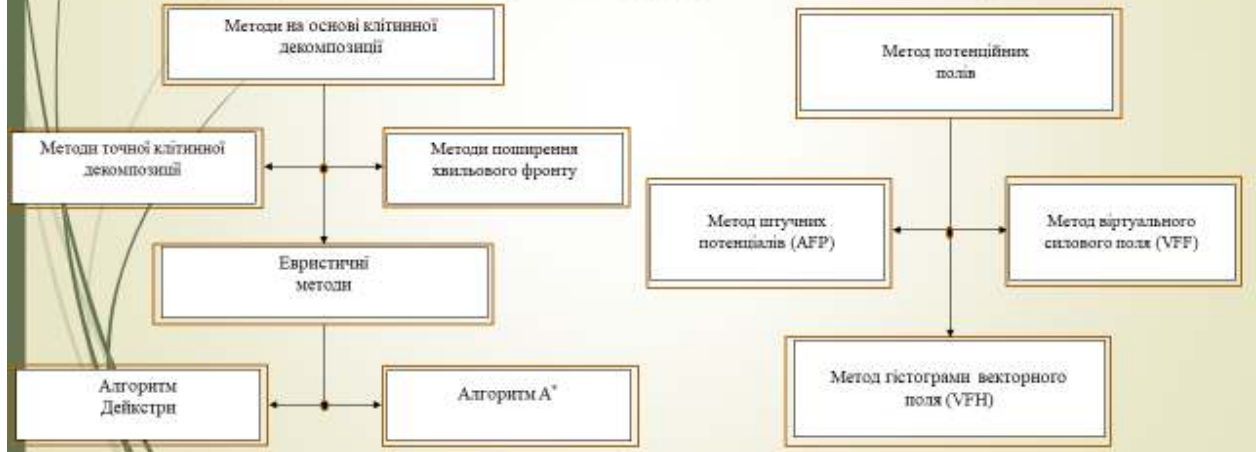
Фактично, кожна окрема група методів планування маршруту складського мобільного робота є окремою темою для самостійного дослідження. Це завдання лежить далеко за рамками кваліфікаційної роботи, тому обмежимося короткою класифікацією найпоширеніших методів планування маршруту складського мобільного робота.



## ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ СКЛАДСЬКОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

9

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.



## ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ СКЛАДСЬКОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

10

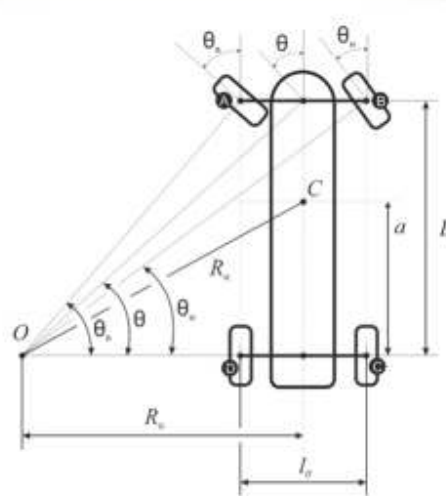
Фактично, кожна окрема група методів планування маршруту складського мобільного робота є окремою темою для самостійного дослідження. Це завдання лежить далеко за рамками кваліфікаційної роботи, тому обмежимося короткою класифікацією найпоширеніших методів планування маршруту складського мобільного робота.



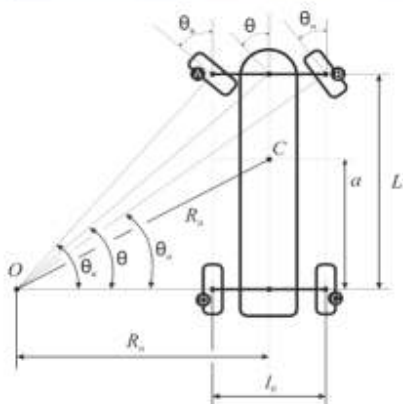
## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

11

Кінематична схема руху складського мобільного робота



Кінематична схема руху  
складського мобільного робота



## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

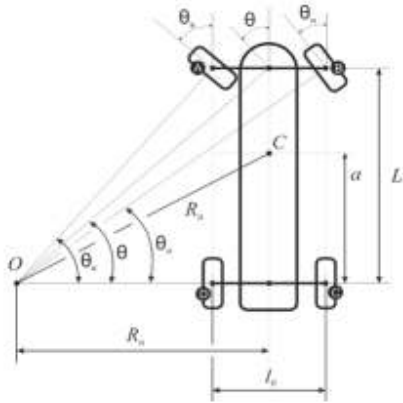
12

У кваліфікаційній роботі в результаті проведеного огляду та аналізу вибір був зроблений на користь кривих Безьє. Тому як потенційні опорні траєкторії розглядаються криві Безьє. 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.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

13

Кінематична схема руху  
складського мобільного робота



Математичне параметричне подання кривої Безьє має вигляд:

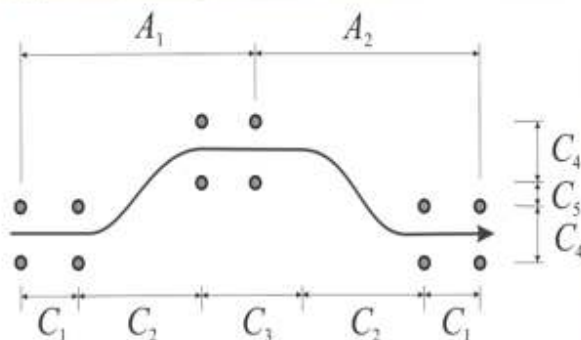
$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t), \quad 0 \leq t \leq 1$$

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

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

14

Експериментальна перевірка математичної моделі управління рухом робота виконувалася за допомогою середовища моделювання MATLAB, що зумовлено його функціональністю.



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, ділянка -  $A_1$ .
- крок № 2. Потім виконати повернення до колишньої траєкторії, ділянка -  $A_2$ .

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

15

Експериментальна перевірка математичної моделі управління рухом робота виконувалася за допомогою середовища моделювання MATLAB, що зумовлено його функціональністю.

Вхідні дані для пошуку опорної траєкторії

$b1x, b2x,$ 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 наступні:

$b1x, b2x$  – інтервал, на якому здійснюється пошук координат  $x$  точок опорного багатокутника опорної кривої траєкторії;

$d$  – кількість кроків алгоритму ( $\Delta x = L1/d = 0,2$ );

$p$  – точність машинних обчислень;

$v$  – швидкість руху робота;

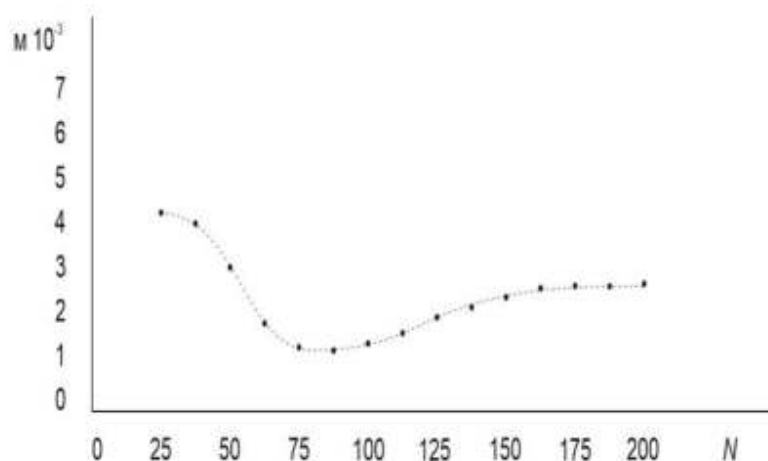
$r, \text{ min}$  – мінімальний радіус розвороту мобільної платформи;

$\Delta r$  – радіус буферної зони.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

16

Експериментальна перевірка математичної моделі управління рухом робота виконувалася за допомогою середовища моделювання MATLAB, що зумовлено його функціональністю.



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

## АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

17

www.konferenciaonline.org.ua

Міжнародна наукова  
інтернет-конференція

Інформаційне суспільство:  
технологічні, економічні  
та технічні аспекти становлення

Випуск 80

ISSN 2522-932X

Google Scholar

19-20 вересня 2023 р.

м. Тернопіль, Україна – м. Опольє, Польща  
2023

*Лебеда Олександр Григорович, кандидат технічних наук,  
доцент, Харківський національний  
університет радіоелектроніки, м. Харків  
ORCID: 0000-0001-5995-0136*

*Забонін Олександр Сергійович, магістр, Харківський національний  
університет радіоелектроніки, м. Харків*

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЧОТИРИКОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

Інтернет-адреса публікації на сайті:  
<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1264/>

При дослідженні руху мобільного робота в міських умовах, має вирішуватися завдання руху робота уздовж тротуару. В даному випадку, робот може орієнтуватися на тротуар, розташований по одну його сторону (праву або ліву), що дозволяє забезпечувати рух робота в міських умовах. Завдання ставиться так: робот має рухатися на заданій відстані від об'єкта – тротуару рис.1.



Рис.1. Приклад руху мобільного робота на заданій відстані від об'єкта – тротуару

Припускаємо, що абсолютна система координат розташована так, що вісь  $X_0$  паралельна тротуару, а сам тротуар являє собою послідовність відрізків, що лежать на одній прямій, розташований на вісі  $X_0$ . Таким чином, в даному моменті не розглядаються складні рухи робота, наприклад, повороти. У цьому випадку робот повинен рухатися прямою, розташованою на заданій відстані від тротуару. Такі завдання виникають часто при реалізації

54

## ВИСНОВКИ

18

**ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ була досліджена математична модель управління рухом чотириколісним мобільним роботом.**

### **В КВАЛІФІКАЦІЙНІЙ РОБОТІ ВИРШЕНІ ТАКІ ЗАДАЧІ:**

- ❖ проведено огляд логістичних складських мобільних роботів;
- ❖ проведено огляд і класифікація методів планування маршруту складського мобільного робота.