

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Дослідження та розробка методів планування траєкторії  
мобільних роботів»

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи КАМ-61

спеціальності 151 «Автоматизація

та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Дідур С.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Капаціла Ю.Б.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Козбур І.Р.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Савків В.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Стухляк Д.П.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2022

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Савків В.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« » 2022 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Дідур Сергію Романовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
1. Тема роботи. «Розробка та дослідження методів планування траєкторії  
мобільних роботів»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» жовтня 2022 року № 4/7-895

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: задана траєкторія та характер руху транспортного засобу;  
опис умов роботи; загальні вимоги до алгоритму керування, загальні відомості щодо  
точності позиціонування та допустимих відхилень

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналітична частина. Науково-дослідна частина. Технологічна частина. Конструкторська  
частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)  
Приклади маршрутів для різних випадків орієнтації – 1 аркуш формату А1. Навігаційна  
система автоматизованого транспортного засобу – 1 аркуш формату А2. Функціональна блок-  
схема навігатора – 1 аркуш формату А2. Функціональна блок-схема всієї системи – 1 аркуш  
формату А1. Варіанти застосування S-подібних траєкторій – 1 аркуш формату А1.  
Результати моделювання траєкторії руху – 1 аркуш формату А1. Варіанти траєкторії  
транспортного засобу – 1 аркуш формату А1.

### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 11 жовтня 2022 року \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	12.11.2022	
2	Науково-дослідна частина	17.11.2022	
3	Технологічна частина	20.11.2022	
4	Конструкторська частина	25.11.2025	
5	Спеціальна частина	30.11.2022	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	05.12.2022	
7	Графічна частина	15.12.2022	
8	Захист кваліфікаційної роботи	23.12.2022	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Дідур С.Р. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Капаціла Ю.Б. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи на тему:  
«Дослідження та розробка методів планування траєкторії мобільних роботів»  
студента групи КАм-61 Дідур С.Р.

Розрахунково-пояснювальна записка: 69 аркушів формату А4, 36 рисунків,  
13 формул, 7 таблиць, 16 літературних джерел, графічна частина – 6 аркушів  
формату А1

Мета роботи: дослідження методів планування траєкторії мобільних роботів, розробка алгоритмів навігації автоматизованих транспортних засобів за заданим маршрутом.

Для досягнення поставленої мети виконано завдання:

- вивчено сучасний стан питання, виконано літературний огляд за темою роботи, сформульовано висновки та основні завдання;
- розглянуто питання встановлення місцезнаходження мобільного робота;
- розроблено алгоритми навігації за вказаним маршрутом, контролю траєкторії
- розглянуто методику динамічного планування траєкторії та технологію обминання перешкод;
- розроблено загальне компонування системи планування траєкторії мобільних транспортних засобів;
- розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Методи виконання роботи: економіко-статистичний, графічний, порівняльний, математичного моделювання; теоретико-емпіричний.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТРАНСПОРТ, АЛГОРИТМ, КЕРУВАННЯ, ТРАЄКТОРІЯ, ПЛАНУВАННЯ

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА</b> .....	8
1.1 Загальні відомості про планування траєкторії мобільних роботів .....	8
<b>2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА</b> .....	14
2.1 Самовизначення та навігація робота.....	15
2.2 Встановлення місцезнаходження за допомогою гоніометра і бортового навігатора .....	16
2.2.1 Отримання корекції за допомогою гоніометра .....	16
2.2.2 Ефективний підбір маяків.....	17
2.2.3 Корекція руху транспортного засобу .....	21
2.2.4 Наближене оцінювання положення за допомогою бортового навігатора .....	24
2.2.5 Обчислення позиції за допомогою бортового навігатора.....	25
2.3 Навігація за вказаним маршрутом .....	27
2.3.1 Переміщення між двома точками .....	28
2.3.2 Планування сегментів траєкторії.....	34
2.3.3 Контроль траєкторії.....	36
<b>3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	38
3.1 Виділення простих опуклих областей.....	38
3.3 Налаштування графіка .....	41
3.4 Динамічне планування траєкторії.....	43
3.5 Технологія обминання перешкод .....	46
<b>4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b> .....	49
4.1 Загальне компонування системи.....	49
<b>5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА</b> .....	51
5.1 Моделювання руху робота .....	51
5.2 Моделювання планування траєкторії.....	54
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	59
<b>6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ</b> .....	59

6.1.1 Ергономічні вимоги до організації трудових процесів та робочих місць .....	59
6.1.2 Організація та обслуговування робочих місць.....	62
<b>6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>63</b>
6.2.1 Небезпеки сучасного урбанізованого середовища .....	63
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>69</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>71</b>

## ВСТУП

Розвиток автоматизації та поглиблені дослідження в технології автономної навігації сприяли збільшенню частки використання мобільних роботів у широкому діапазоні промислових застосувань.

Одним із найважливіших процесів в автономній навігації є планування траєкторії руху мобільних роботів. Планування траєкторії передбачає визначення можливого шляху для мобільного робота від початкової точки до місця призначення в певному середовищі з урахуванням таких параметрів оптимізації, як довжина шляху, час і плавність траєкторії.

Доведено, що роботи є корисними в різних галузях промисловості, в тому числі в місцях, недоступних для людей. В останні роки автономна навігація та планування шляху привернули увагу широкого кола дослідницьких програм, в яких роботи повинні працювати в складних та небезпечних середовищах. У зв'язку з цим виконується великий обсяг науково-дослідницьких робіт для розробки інтелектуального алгоритму, який можна застосувати для навігації мобільного робота без безпосередньої участі людини-оператора в процесі управління переміщеннями мобільних транспортних засобів.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Загальні відомості про планування траєкторії мобільних роботів

Планування шляху є одним із найпопулярніших досліджень мобільних роботів, і це ключова технологія для реалізації автономної навігації роботів.

Технологія, яка автоматично змушує транспортний засіб (наприклад, мобільний робот) пройти заданий шлях, існувала досить давно. Однак така технологія свого часу не була реалізована в промисловості, оскільки навігаційні системи, які б відповідали усім вимогам, були непомірно дорогими. Існували автоматичні пристрої, виготовлені на замовлення для певних цілей. Яскравим прикладом є транспортні засоби з провідним керуванням. Ці машини, хоча і функціональні, дуже обмежені з точки зору гнучкості.

Мобільний робот є важливою галуззю досліджень робототехніки [1]. З постійним розвитком світової економіки та технологій мобільні роботи все частіше з'являються в наукових дослідженнях, виробничому середовищі та повсякденному житті [2]. В той же час, з розвитком комп'ютерів і технологій управління, сфери застосування мобільних роботів стають все більш широкими [3].

Мобільний робот повинен спланувати шлях від початкової позиції до цільової позиції в конкретному виробничому середовищі. Шлях повинен відповідати низці вимог, зокрема таких як мінімальна довжина, максимальні ефективність та безпека, також він повинен мати можливість обминати статичні і динамічні перешкоди на шляху [4]. В результаті очікується, що мобільний робот досягне пункту призначення за найкоротший час. Водночас мобільні роботи повинні мати певні обчислювальні можливості для розрахунку найкоротшого та найбезпечнішого маршруту в режимі реального часу для економії часу та запасу енергії [5].

Відповідно до характеристик планування траєкторії мобільного робота його можна розділити на алгоритм інтелектуального пошуку, алгоритм штучного



інтелекту, алгоритм геометричної моделі та алгоритм уникнення локальних перешкод [6].

Алгоритм інтелектуального пошуку використовує випадково згенеровані початкові рішення або точки вибірки для наближення до оптимального рішення за допомогою кількох ітерацій. Найважливішою характеристикою цього типу алгоритму є випадковість, тому його рішення не є унікальним [7].

Алгоритми на основі штучного інтелекту включають такі методи, як навчання, але такі методи вимагають великої кількості різних типів навчальних вибірок, що обмежує їх практичність в реальних умовах [8].

Метод планування шляху на основі геометричної моделі полягає в побудові геометричної моделі на основі відомого середовища, потім виборі відповідного шляху та коригуванні можливого рішення на основі оптимальної стратегії в режимі реального часу [9]. Шляхи, отримані такими методами, є негладкими, тому необхідна оптимізація для досягнення плавного повороту мобільного робота. До таких методів належать алгоритм А, граф Воронова тощо. В глобальному плануванні шляху алгоритм А вибиратиме квадрат із найменшою поточною вартістю, поки пошук не досягне кінця, таким чином плануючи шлях із найменшими загальними витратами. Однак традиційний А алгоритм погано піддається глобальній оптимізації, і в запланованому шляху занадто багато надлишкових точок і точок перегину [10].

Алгоритм уникнення локальних перешкод використовується для підвищення здатності мобільних роботів уникати перешкод і підвищення безпеки. Він має на меті відвести робота від перешкод і спланувати безпечний шлях без зіткнень.

Зазвичай використовувані локальні алгоритми уникнення перешкод включають метод штучного потенційного поля, динамічний віконний підхід (DWA) і так далі [11]. DWA – це метод вибірки оточення в поточний момент для отримання стану дії робота в наступний момент. Цей метод дозволяє швидко досягти цільової точки, уникаючи зіткнень між роботом і перешкодами в просторі пошуку. Однак він сильно залежить від глобальних параметрів і схильний до збоїв у невідомих середовищах [12].

Ряд дослідників розглядали алгоритми, за допомогою яких робот проходить заданий маршрут. Проблема фактичного створення маршрутів, які є водночас обчислюваними та оптимальними, виявляється досить складним завданням.

Значна увага була зосереджена на побудові шляхів між довільними вихідними та кінцевими точками, і зараз доступно безліч різних алгоритмів для вирішення цієї проблеми [2, 3, 6, 7, 8]. Однак більшість із цих алгоритмів дають або неоптимальні рішення, або є дорогими з точки зору обчислень.

Пропонується нова стратегія пошуку шляху, ефективна з точки зору обчислень і дає майже оптимальні результати. Ця методика базується на виділенні та використанні опуклих областей для пошуку маршруту обходу перешкод.

Найпростіший підхід до проблеми пошуку шляху для мобільного робота між робочими позиціями на виробництві полягає у формуванні графа зв'язності, де кожен вузол представляє робочу станцію, а кожна ланка пов'язана з нею заздалегідь визначеним шляхом відповідної довжини. Тоді знайти шлях між робочими станціями можна або за допомогою пошуку найкоротшого шляху на графіку підключення, або за допомогою пошуку в таблиці попередньо обчислених найкращих шляхів від усіх можливих вихідних точок до всіх можливих точок призначення. Однак цей метод має ряд суттєвих обмежень – немає можливостей для початку або завершення в точці, яка не входить до списку робочих позицій. Крім того, зміна цього списку потребує багато часу, а також неефективна у випадку, коли можуть бути довільні початкова та кінцева точки.

Цей метод використовувався з деяким успіхом у минулому в середовищах, де від роботів вимагається лише проходження декількох відомих маршрутів багато разів, причому імовірність зміни маршрутів дуже низька.

Було проведено ряд досліджень для вирішення цієї проблеми на більш загальному рівні, що можуть бути узагальнені двома підходами. Ігнат'єв [6], а пізніше. Lozano-Perez [9] використали техніку під назвою V-Graph, яка використовує граф вершин, між якими можливий рух по прямій лінії. По суті, це таблиця вузлів (вершин), які є «видимими» (до них можна переміщатися по прямій лінії) з кожного вузла. Хоча цей метод схожий на той, який використовують люди, в автоматизованому вигляді має кілька недоліків. Кожного

разу, коли вказуються точки джерела та призначення, граф має бути доповнений новими вузлами та новими зв'язками. Таким чином, отриманий граф не тільки має велику кількість зв'язків, але й встановлення цих зв'язків є дуже складним.

Інший підхід, використаний останнім часом, полягав у розділенні вільного простору на опуклі багатокутники. Мотивація виділення опуклих форм така: будь-які дві точки опуклої форми можна з'єднати прямою лінією, не залишаючи фігури. Якщо можна знайти опуклі форми, які являють собою зони, вільні від перешкод, тоді робот може переміщуватися між двома точками в цій області, не стикаючись з перешкодами. Кроулі та Шатіла пропонують розбити вільну область (для обходу) на опуклі форми, що не перекриваються [10, 11]. Прокладення маршруту залежить від обходу графа зв'язності, створеного представленням вільних опуклих багатокутників як вузлів. Вузли, що відповідають багатокутникам зі спільними ребрами, з'єднуються дугами. Проблема з методикою розбиття простору на ділянки, що не перекриваються, полягає в тому, що вона не в змозі повністю використати опуклість і, отже, пропускає деякі прямі лінії, які можуть належати опуклій області, про яку процедура не знає.

Це природний наслідок того факту, що потреба в областях, які не перекриваються, дійсно пропускає значну кількість опуклих областей у макеті. Крім того, якщо шляхи динамічно не переналаштовуються на оптимальні, шляхи, які були б «природно» прямими, виявляються досить умовними.

Цей ефект особливо виражений, якщо є відносно великі вільні території. Однак існує однозначна відповідність між точками джерела та призначення у вільному просторі та вузлами графа, і, таким чином, за рахунок оптимальності метод можна успішно використати без застосування високих обчислювальних потужностей.

Брукс [7] запропонував метод, який поєднує в собі переваги обох попередніх процедур. Замість визначення кутів видимих об'єктів, його метод виділяє вільні ділянки у вигляді узагальнених конусів. Він також розглядає робот як прямокутний об'єкт кінцевого розміру. Більшість попередніх методів зменшували робота до певної точки та збільшували розмір перешкод, яких слід уникати. В роботах Брукса транспортний засіб завжди рухається вздовж осі

вільних конусів успішно уникає перешкод. Однак оптимальність втрачається, оскільки хоча конуси перекриваються, опуклість не використовується повністю. Куан, та інші [12] далі вдосконалили метод Брукса, використовуючи змішане представлення вільного простору. Їх методика використовувала конуси для зображення вузьких просторів і опуклі багатокутники, що не перекривалися, для більших вільних областей. Хоча цей метод добре працює для середовищ з великою кількістю перешкод, недоліки, пов'язані з неперекриттям областей, все ще залишаються. Крім того, цей метод не зменшує складність графа і не використовує впорядковану орієнтацію перешкод.

Процедура планування маршруту, яка досліджується в цій роботі, отримує додаткові переваги від концепції опуклості, ідентифікуючи всі найбільші прямокутні вільні області. Щоб досягти майже оптимальності, не жертвуючи ефективністю обчислень, ми створюємо граф із вузлами, що відповідають кожній такій опуклій області. Опуклі форми, що перетинаються, зображуються як суміжні вузли.

Тоді планування шляху зводиться до пошуку маршруту від вихідного вузла до кінцевого вузла через граф і вибору найкращого можливого шляху на основі заданої функції вартості. В цій роботі використана функція вартості – це довжина шляху, тобто ми завжди обираємо найкоротший можливий шлях.

Щоб підвищити ефективність обчислень і забезпечити обґрунтовану базу даних, вибирають перешкоди, а також вільні області прямокутної форми. Перешкоди збільшуються в розмірі, і робот зменшується до точки, щоб спростити планування маршруту без зіткнень, як в [9]. Використовується спеціальний алгоритм відстеження, щоб уникнути повторної оцінки вартості. Крім того, метод динамічного розподілу витрат дозволяє швидко встановити оптимальний шлях.

Перевагою цього методу є те, що він дозволяє виділити майже прямолінійний шлях, якщо він існує.

У більшості випадків кількість вузлів і зв'язків у графі дорівнює  $O(n)$  (де  $n$  – кількість прямокутних перешкод). Складність графа зменшується, якщо існує впорядкована орієнтація перешкод. Далі, база даних і згенерований графік не залежать від конкретних вихідних і цільових точок і тому можуть бути

попередньо обчислені для певного середовища робота.

## 2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

По суті, дослідження, виконані в межах цієї роботи, були зосереджені на двох напрямках:

- розробка системи, відповідальної за спрямування мобільного робота за заданим маршрутом;
- розробка методики автоматичного планування маршрутів для мобільних роботів у відносно структурованих і енергонезалежних середовищах.

Перший з цих напрямків, можна концептуально розділити на розгляд двох одночасних завдань:

Self Location – відповідає за визначення місцезнаходження робота в декартових координатах і пеленг у будь-який момент. Це досягається двома взаємозалежними навігаційними підсистемами.

Гіроскоп і енкодер колеса є основним навігаційним блоком і забезпечують вхідні дані для миттєвого визначення місцезнаходження транспортного засобу під час його руху. Лазерний сканер використовується як допоміжний навігаційний пристрій для отримання «фіксації», точного вимірювання орієнтації та положення робота та для виправлення помилок, накопичених у первинній системі.

Навігатор відповідальний за керування рухом робота, керуючи кутом повороту та швидкістю, необхідною для відстеження шляху, визначеного переліком точок маршруту, а також початкової та кінцевої орієнтації транспортного засобу.

Це досягається шляхом визначення векторів, які представляють положення та орієнтацію транспортного засобу в точках, рівномірно розподілених уздовж заданого шляху. Спочатку навігаційні параметри обчислюються, припускаючи, що транспортний засіб рухатиметься рівним шляхом між заданими точками.

Якщо транспортний засіб збивається з ідеальної траєкторії, його кут повороту та швидкість перераховуються, щоб повернути його на правильний маршрут.

На рис. 2.1 зображена спрощена блок-схема транспортного засобу, що

включає цю подвійну навігаційну схему.

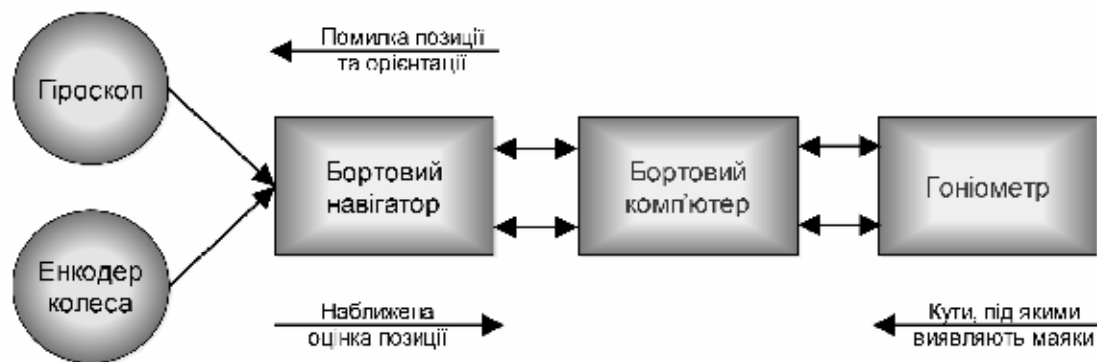


Рисунок 1.1 – Навігаційна система автоматизованого транспортного засобу

Цей транспортний засіб був створений як прототип промислового мобільного робота і являє собою це триколісний транспортний засіб, у якому переміщення і керування здійснюється переднім колесом.

Апаратне забезпечення робота включає в себе бортовий комп'ютер, гіроскоп, інфрачервоний лазерний сканер і диски енкодера на передньому колесі.

## 2.1 Самовизначення та навігація робота

Система самовизначення та навігації застосовується для узгодження заданої траєкторії мобільного робота. Принцип, який використовується для визначення місцезнаходження робота в декартовій площині, подібний до того, який використовують кажани для навігації.

Надсилаючи сигнали (в нашому випадку оптичні сигнали), а потім приймаючи їх відбиття від навколишнього середовища, робот-транспортний засіб може визначити своє положення відносно перешкод. Оскільки сфера застосування цієї системи обмежена промисловим застосуванням, в умовах конкретного виробництва можна закласти фіксовану систему координат. Враховуючи, що розташування перешкод точно відомо, положення робота також можна точно визначити.

Після того, як обґрунтована оцінка положення транспортного засобу, наступною проблемою, яку потрібно вирішити, є навігація/водіння транспортного

засобу по маршруту, визначеному окремими точками. Робот отримує вказівку слідувати дугам між такими точками. В кінці кожної дуги, виходячи з фактичного розташування транспортного засобу, новий шлях обчислюється до наступної точки. Це компенсує відхилення від ідеальної траєкторії, викликане млявістю зміни кута повороту керма та прослизанням коліс.

## **2.2 Встановлення місцезнаходження за допомогою гоніометра і бортового навігатора**

Фундаментальна проблема полягає в тому, щоб точно визначити місцезнаходження робота в будь-якій точці. Це досягається двома взаємозалежними навігаційними системами: бортовим навігатором для приблизної оцінки положення та лазерним сканером або гоніометром для періодичного уточнення цієї оцінки.

Кожна система є життєво важливою для самолокації робота, тоді як точність забезпечує гоніометр, дані про середовище надає бортовий навігатор.

### **2.2.1 Отримання корекції за допомогою гоніометра**

Гоніометр – це прилад, який випромінює круговий інфрачервоний лазерний промінь у площині, паралельній землі. Він встановлений на транспортному засобі в середній точці задньої осі. Він здатний виявляти кути, під якими розміщуються маяки, які розміщені по периметру приміщення. Маяки являють собою рефлектори, які виготовлені таким чином, що вони відбивають світло під кутом падіння (світловий промінь відбивається назад по тому ж шляху, по якому він прийшов). Кожного разу, коли виявляється відбиття, число, що відповідає куту, під яким воно було виявлено, зберігається в буфері.

Цей буфер ініціалізується кожного разу, коли промінь проходить повне коло. Оскільки промінь проходить коло кожні півсекунди, можна двічі на секунду



опитувати буфер для кутів, під якими були помічені маяки.

Комп'ютер у будь-який момент часу здійснює приблизну оцінку положення транспортного засобу шляхом опитування бортового навігатора. Після «виправлення» гоніометром навігатор калібрується повторно, але помилки поступово накопичуються з часом. Використовуючи карту розташування маяків і величини кутів, які збережені в буфері, описаному вище, алгоритм LOCATE (описаний нижче) порівнює кути, під якими було видно маяки, з кутами, під якими очікуються маяки. За допомогою геометричних розрахунків можна визначити положення робота.

### 2.2.2 Ефективний підбір маяків

Кути між маяками відрізняються, коли транспортний засіб нерухомий, тобто знаходиться в спокої і коли транспортний засіб рухається прямо вперед. Якщо припустити, що кути, під якими були виявлені маяки, є точними, основна проблема полягає в тому, щоб порівняти поточне положення маяків із картою маяків.

У реальній ситуації необхідно також враховувати той факт, що може бути декілька маяків, які відповідають на сигнал, а також той факт, що позиційні помилки, отримані за допомогою сигналів від віддалених маяків, ймовірно, будуть більшими.

Необхідність ефективного визначення місцезнаходження транспортного засобу вирішується за допомогою раціонального вибору маяків.

Цю проблему вирішують шляхом також збереження показів, які відповідають видимій кутовій ширині поміченого маяка.

На рис. 2.1 показано, що відстань  $d$  обернено пропорційна куту  $\alpha$ . Використання цього підходу також вимагає, щоб маяки мали однакову видиму ширину з усіх боків. Ця потреба задовольняється шляхом виготовлення маяків у вигляді циліндричних колон. Момент, коли виявляються кути маяків, ті, які мають кутову ширину, меншу за вибране порогове значення, відкидаються.

Помилкові відображення (за умови, що вони мають невелику кутову ширину) будуть негайно відкинуті, оскільки вони з'являтимуться дуже рідко.

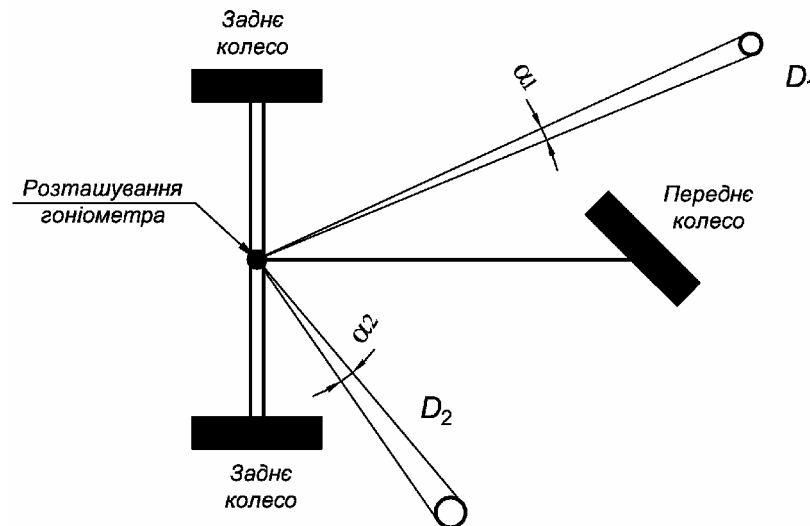


Рисунок 2.1 – Вимірювання відстані до маяків

Через невизначеність положення та орієнтації транспортного засобу маяки потрібно шукати в конусі, що виходить під кутом, рівним найбільшій очікуваній похибці. Ми використовуємо конус  $10^\circ$ , що відповідає помилці  $\alpha = 5^\circ$ .

У межах кутового діапазону може бути більше одного маяка, але в більшості випадків це не спричинить проблеми, оскільки критерій відстані відкидає ті маяки, які розташовані далеко. Однак, якщо в конусі є більше одного маяка, обидва вони відкинуті, оскільки вони не можуть сказати, який із них відповідає поміченому маяку. Якщо в конусі знайдено лише один маяк, то положення цього маяка по  $x$ ,  $y$  (з карти) додається до списку відповідних маяків. На рис. 2.2 показано вибрані маяки (заштриховані темним) і відкинуті (незаповнені).

Якщо принаймні 4 маяки не можуть бути зіставлені, поріг відстані збільшується. З кожної трійки маяків, які можна створити з цього списку, можна виконати одне обчислення положення робота за допомогою процедури LOCATE, як описано нижче.

Нехай декартові координати трьох маяків позначаються через  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$ ,  $(X_3, Y_3)$ . Нехай невідома точка (точка, яку потрібно визначити) буде  $(X_0, Y_0)$ . Нехай кут між маяками 1 і 2 дорівнює  $\alpha_1$ , а кут між маяками 2 і 3

дорівнює  $\alpha_2$ .

1. Накреслимо два кола  $A$  і  $B$  так, щоб  $(X_0, Y_0)$ ,  $(X_1, Y_1)$  і  $(X_2, Y_2)$  вказували коло  $A$  і  $(X_0, Y_0)$ ,  $(X_2, Y_2)$ ,  $(X_3, Y_3)$  вказували коло  $B$  (рис.2.3).

2. Знайдемо  $C_A, C_B$  центри кіл  $A$  і  $B$  (рис. 2.4). Центр кожного кола можна знайти таким чином:

$$m_{1c} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}; \quad m_2 = \frac{X_2 - X_1}{Y_1 - Y_2};$$

$$C_x = x' + \frac{l \cdot \text{ctg}(\alpha)}{\sqrt{1 + m_2^2}}; \quad C_y = y' + \frac{l \cdot \text{ctg}(\alpha) \cdot m_2}{\sqrt{1 + m_2^2}}. \quad (2.1)$$

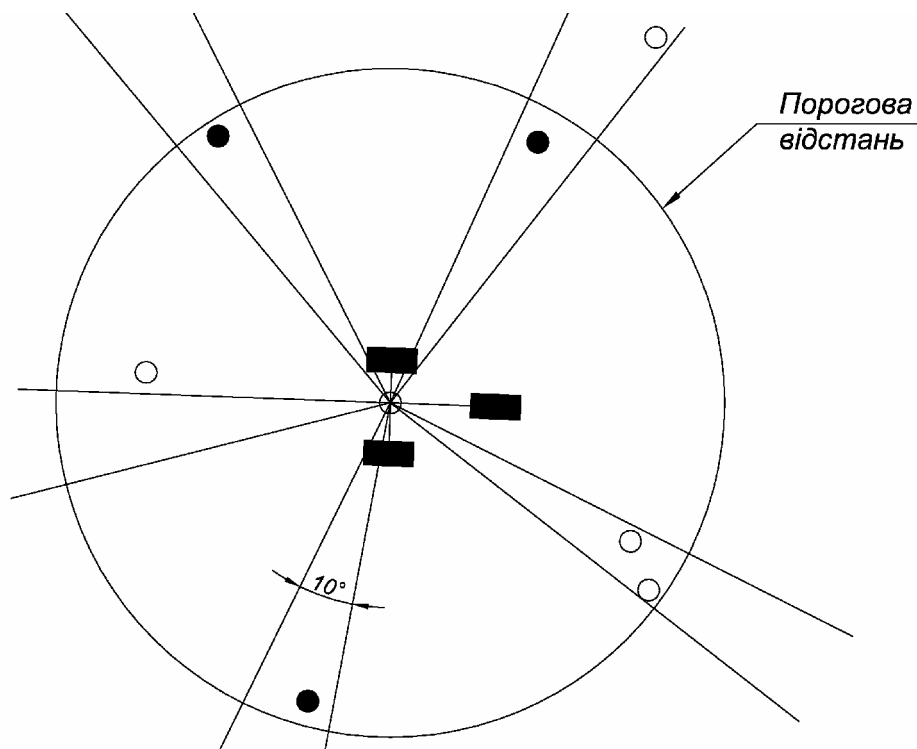


Рисунок 2.2 – Ефективне порівняння видимих маяків

Оскільки наведені вище формули можуть призвести до 2 різних розв'язків (інший є дзеркальним відображенням центру) для  $C_{x,y}$ , комбінація, рівновіддалена від трьох точок кола, вибирається як центральна точка.

3. Знайдемо точку  $(X_m, Y_m)$ :  $m, m'$  визначають з рис. 2.5.

$$m = \frac{C_{y_B} - C_{y_A}}{C_{x_B} - C_{x_A}}; \quad m' = \frac{C_{x_B} - C_{x_A}}{C_{y_A} - C_{y_B}}; \quad (2.2)$$

$$X_m = \frac{X_2 m' - C_{x_A} m + C_{y_A} - Y_2}{m' - m}; \quad Y_m = (X_m - X_2) m' + Y_2.$$

4. Знайдемо  $(X_0, Y_0)$ :

$$X_0 = 2X_m - X_2; \quad Y_0 = 2Y_m - Y_2. \quad (2.3)$$

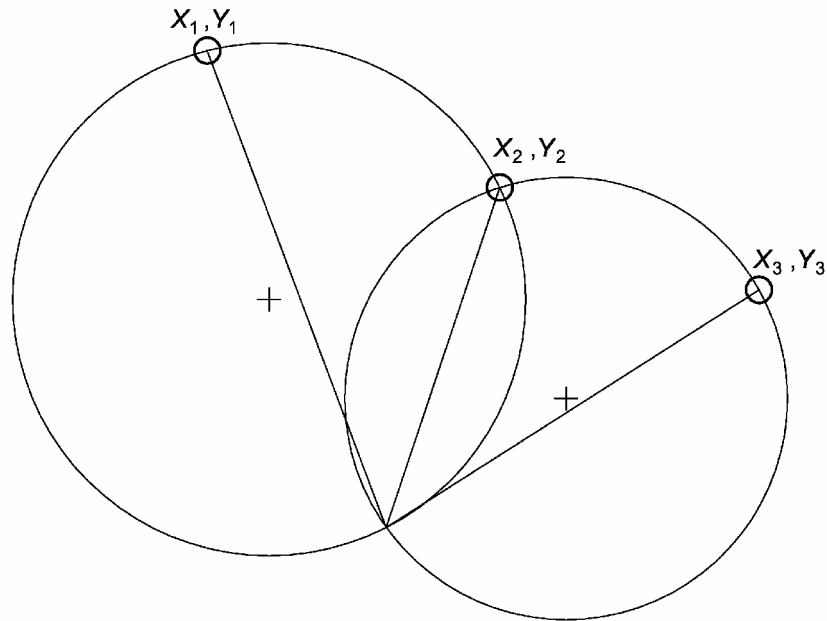


Рисунок 2.3 – Розміщення трьох маяків на двох колах

Після того, як  $(X_0, Y_0)$  визначено, пеленг  $f$  можна знайти за допомогою будь-якого з маяків. Слід зазначити, що оскільки розрахунок положення транспортного засобу залежить від малювання двох кіл, так що перший маяк, другий маяк і точка, яку необхідно визначити  $(X_0, Y_0)$ , лежать на одному колі, а другий маяк, третій маяк і  $(X_0, Y_0)$  лежать на другому колі, цей метод не вдасться, якщо всі три маяки лежать на одному колі. Однак, оскільки велика кількість триплетів може бути створена з відносно невеликої кількості спостережень маяків, цей випадок, якщо він колись виникне, просто відкидається.

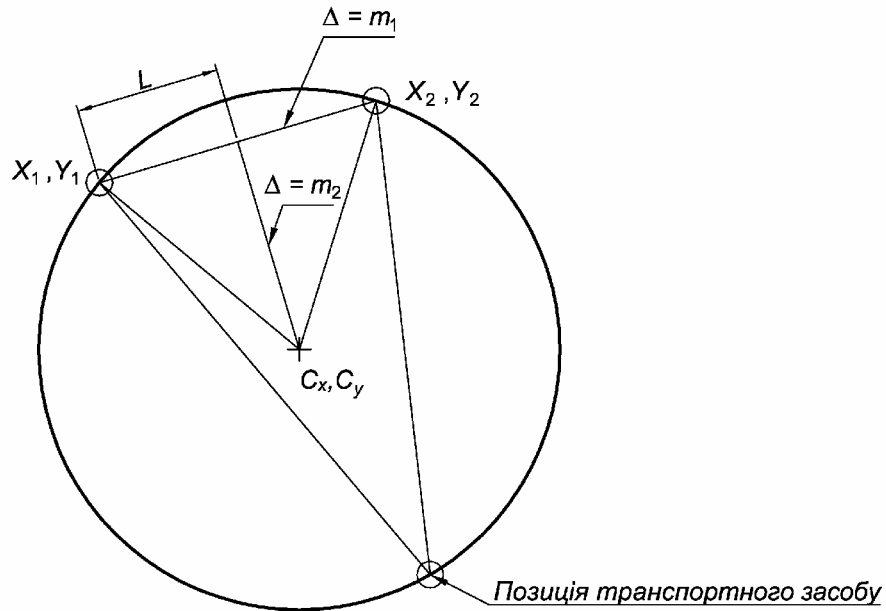


Рисунок 2.4 – Знаходження центру кожного кола

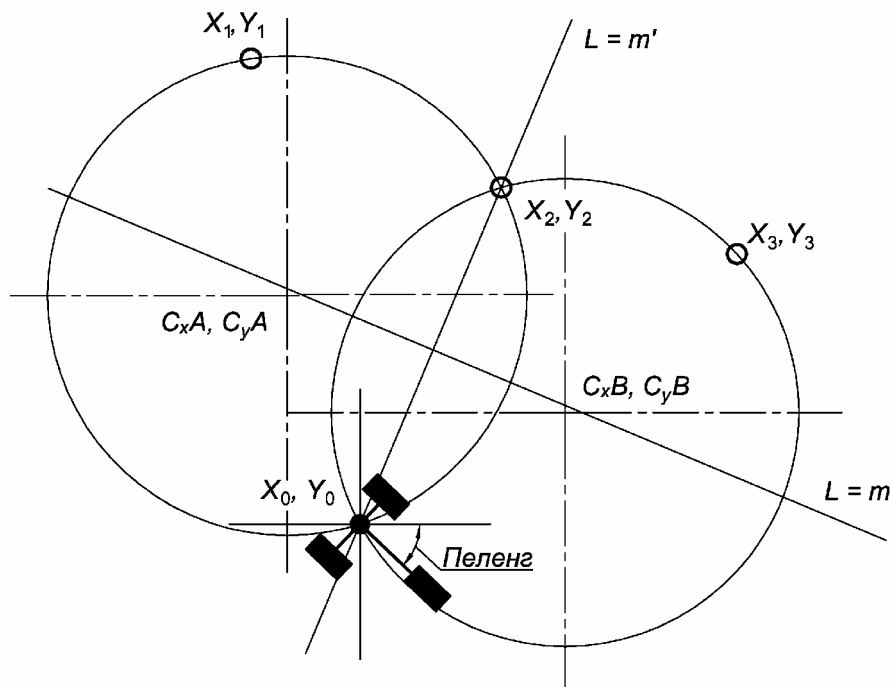


Рисунок 2.5 – Визначення положення та орієнтації транспортного засобу

### 2.2.3 Корекція руху транспортного засобу

Якщо під час зняття показів гоніометра транспортний засіб рухається, виникає проблема, що  $i+1$ -й маяк помічається з іншої точки траєкторії, ніж  $i$ -й маяк (рис. 2.6). Цю проблему можна компенсувати пригальмовуванням або зупинкою кожного разу, коли потрібно зняти показання гоніометра. Інша

альтернатива полягає в тому, щоб зберігати дані бортового навігатора в буфері для відповідності спостереженням радіомаяків, фактично записуючи положення, звідки було помічено кожен маяк. Отже, щоразу, коли маяк буде виявлено, зберігається така інформація:

- 1) кут, під яким виявляється відбиття;
- 2) відстань між транспортним засобом і маяком.
- 3) дані бортового навігатора, що відповідають положенню, в якому видно маяк.

Кожного разу, коли отримується «виправлення», необхідно точно визначити, наскільки далеко навігатор знаходиться від землі від справжньої орієнтації та положення, на відміну від абсолютного розташування.

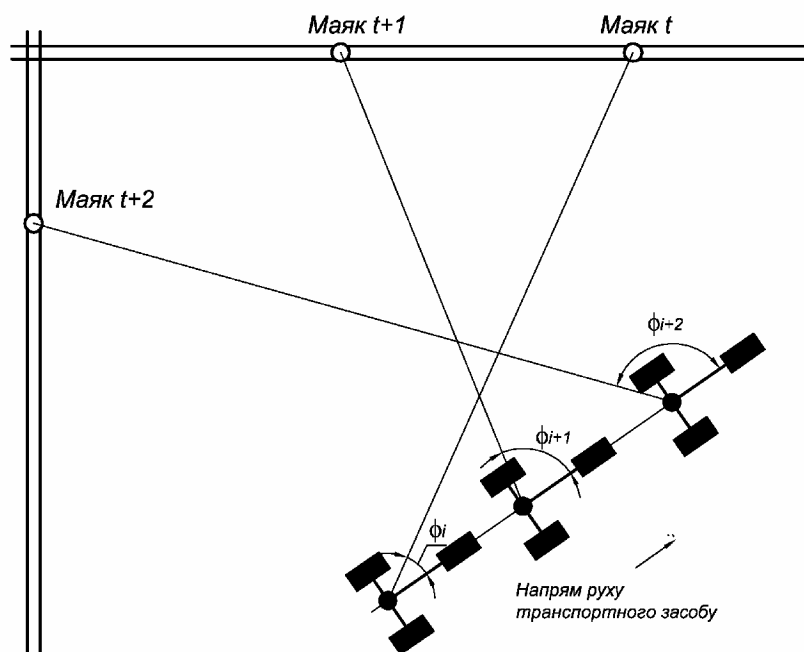


Рисунок 2.6 – Спостереження маяка з транспортного засобу, що рухається

Можна припустити, що різниця між справжнім розташуванням і місцем, обчисленим бортовим навігатором (похибка, створена бортовим навігатором), не змінюється суттєво протягом часу, необхідного для обчислення.

Величину цієї похибки можна отримати шляхом порівняння місцезнаходження бортового навігатора з місцезнаходженням, обчисленим гоніометром в той самий момент часу. Це зручно робити саме в той момент, коли видається сигнал INDEX PULSE, який посилається гоніометром кожного разу,

коли він виконує один оберт. Використовуючи INDEX PULSE наземний навігатор фіксує положення транспортного засобу в даний момент часу. Коли отримано «корекцію», обчислене положення та орієнтація транспортного засобу порівнюється зі значеннями, збереженими в момент INDEX PULSE, щоб отримати похибку в бортовому навігаторі.

Таким чином, проблема зводиться до зчитування сигналів маяка, щоб вони відповідали положенню робота на момент надходження INDEX PULSE (рис. 2.7).

Цей процес можна описати таким чином: для кожного візирного маяка виконується таке коригування: Нехай маяк на  $(X_n, Y_n)$  буде наведений під кутом  $\psi_k$ , коли транспортний засіб знаходиться на  $(X_k, Y_k)$ . Транспортний засіб положення  $\psi_{k'}$ . Нехай позиція, в якій видається INDEX PULSE, буде  $(X_i, Y_i)$ .

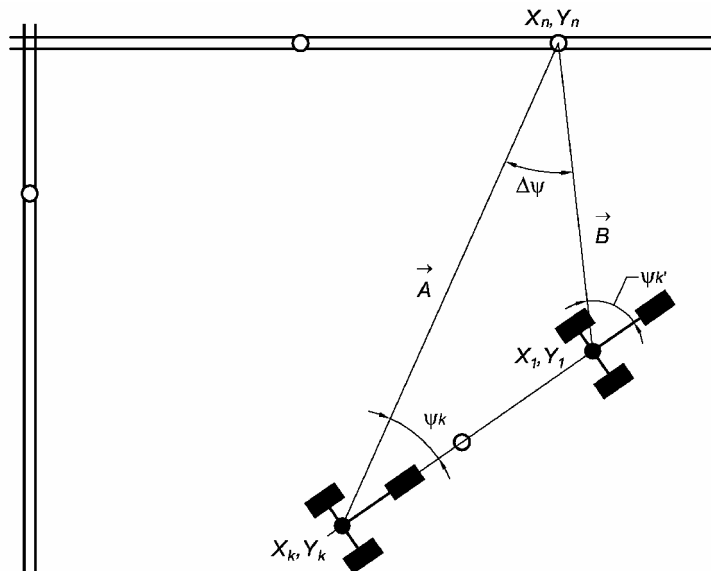


Рисунок 2.7 – Компенсація руху транспортного засобу

Оскільки потрібно визначити кути маяка були відносно положення транспортного засобу в цій точці, потрібно знайти  $\psi_{k'}$ , визначивши  $\delta\psi$ :

$$\delta\psi = \sin^{-1} \left[ \frac{(X_n - X_k)(Y_n - Y_i) - (X_n - X_i)(Y_n - Y_k)}{\sqrt{|(X_n - X_k)^2 + (Y_n - Y_k)^2|} \cdot \sqrt{|(X_n - X_i)^2 + (Y_n - Y_i)^2|}} \right]; \quad (2.4)$$

$$\psi' = \psi_k + \delta\psi.$$

Корекція кута візування залежить від довжини векторів  $\vec{A}$  і  $\vec{B}$ , які ми можемо знати лише приблизно. В ідеальному випадку «виправлення» досягається,

коли транспортний засіб знаходиться в спокої, і в цьому випадку похибка через апроксимацію двох векторів наближається до нуля.

Цей метод компенсації положення транспортного засобу використовується через відсутність кращого методу на даний момент.

#### **2.2.4 Наближене оцінювання положення за допомогою бортового навігатора**

Теоретично відстежувати положення транспортного засобу можна лише за допомогою гіроскопа та датчиків колеса. Насправді, якщо гоніометр не в змозі знайти достатню кількість маяків, транспортний засіб може рухатися виключно під керуванням бортового навігатора. Гіроскоп може вказувати різницю в кутовому положенні транспортного засобу, тоді як енкодері коліс можуть надавати інформацію про те, наскільки далеко перемістилося колесо. Однак існує таке явище як пробуксовка коліс, і якщо не використовується надзвичайно складний гіроскоп, виникають значні кутові похибки, пов'язані з обертанням Землі, які накопичуються, що призводить до поступового погіршення оцінки положення транспортного засобу.

Гоніометр, як описано вище, використовувався для періодичної корекції (калібрування) гіроскопа, надаючи точну «фіксовану» позицію та орієнтацію транспортного засобу.

Це можливо тому, що бортовий навігатор на невеликих інтервалах часу забезпечує обґрунтовані оцінки диференціалів руху по осях  $x$ - $y$ . Слід зазначити, гоніометр не може працювати без бортового навігатора.

Оскільки використана схема не може однозначно ідентифікувати маяки лише за даними відображення (усі маяки ідентичні), вона повинна мати хоча б приблизну інформацію про те, де знаходиться транспортний засіб, щоб мати можливість порівняти виявлення маяків з їх картою.

Використовуваний гіроскоп має властиве відхилення  $4^\circ$  на год. Він забезпечує диференціальний вихід, що відповідає кутовому положенню



транспортного засобу. Оскільки він не забезпечує абсолютне положення кута, кожного разу, коли знімається показання гоніометра, положення нульового градуса потрібно калібрувати повторно. Це можна зробити, зберігаючи в програмі значення зміщення, яке відповідає різниці в вихідному сигналі гіроскопа та справжньому куті. Знову ж таки, якщо ми припустимо, що гіроскоп забезпечує надійні дані за невеликі проміжки часу, тоді можна отримати реальну оцінку кутового положення, забезпечуючи повторне калібрування зміщення через певні інтервали.

Енкодери коліс налаштовані таким чином, щоб видавати імпульс щоразу, коли переднє колесо проходить відстань приблизно 8,5 мм. Враховуючи максимальну швидкість 1,2 м в секунду, це відповідає максимум 50 імпульсам на секунду.

### 2.2.5 Обчислення позиції за допомогою бортового навігатора

Положення в просторі можна було обчислити простою ітерацією (рис. 2.8).

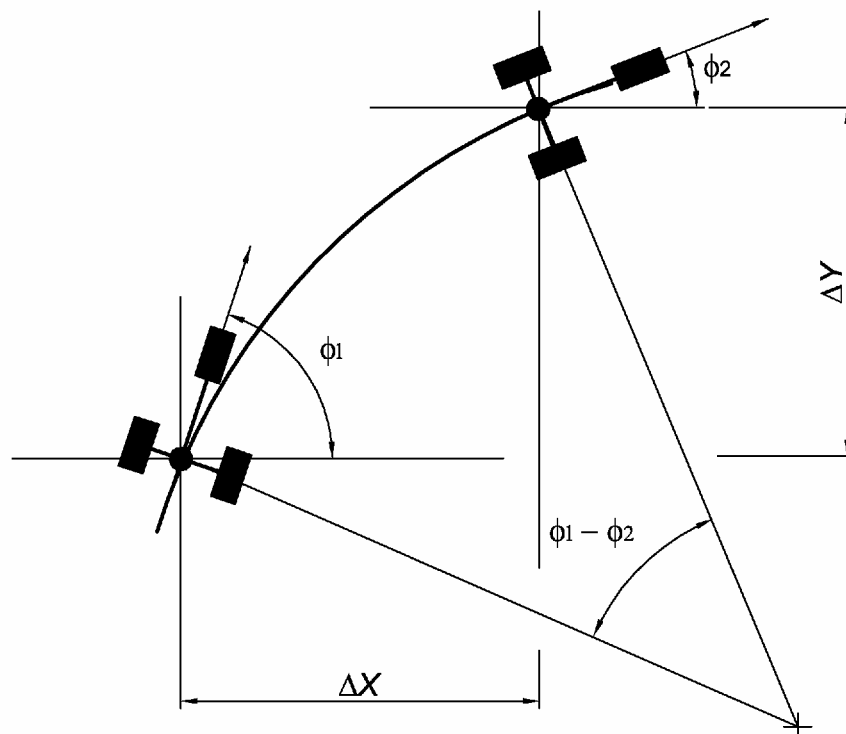


Рисунок 2.8 – Розрахунок диференціального руху транспортного засобу

Якщо довжина дуги частини шляху),  $\delta s$ , і задано кути  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  на початку та в

кінці цієї дуги, тоді збільшення координат позиції  $x$  та  $y$ ,  $\delta x$  та  $\delta y$  можна визначити як:

$$\begin{aligned}\delta\phi &= \phi_2 - \phi_1; \\ \delta x &= \frac{\delta s}{\delta\phi}(\sin(\phi_1) - \sin(\phi_2)); \quad \delta y = \frac{\delta s}{\delta\phi}(\cos(\phi_1) - \cos(\phi_2)).\end{aligned}\tag{2.5}$$

Однак, якщо ця інтеграція здійснюється за допомогою відповідного програмного забезпечення. Щоразу, коли колісні енкодери надсилають імпульс, гіроскоп опитується та обчислюється нове положення. Як видно з наведених вище формул, завдання зводиться до 3 віднімань, 2 множень ( $\delta s$  попередньо встановлено) і 4 тригонометричних обчислень. Замість обчислення значень синусів і косинусів апаратне забезпечення використовує таблиці пошуку.

Структурна схема бортового навігатора показана на рис. 2.9.

Процесор міститься в блоці з позначкою COMP UNIT. Дані, що вводяться в цей блок, надходять від датчиків коліс, гіроскопа. Вихідними даними є обчислена позиція  $(x, y)$ .

У COMP UNIT є один вхід від сигналу, який вказує на те, що маяк був виявлений, і один вхід від INDEX PULSE, виданого гоніометром, що вказує на закінчення одного повного оберту гоніометра. Коли видається INDEX PULSE, ініціалізується буфер BUFFER. Тепер щоразу, коли виявляється маяк, поточне положення транспортного засобу в COMP UNIT зберігається в буфері. Це дозволяє компенсувати рух мобільного робота в алгоритмі LOCATE, а також забезпечує приблизну оцінку його положення в будь-якій точці.

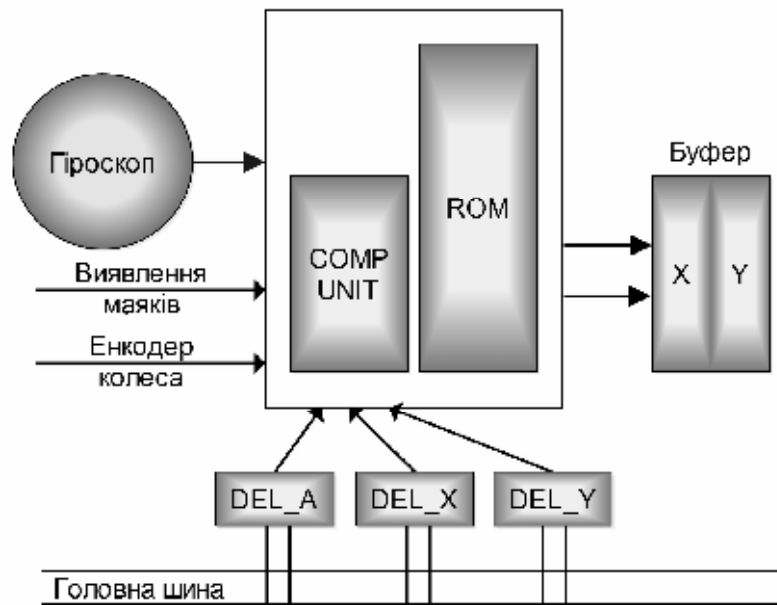


Рисунок 2.9 – Функціональна блок-схема навігатора

Бортовий комп'ютер зв'язується з навігатором через регістри DEL\_A, DEL\_X, DEL\_Y на рис. 2.9.

Завдяки цьому вирішуються дві задачі.

1. Гіроскоп забезпечує лише плаваючий вихід. Бортовий комп'ютер повинен постійно стежити за тим, який вихід відповідає нульовому куту.

Перед початком руху транспортний засіб має відоме положення та орієнтацію. Наприклад, якщо транспортний засіб орієнтовано під кутом  $30^\circ$  і вихід 12 біт гіроскопа – це число 200, тоді нульовий кут –  $115^\circ$ . Бортовий комп'ютер повинен повідомити бортовий навігатор про це зміщення.

2. Щоразу, коли виконується «Корекція», комп'ютер здатний визначити похибку, яка знаходиться в навігаторі (на INDEX PULSE). Помилки в позиції та орієнтації повинні бути передані навігатору, і це робиться через згадані регістри.

### 2.3 Навігація за вказаним маршрутом

Використовуваний транспортний засіб має аналогові сервосистеми, за допомогою яких задається швидкість і кутове положення переднього колеса. На ці сервоприводи подається напруга, що відповідає необхідним швидкості та куту.

Існує додаткова можливість вказувати довжину сегмента шляху (відстань, яку має проїхати переднє колесо під заданим кутом).

Після проходження зазначеного сегмента на комп'ютер повертається сигнал «готовність», який запускає обчислення наступного сегмента шляху.

### 2.3.1 Переміщення між двома точками

Здатність змусити транспортний засіб рухатися між двома точками з довільною початковою та кінцевою орієнтаціями є важливою для успішної навігації.

Проблему побудови плавного шляху від  $(X_1, Y_1)$  до  $(X_2, Y_2)$  (рис. 2.10) можна розділити на кілька випадків залежно від орієнтаційних кутів  $\alpha$  і  $\beta$ . За винятком випадку, коли транспортний засіб повинен рухатися прямо вперед без повороту, кожен інший випадок призводить до призначення двох дуг певної довжини та радіусу кривизни. В даному випадку приймається, що пряма – це дуга нескінченного радіуса.

У більшості випадків робот може переходити від  $(X_1, Y_1)$  до  $(X_2, Y_2)$  будь-яким із двох способів, показаними на рис. 2.11: 1) якщо : спочатку рухатися по дузі, а потім по прямій лінії; 2) якщо спочатку рухатися по прямій лінії, а потім – по дузі.

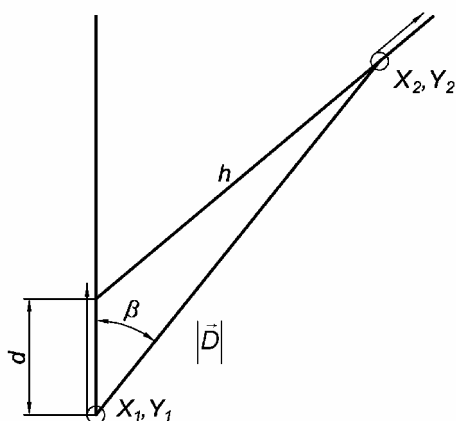


Рисунок 2.10 – Переміщення між двома точками при довільній орієнтації

Для  $\beta < \phi < 2\beta$   $r$  (радіус кривизни),  $s$  (довжина дуги) та  $e$  (довжина прямої)

обчислюють таким чином:

$$r = \frac{d}{\tan(\phi/2)}; \quad (2.6)$$

$$s = r \cdot \phi; \quad e = h - d.$$

Для  $\phi > 2\beta$ :

$$r = \frac{h}{\tan(\phi/2)}; \quad (2.7)$$

$$e = d - h; \quad s = r \cdot \phi.$$

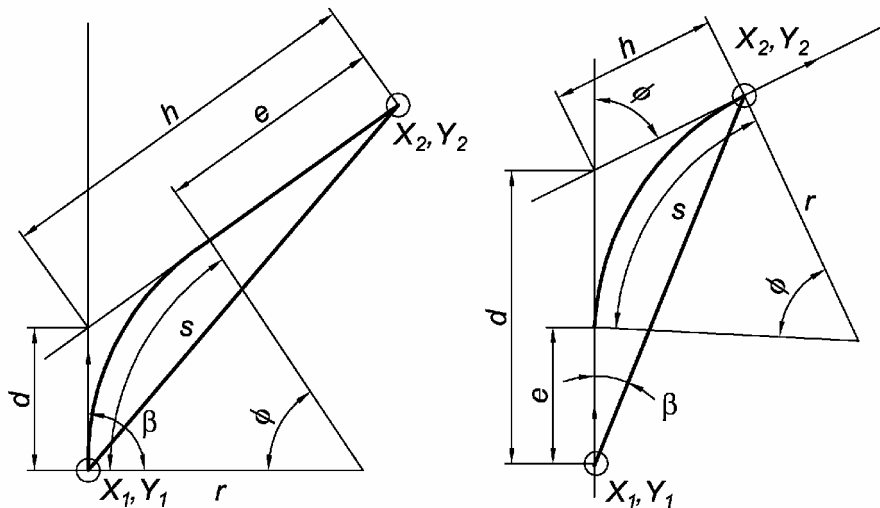


Рисунок 2.11 – Плавний шлях із використанням однієї дуги та однієї прямої лінії

Випадок, коли  $\phi < \beta$ , є особливим, оскільки неможливо дістатися від  $A$  до  $B$  без використання  $S$ -подібної кривої.

Крім того, якщо напрям руху протилежний напрямку обертання, то траєкторія обов'язково має  $S$ -подібну форму незалежно від кута  $\phi$ .

Хоча малоімовірно, що шлях, вказаний мобільному роботу, потребуватиме таких маневрів, важливо враховувати такі та інші випадки, які вимагатимуть більше, ніж простого руху по дузі з двох причин:

- оскільки робот може мати будь-яку орієнтацію, перш ніж почне рухатися, і так само може знадобитися будь-яка орієнтація, коли він зупиняється, єдиний спосіб пристосуватися до таких ситуацій – зробити подвійний поворот (дотриматися  $S$ -подібного шляху);
- оскільки вбудований привід не має зворотного зв'язку в режимі

реального часу, і той факт, що на даний момент динаміка рульового механізму не була досліджена та описана, фактичний шлях, простежений у відповідь на команду руху, може поставити транспортний засіб у таку ситуацію, коли, щоб повернутися на правильний шлях, необхідно вибрати S-подібний шлях.

Можливі 3 випадки, коли потрібно застосовувати S-подібні шляхи.

1.  $\phi < \beta$ , а поступальний рух і поворот відбуваються в одному напрямку (рис. 2-12). Рівняння (2.8) застосовується для  $0 < \phi < \beta$ . У цьому випадку необхідні дуги описуються як:

$$\psi = \cos^{-1} \left[ \frac{\cos \phi + \tan \beta \cdot \sin \phi + 1}{2\sqrt{1 + (\tan \beta)^2}} \right] + \beta;$$

$$r = \frac{\alpha}{\cos \phi - 2 \cos \psi + 1}; \quad (2.8)$$

$$s_1 = r \cdot \psi; \quad s_2 = r(\psi - \phi).$$

2. Випадок, коли  $\phi > \beta$  і необхідний радіус кривизни менший за мінімальний радіус, на який транспортний засіб може повернути. Тут також поворот і переміщення відбуваються в одному напрямку (рис. 2.13).

Для  $\beta < \phi < 2\beta$  використовується рівняння (2.8). Для  $\phi > 2\beta$  використовується рівняння (2.9).

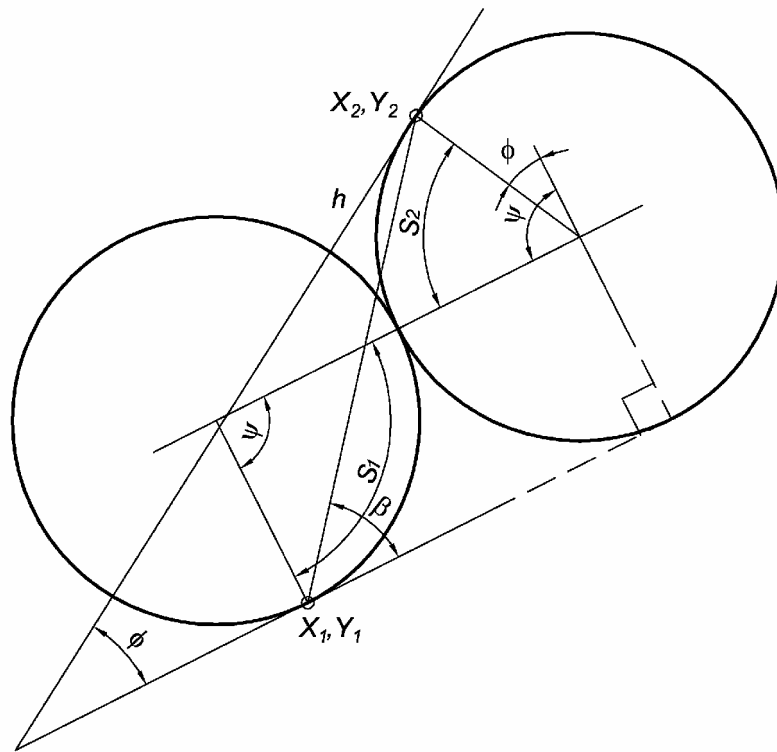


Рисунок 2.12 –  $S$ -подібний шлях, коли  $\phi < \beta$

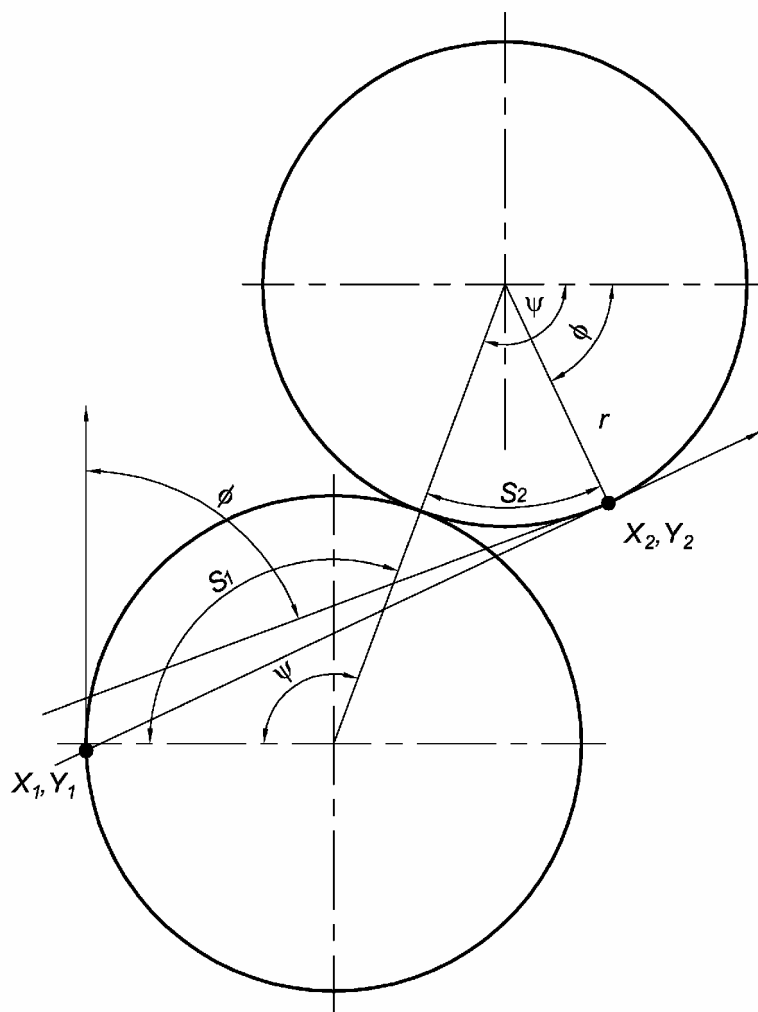


Рисунок 2.13 –  $S$ -подібний шлях для  $\phi > \beta$  мінімального радіуса

3. Переміщення транспортного засобу вправо або обертання транспортного засобу вліво або переміщення вліво, і обертання вправо (рис. 2.14). Опис дуги в цьому випадку виявляється таким:

$$\psi = \cos^{-1} \left[ \frac{\tan \beta \cdot \sin \phi - \cos \phi - 1}{2\sqrt{1 + (\tan \beta)^2}} \right] - \beta;$$

$$r = \frac{\alpha}{2 \cos \psi - \cos \phi + 1};$$

$$\delta_1 = r(\pi - \psi); \quad \delta_2 = r(\psi - \phi).$$
(2.10)

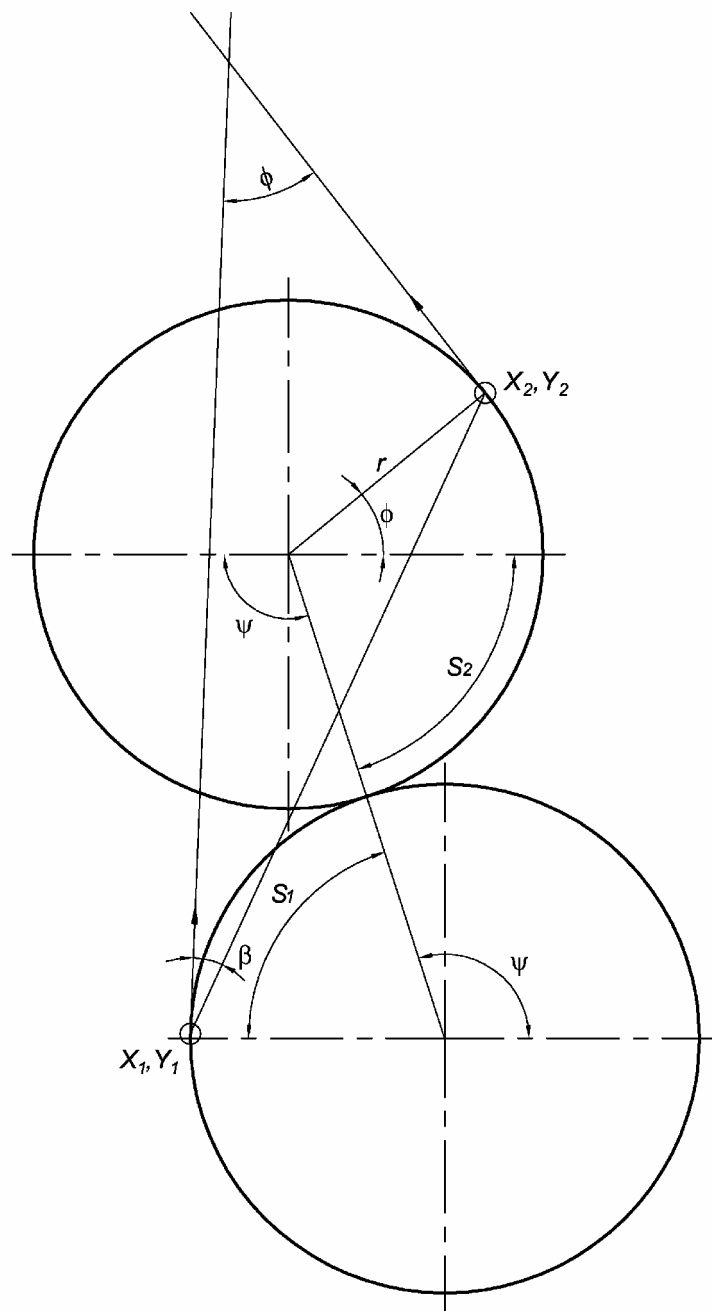


Рисунок 2.14 – S-подібний шлях, коли переміщення та обертання протилежні



Кожен з наведених вище випадків також стосується їх дзеркальних відображень. Також завжди можна використовувати дві дуги, щоб переміщуватися між будь-якою парою точок, цей метод використовується лише тоді, коли траєкторія не являє собою просту дугу.

Оскільки для контролера рульового керування потрібен кут повороту  $\delta$ , необхідний додатковий розрахунок, як показано на рис. 2.15. Точка, позначена С, є місцем кріплення гоніометра. Саме ця точка представляє транспортний засіб, коли вона просто показана як точка на рис. 2.15. Для цього випадку

$$\delta = \tan^{-1} \frac{L_{fixed}}{R_N}. \quad (2.11)$$

На бортовий контролер подається напруга від 0 до 10 вольт, що забезпечує поворот в діапазоні від  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . У нашій реалізації 8-бітний регістр використовується для зберігання обчисленого кута повороту. Таким чином, число 0 означає поворот на  $-90^\circ$  (праворуч), а число 255 означає поворот на  $90^\circ$  (ліворуч), і, отже, регістр заповнюється:

$$\begin{aligned} 128 + \delta & \text{ \{Якщо поворот лівий\}} \\ 128 - \delta & \text{ \{Якщо поворот правий\}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

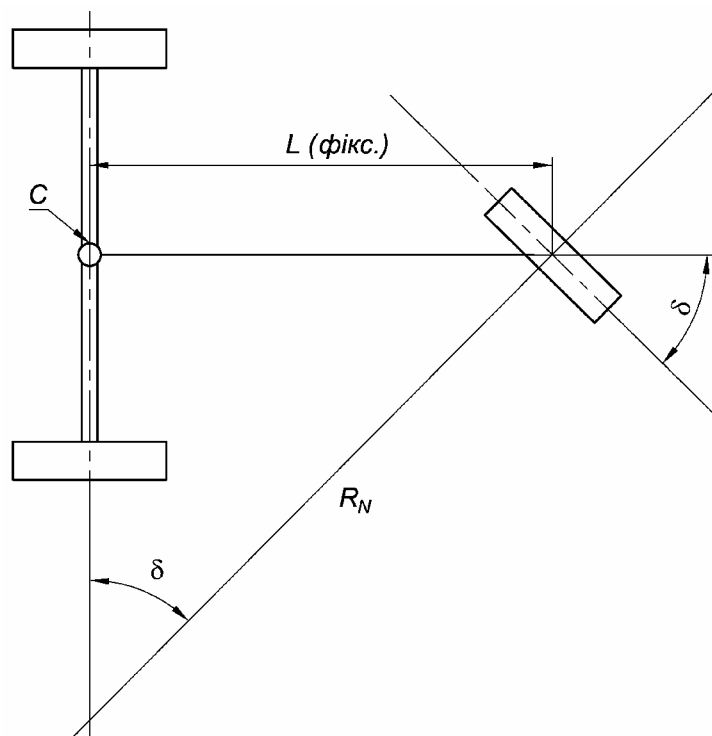


Рисунок 2.15 – Розрахунок кута повороту

### 2.3.2 Планування сегментів траєкторії

В цьому розділі розглядається планування траєкторії для робота, який має лише початкову та кінцеву орієнтацію. Припускаючи, що такий шлях (набір точок, з'єднаних прямими відрізками) вже знайдено, далі наведено опис процедури, яка (з використанням методів, розроблених раніше) відповідає за те, щоб робот йшов цим шляхом. На рис. 2.16 показано простий шлях із 4 точок із початковою та кінцевою орієнтаціями. Якщо лише первинні (вказані) точки використовуються з рівняннями, наведеними раніше, траєкторія транспортного засобу включатиме ці точки, але не відстежуватиме відрізки прямої лінії між ними дуже близько. Щоб простежити шлях з невеликою похибкою та з мінімальним радіусом, до шляху додається більше точок, а деякі з наступних точок відкидаються.

Цей список вторинних точок, який фактично використовується для планування шляху, створюється таким чином: для довгих сегментів прямолінійного шляху точки додаються так, щоб найдовший сегмент дорівнював подвійному номінальному радіусу ( $R_N$ ). Номінальний радіус – це радіус кривизни, який використовує транспортний засіб під час об'їзду кута, і є функцією навантаження та швидкості транспортного засобу.

Для шляху, який вимагає від транспортного засобу проходження кута в  $(X_i, Y_i)$ , точки додаються на відстані  $l$  з обох боків, а  $l_1$  визначається як

$$\begin{aligned} \vec{A} &= (X_i - X_{i-1}, Y_i - Y_{i-1}); \\ \vec{B} &= (X_{i+1} - X_i, Y_{i+1} - Y_i); \\ \phi_a &= \sin^{-1} \frac{|\vec{A} \times \vec{B}|}{|\vec{A}| |\vec{B}|}; \\ l_1 &= R_N \tan \frac{\phi_a}{2}. \end{aligned} \tag{2.13}$$

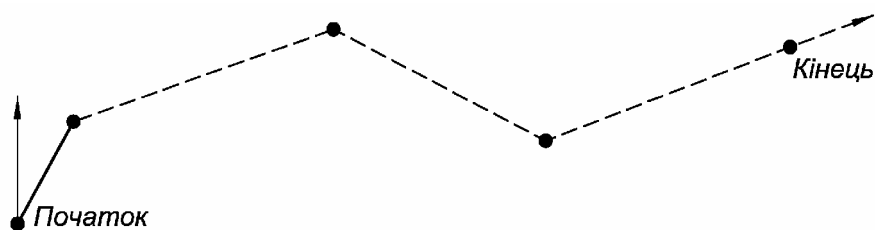


Рисунок 2-16 – Початковий шлях із початковою та кінцевою орієнтаціями

$l_0$  – відстань між кожною другорядною точкою та попередньою. Цей процес зображено на рис. 2.17. Якщо  $l_0+l_1 > A$ , то точка переходу зберігається і додаткові точки не додаються.

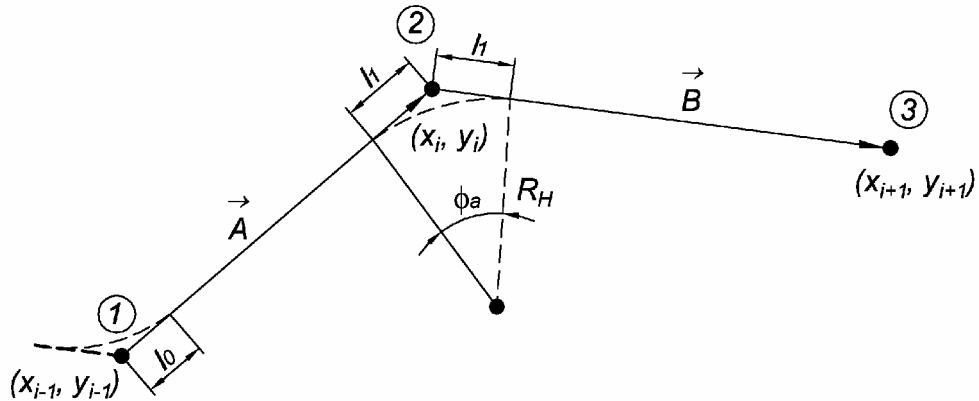


Рисунок 2.17 – Додавання додаткових точок

На рис. 2.18 зображено шлях з рис. 2.16 із накладанням другорядних точок. З кожною з цих точок пов'язаний вектор, який позначає напрямок транспортного засобу в цій точці.

Ідеальний шлях між будь-якими двома послідовними точками описується за допомогою формул, які використовуються для визначення кутів повороту та довжини сегментів шляху.

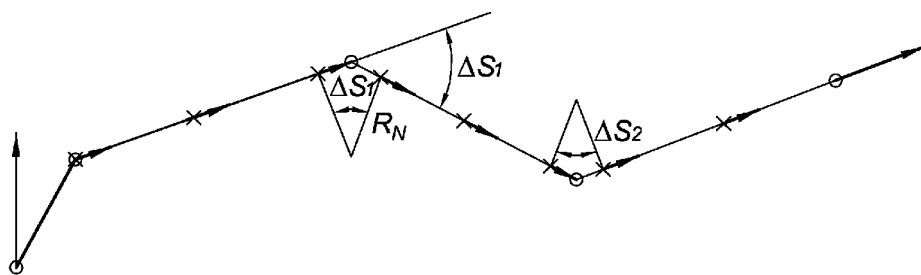


Рисунок 2.18 – Другорядні точки шляху на рис. 2.16

На рис. 2.19 показано ідеальний шлях для точок, зазначених на рис. 2.16.

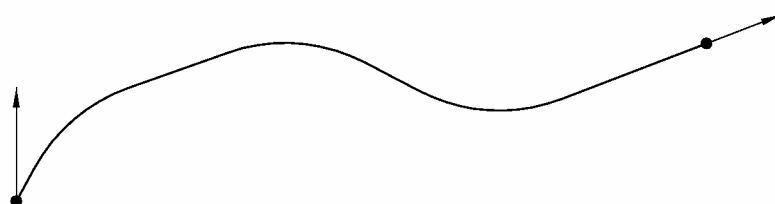


Рисунок 2-19 – Ідеальна траєкторія транспортного засобу для точок на Рис. 2.16

### 2.3.3 Контроль траєкторії

Зазвичай можна використовувати керування в реальному часі (можливо, через спеціальний процесор), щоб утримувати транспортний засіб на визначеному шляху. Для цілей цього експериментального транспортного засобу ми включили метод псевдоконтролю для компенсації таких факторів, як динаміка транспортного засобу (проковзування коліс, повільна реакція керма тощо), які не були кількісно охарактеризовані і які змушують транспортний засіб відійти від ідеальної траєкторії. Щоб впоратися з такою проблемою, кут повороту і траєкторія довжина сегмента динамічно обчислюється в кінці кожного сегмента маршруту, щоб спробувати повернути робота на заданий маршрут. Рис. 2.20 ілюструє цей процес.

Шлях від  $A$  до  $C$  спочатку обчислюється як дві дуги довжиною  $S_1$  і  $S_2$ , що проходять через проміжну точку  $B$ . Незадовго до того, як транспортний засіб подолає відстань  $S_1$  (раніше  $ds$ ), контролер рульового управління видає імпульс. У цей час покази позиції знімаються з бортового навігатора. На рис. 2.20  $S_1$  – це дуга, по якій транспортний засіб фактично рухається, а закінчується в точці  $B'$  замість  $B$ . Тепер 2 нові дуги  $S_1$  і  $S_2$  обчислюються з використанням точок  $B$  і  $D$ . Слід зазначити, що в кожному випадку друга дуга ніколи не використовується (оскільки в кінця кожної першої дуги обчислюються дві нові дуги), за винятком випадку, коли перша дуга дуже мала.

Тоді використана дуга становить половину довжини другої дуги, на кінці якої обчислюються дві нові дуги.

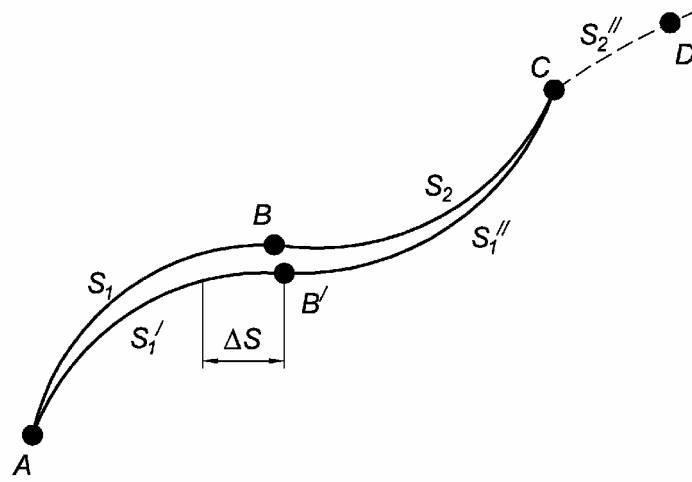


Рисунок 2.20 – Визначення відхилень від ідеального шляху

### 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Виділення простих опуклих областей

Для спрощення ця приймаємо, що області, які робот не може перетинати дугу прямокутника з ребрами, паралельними осям координат. Якщо робоча область або перешкоди мають непрямокутні краї, то додаються прямокутні краї. У будь-якому випадку навколо всіх об'єктів потрібно додати краю, щоб запобігти роботі від надто близького наближення до перешкод. Ця процедура, подібна до тієї, що використовується в [8]. Крім того, для простоти обчислень, обмежимо робочу зону лише прямокутними вільними областями (існує нескінченна кількість непрямокутних вільних областей). Маючи карту меж і перешкод, робоча зона розбивається ребрами цих форм на сітку, що складається не більше ніж з  $(2n+1) \times (2n+1)$  прямокутників, де  $n$  – кількість таких областей.

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
(k)	(l)	(m)	(n)	(o)
(p)	(q)	(r)	(s)	(t)
(u)	(v)	(w)	(x)	(y)

Рисунок 3.1 – Поділ середовища

Це має найбільший зміст, якщо зауважити, що опуклі області, які ми шукаємо, обмежені лише межами перешкод. Кожен такий прямокутник може бути представлений парою бінарних рядків довжиною не більше  $2n+1$  біта. Лівий підрядок представляє відносну позицію  $x$ , а правий – позицію  $y$ . Наприклад,

прямокутник на рис. 3.1, створений перешкодами в клітинках  $g$  і  $s$ , другий зліва і третій зверху (комірка  $l$ ) може бути представлений рядком

0 1 0 0 0    0 0 1 0 0

Подібне позначення можна використовувати для областей, що складаються з кількох прямокутників.

Рядок                                    1 1 0 0 0    0 0 1 1 0

наприклад, представляє опуклу область, що складається з 5 клітинок ( $k, l, p, q$ ):

1 0 0 0 0                    0 0 1 0 0  
 0 1 0 0 0                    0 0 1 0 0  
 1 0 0 0 0                    0 0 0 1 0 and  
 0 1 0 0 0                    0 0 0 1 0.

Первинна опукла область – це область, яка не є частиною жодної іншої вільної області. Основні опуклі області для даного випадку генеруються шляхом злиття прямокутних комірок із описаної вище сітки. Очевидно, що жодна клітинка, позначена роботом як «недопустима», не може бути використана в такій комбінації.

Так як розглядаються лише прямокутні опуклі форми, можна використати процедуру для «злиття» окремих розділів у первинні опуклі форми, яка схожа на техніку Куайна-МакКласкі [13], яка використовується для ідентифікації всіх простих імплікантів логічного виразу. Цю процедуру можна описати так.

Крок 1. Кожна горизонтальна смуга (складена з горизонтально вирівняних комірок) описується за допомогою пари двійкових рядків довжиною  $2n+1$ . Правий підрядок матиме лише один біт, який відповідає вертикальному положенню смуги, а лівий містить ті біти, які відповідають вільним прямокутникам у смугі. Наприклад, четверта горизонтальна смуга на рис. 3.1 має вигляд

1 1 1 0 1    0 0 0 1 0

Крок 2. Знаходження усіх суміжних горизонтальних смуг. Це робиться шляхом розбиття лівого підрядка на безперервні цикли по 1-с і повторення правого підрядка в кожній частині. Наприклад, смугу кроку 1 можна розбити на дві горизонтальні смуги, які представляють суміжні вільні комірки:

1 1 1 0 0                    0 0 0 1 0    and

Крок 3. Створення списку усіх рядків, створених на кроці 2, так, щоб рядки були згруповані за ідентичними правими підрядками, а групи були впорядковані за позицією  $l_s$  у правих підрядках.

Крок 4. Створення нового списку рядків на основі таких правил.

1. Нова  $i$ -та група рядків генерується шляхом об'єднання кожного рядка зі старої  $i$ -ої групи з кожним рядком із старої  $i+1$  групи,  $i = 1, 2, \dots$

2. Два рядки поєднані (логічно). Заперечення (логічне) правих підрядків і додавання лівих підрядків. Якщо новий рядок має нульовий (усі нулі) лівий підрядок, цей рядок відкидається, в іншому випадку він додається до нового списку.

3. Кожного разу, коли рядок додається до нового списку, позначають всі рядки зі старих списків, які охоплюються новим доповненням. Кажуть, що рядок  $S_1$  покритий рядком  $S_2$ , якщо логічне АБО двох рядків дає  $S_2$ .

Крок 5. Повторення кроку 4, якщо новий створений список містить дві або більше груп.

Крок 6. Рядок із будь-якого списку, який не позначено міткою, представляє первинну опуклу область для плану.

Легко довести, що описаний вище алгоритм справді забезпечує всі прямокутні прості опуклі області. При застосуванні до плану на рис. 3.1 створені списки рядків і отримані первинні опуклі області зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Отримання всіх простих опуклих областей, показаних на рис. 3.2, для компонування на рис. 3.1



Перелік 1	Перелік 2	Перелік 3	Перелік 4
11111 10000 (A)	10000 11000	10000 11100	10000 11110
10000 01000	00111 11000	00111 11100 (D)	00100 11110
00111 01000	10000 01100	10000 01110	00001 11110
11111 00100 (B)	00111 01100	00100 01110	10000 01111
11100 00010	11100 00110	00001 01110	00100 01111
00001 00010	00001 00110	11100 00111 (E)	00001 01111
11111 00001 (C)	11100 00011	00001 00111	
	00001 00011		<b>Перелік 5</b>
			10000 11111 (F)
			00100 11111 (G)
			00001 11111 (H)

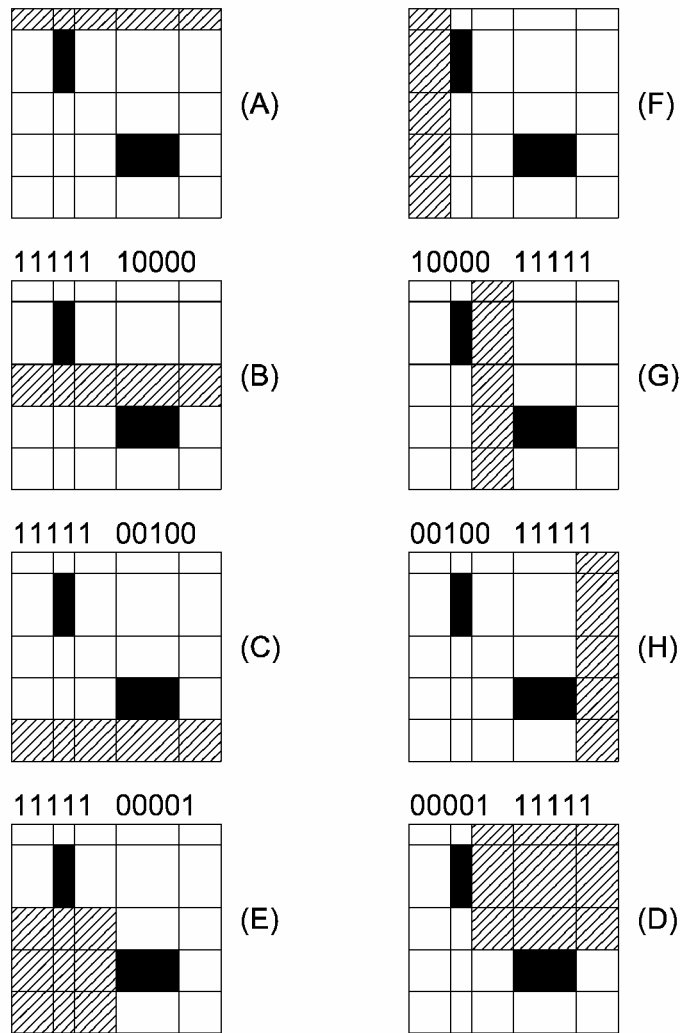


Рисунок 3.2 – Опуклі області в середовищі, яке містить 2 перешкоди

### 3.3 Налаштування графіка

Наступним кроком у плануванні шляху є представлення інформації про

основні області (згенеровані в розділі 3.2) у зручній структурі даних. Щоб полегшити застосування таких методів, як упорядкований обхід графа та зворотне відстеження, граф налаштовується з «простими опуклими областями як вузлами».

Два вузли з'єднуються дугою, якщо області, які вони представляють, перетинаються. З дугою пов'язана інформація про площу перетину простих областей, що представляють її кінці. На рис. 3.3 показаний такий графік, отриманий із компонування на рис. 3.1.

Якщо оптимальність не є критерієм, обхід графіка є прямим.

Можуть бути визначені первинні опуклі області, в яких розташовані вихідна та кінцева точки, і граф може бути пройдений від вихідного вузла до кінцевого вузла за допомогою одного з доступних методів.

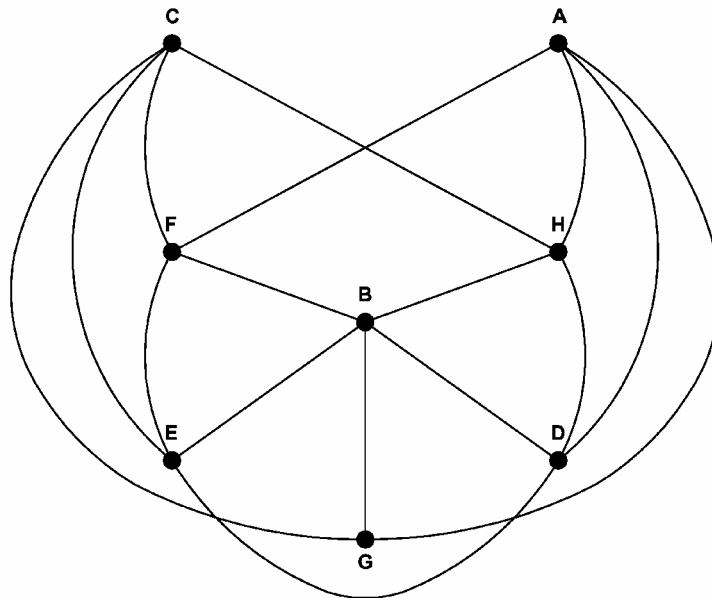


Рисунок 3.3 – Графік пересічних простих опуклих областей

Таблиця 3.2 – Зображення областей перетину, пов'язаних з кожною дугою на рис. 3-3

Дуга	Між вузлами	Зона перетину	Дуга	Між вузлами	Зона перетину
a	A – F	10000 10000	j	H – D	00001 00111
b	A – G	00100 10000	k	B – E	11100 00100
c	A – H	00001 10000	l	C – E	11100 00001
d	B – F	10000 00100	m	F – E	10000 00111
e	B – G	00100 00100	n	G – E	00100 00100
f	B – H	00001 00100	o	D – E	00100 00100
g	A – D	00111 10000	p	C – F	10000 00001
h	B – D	00111 00100	q	C – G	00100 00001
i	G – D	00100 00111	r	C – H	00001 00001

Проте, розгляд оптимальності призводить до двох ускладнень.

1. І вихідна, і кінцева точки можуть знаходитися всередині кількох різних вузлів (оскільки ми маємо пересічні первинні опуклі області). Таким чином, слід враховувати всі можливі шляхи, що походять від дійсних початкових вузлів і закінчуються на дійсних кінцевих вузлах.
2. Дуги не можуть мати фіксовану вагу, тому що будь-які дві точки в одній опуклій області не обов'язково рівновіддалені від точки в іншій опуклій області. Це означає, що переміщення від одного вузла до іншого залежить від того, де точки фактично розташовані в опуклих областях і мають обчислюватися кожного разу, коли вибирається сегмент шляху.

### 3.4 Динамічне планування траєкторії

Основна стратегія планування траєкторії передбачає обхід графіка від вузла, що містить вихідну точку, до вузла, що містить точку призначення. Перехід від вузла до наступного передбачає вибір точки на перетині двох областей. Однак, як пояснювалося раніше, вибір такої точки впливає на функцію витрат, пов'язану з переміщенням, і тому заслуговує на подальший розгляд.

Оскільки дуги графіка не можуть мати фіксовану вагу, функція витрат повинна динамічно розподіляти витрати між сегментами шляху в міру його проходження. Рис. 3.4 ілюструє обхід графа від вузла  $X_i$  до  $X_{i+1}$ , а потім або до

вузла  $X_{i+2}$ , або до  $X'_{i+2}$ . Нехай  $a$ ,  $b$  і  $b'$  позначають області перетину  $X_i$  і  $X_{i+1}$ ;  $X_{i+1}$  і  $X_{i+2}$ ; і  $X_{i+1}$  і  $X_{i+2}$ , а  $mid(b)$  і  $mid(b')$  – середини двох перетинів. Припустимо, що поточний шлях просунувся до точки  $C_i$  у вузлі  $X_i$ .

Щоб вибрати наступний відрізок найкоротшого шляху, потрібно вибрати вузли, до яких планується переміщення. У представленій процедурі розглядається лише один вузол. Потім сегменти шляху обчислюються таким чином.

Припускаючи, що обхід графіка  $X_i \rightarrow X_{j+1} \rightarrow X_{i+2}$ , з'єднують точки  $C_i$  та середину ( $b$ ) прямою лінією. Якщо лінія перетинає область  $a$ , то наступною обраною точкою шляху є точка, де лінія вперше перетинає  $a$ . З іншого боку, якщо пряма не перетинає  $a$ , то наступна точка, вибрана на шляху, є кутом  $a$ , який є найближчим до лінії. Цей другий випадок ілюструється обходом графа  $X_i \rightarrow X_{i+1} \rightarrow X_{i+2}$ . Вибрана точка позначається  $C_{i+1}$ , а сегмент шляху  $C_i \rightarrow C_{i+1}$  додається до поточного шляху. Оскільки нова точка  $C_{i+1}$  тепер знаходиться в  $X_{i+1}$ , подібну процедуру можна використовувати для продовження планування шляху до досягнення вузла призначення.

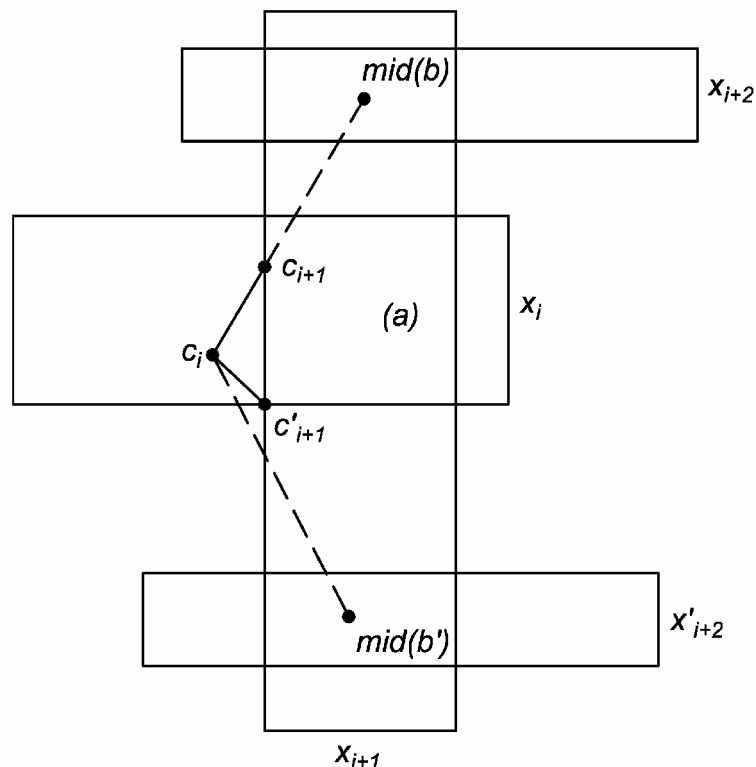


Рисунок 3.4 – Вибір сегмента траєкторії на основі відносного розташування майбутнього вузла

Можна побачити, що розподіл витрат на шлях розвитку відстає від обходу графіка на один крок. Отже, призначення вартості не може розпочатися, доки шлях вузла графіка не досягне принаймні третього вузла. Подібним чином, коли  $X_{i+1}$  є кінцевим вузлом призначення (і тому немає вузла  $X_{i+2}$ ), сама кінцева точка призначення використовується замість  $mid(b)$  у наведеному вище описі для обчислення останніх двох сегментів шляху. Використана техніка обходу графа підтримує два одночасних шляхи, один проходить через вузли графа,  $X_i$ , а інший – через точки шляху,  $C_i$ . Припускаючи, що  $X_i$  є поточним вузлом,  $C_{i-1}$  є поточною точкою на шляху, а  $S$  і  $D$  позначають набори початкових і кінцевих вузлів, відповідно, процедура виглядає таким чином:

**findnewnode** [ $X_{i+1}$ ]

Вибір  $X_{i+1}$  such that

an arc exists between  $x_i$  and  $X_{i+1}$

and  $X_{i+1}$  is not on current node path

and  $X_{i+1}$  is not in  $s$

and the arc between  $X_i$  and  $X_{i+1}$  is not marked {the arc has  
not already been considered and rejected}

**moveforward** [to  $X_{i+1}$ ]

Add  $X_{i+1}$  to current node path

Determine  $C_i$  {as explained earlier}

Add  $C_i$  to current point path

Add cost of segment  $C_{i-1} \rightarrow C_i$  to current cost

$i := i + 1$

**backtrack** [from  $X_{i+1}$  to  $X_i$ ]

Unmark all arcs originating from  $X_{i+1}$

Mark arc from  $X_i$  to  $X_{i+1}$

Reduce the current cost by the cost of  $C_{i-1} \rightarrow C_i$

Remove  $X_{i+1}$  from current node path

Remove  $C_i$  from current point path

$i := i - 1$

**path planning** {main program}

```

determine S, D; bestcost := ∞ , currentcost := 0
if S ∩ D ≠ nil then
    compute straight line path
else
    for every X0 ∈ S do
        i:= 0; backtrackflag := false
        findnewnode [Xi+1]
        while (newnode exists) or (i > 0) do
            if backtrackflag = true then
                backtrack [from Xf+1 to Xi]
                findnewnode [Xi+1]
            endif
            if newnode exists then
                moveforward
                if currentcost > bestcost then
                    backtrackflag := true
                else
                    if Xi+1 ∈ D then
                        copy best path
                        backtrackflag := true
                    else
                        findnewnode [Xi+1]
                    endif
                endif
            endif
        endwhile
    endwhile

```

### 3.5 Технологія обминання перешкод

Перешкоди на плані мають бути збільшені принаймні на половину

найдовшої сторони робота, щоб транспортний засіб не зіткнувся з об'єктами, проїжджаючи повз них.

На рис. 3.5 показано розширення непрямокутних меж і перешкод. Залежно від нахилу меж, для зміни розмірів перешкод можна використовувати менші або більші прямокутники. На рис. 3.6 показана сітка комірок, створена компонуванням на рис. 3.5. Слід зазначити, що клітинки, які є «недопустимими», викреслені.

Також слід зазначити, що «оптимальність» шляхів базується на припущенні, що робот має круглу форму. Якщо транспортний засіб непрямокутний, а перешкоди розташовані настільки близько, що найширша частина транспортного засобу не зможе пройти між ними (але найвужча частина зможе), тоді описаний тут метод не зможе знайти оптимальні шляхи.

Робот, описаний у розділі 2, є триколісним прямокутним транспортним засобом, тому ця проблема також поширюється на нього. Передбачається, що перешкоди будуть досить віддалені одна від одної, тому це не буде враховуватися.

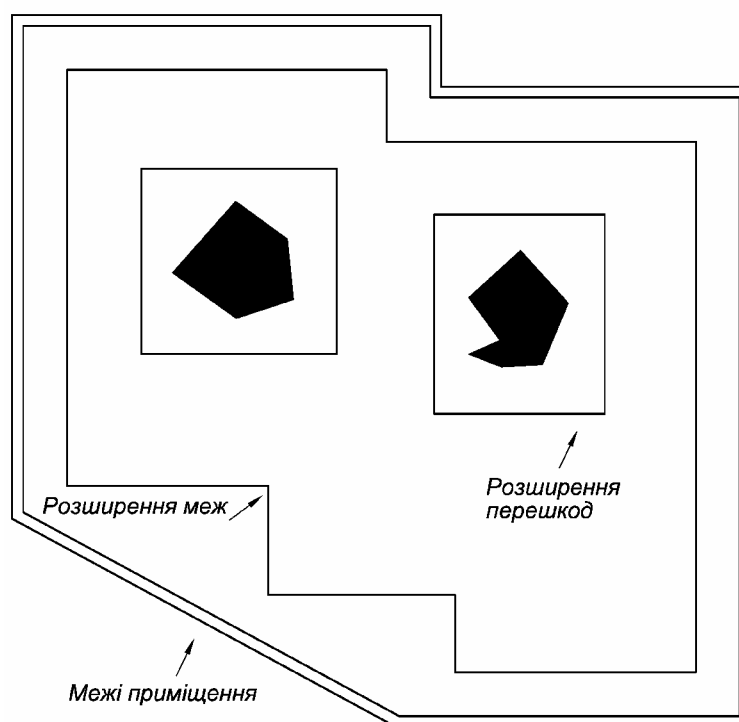


Рисунок 3.5 – Розташування перешкод і меж

Якщо існує перекриття або вирівнювання перешкод, кількість чітких меж

зменшується. Оскільки кількість вузлів, згенерованих у графі, тісно пов'язана з кількістю окремих ребер, вирівнювання або накладання зменшує обчислювальну складність представленого тут алгоритму.

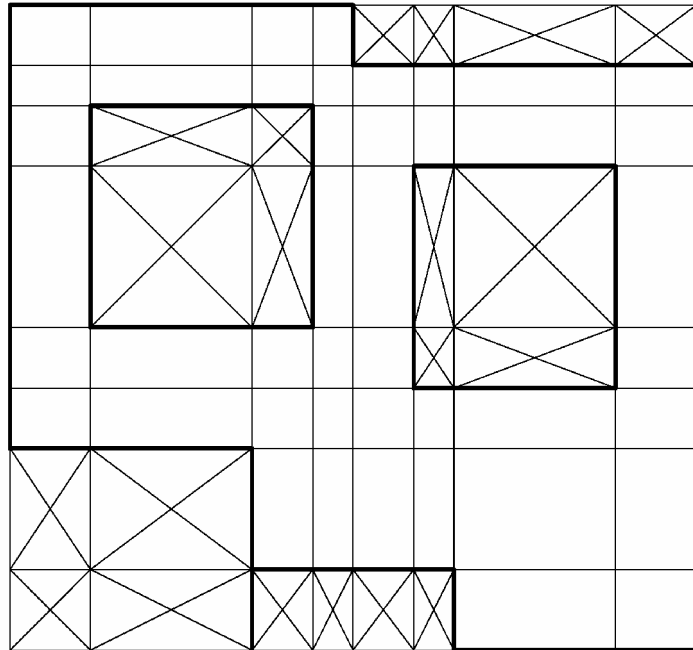


Рисунок 3.6 – Сітка, створена розділенням плану на рис. 3.5



## 4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 4.1 Загальне компонування системи

На рис. 4.1 зображене загальне компонування системи. Частина всередині пунктирних ліній реалізована як програмне забезпечення, призначене для роботи бортового комп'ютера. Інші блоки представляють апаратні компоненти.

Для конфігурації необхідні такі вхідні дані.

- Точки шляху: це набір точок, через які має пройти транспортний засіб. Необхідно запропонувати лише ті точки, де потрібне витягування.

Ці точки можуть бути або явно визначені, або можуть бути отримані з програми, яка базується на процедурах автоматичного планування шляху, (в цьому випадку потрібно вказати лише початкові та кінцеві точки та орієнтації).

- Номінальний радіус: це радіус кривизни за замовчуванням, який транспортний засіб використовуватиме під час повороту. Цей радіус залежатиме від завантаженості транспортного засобу та необхідної швидкості.

- Номінальна швидкість: швидкість за замовчуванням, з якою рухатиметься транспортний засіб. Для гострих кутів та/або важких вантажів швидкість транспортного засобу може знадобитися змінити.

Блок, позначений PATH REFITTING, описано в розділі 2. Цей блок генерує набір векторів, що відповідають положенню транспортного засобу та орієнтації в кожній із точок (вторинного) шляху. Наступний блок, позначений як PATH CONTROL, відповідає за виділення пар векторів і передачу їх до наступного блоку, позначеного як DRIVER.

Потрібні фактичні довжини дуг і кут повороту рульового колеса визначаються в розділі 2 і надсилаються до апаратного контролера приводу, який відповідає за фізичне виконання руху транспортного засобу шляхом, визначеним цими параметрами.

Кути маяка необхідно змінити, щоб компенсувати рух робота перед тим, як алгоритм LOCATE можна використовувати для отримання корекції. Потім

головний комп'ютер оцінює помилку, яка накопичилася в бортовому навігаторі і передає помилку назад йому. Ця періодична корекція підтримує курс навігаційної системи.

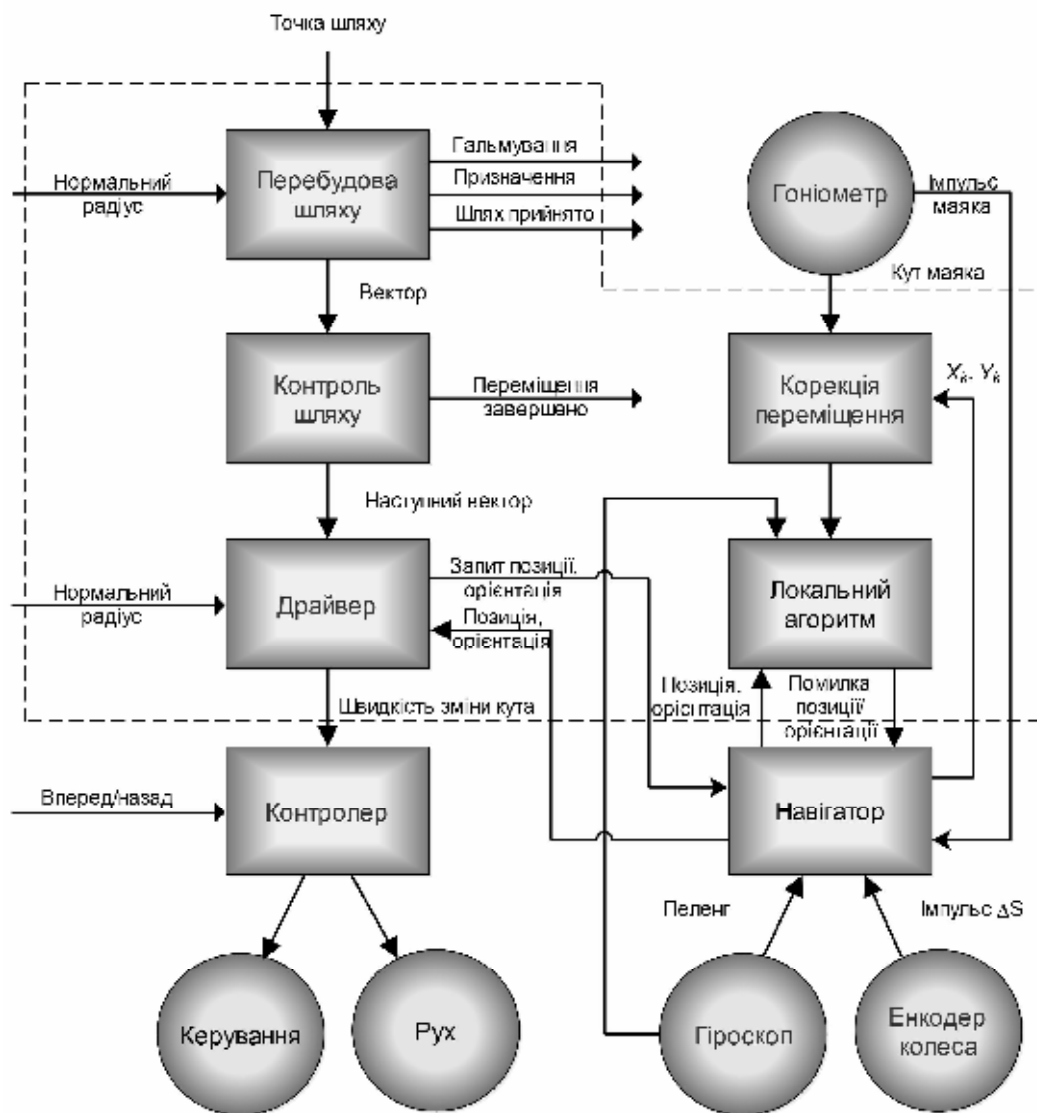


Рисунок 4.1 – Функціональна блок-схема всієї системи

## 5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 5.1 Моделювання руху робота

Рис. 5.1 показує набір точок (позначених ×), які спочатку можуть бути надані транспортному засобу для проходження. Також показано другорядні точки (позначені •) і накладаються на основний шлях.

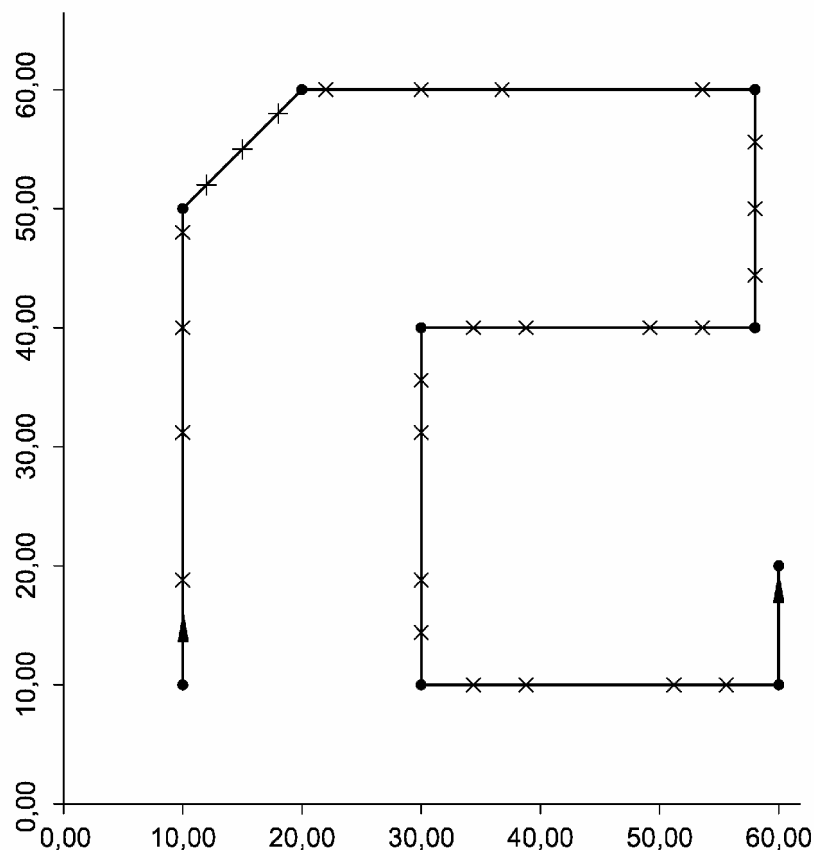


Рисунок 5.1 – Первинні та вторинні точки на заданій траєкторії

На рис. 5.2 показаний шлях транспортного засобу, який слідує другорядним точкам за допомогою розробленої методики. Моделювання, виконане тут, ігнорує такі фактори, як пробуксовка коліс, повільна реакція керма, тертя та відцентрові сили на транспортному засобі. У реальній ситуації транспортний засіб відхилятиметься від ідеальної траєкторії. Однак, методика, описана в п. 2.2.3, автоматично виправить ці помилки шляхом динамічного коригування наступних дуг шляху.

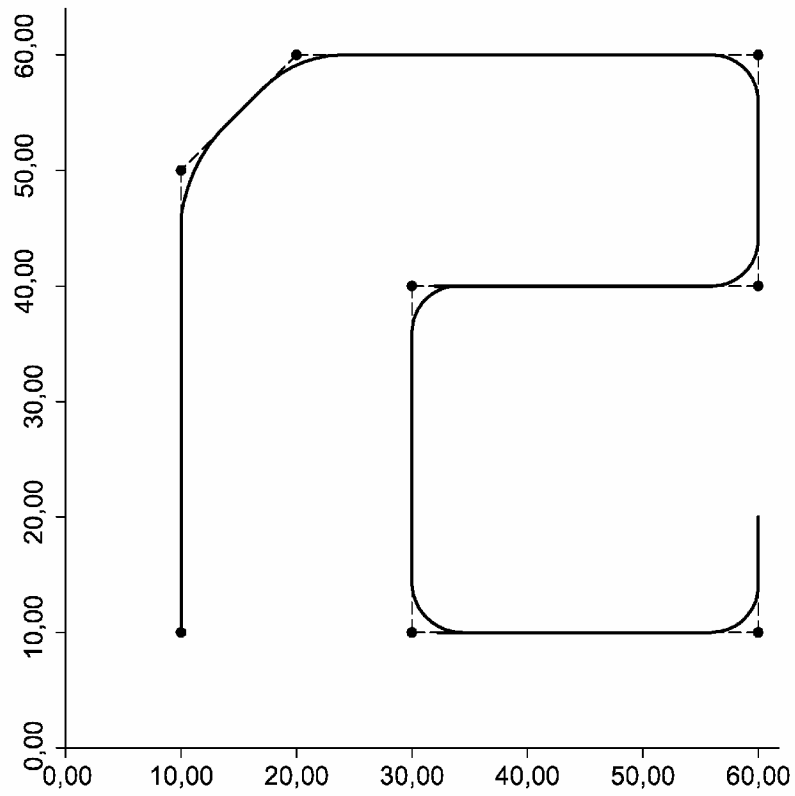


Рисунок 5.2 – Ідеальна траєкторія для точок, зазначених на рис. 5.1

На рис. 5.3 показано результати моделювання, коли транспортний засіб не переміщується ідеальним шляхом через часову затримку реакції рульового керування.

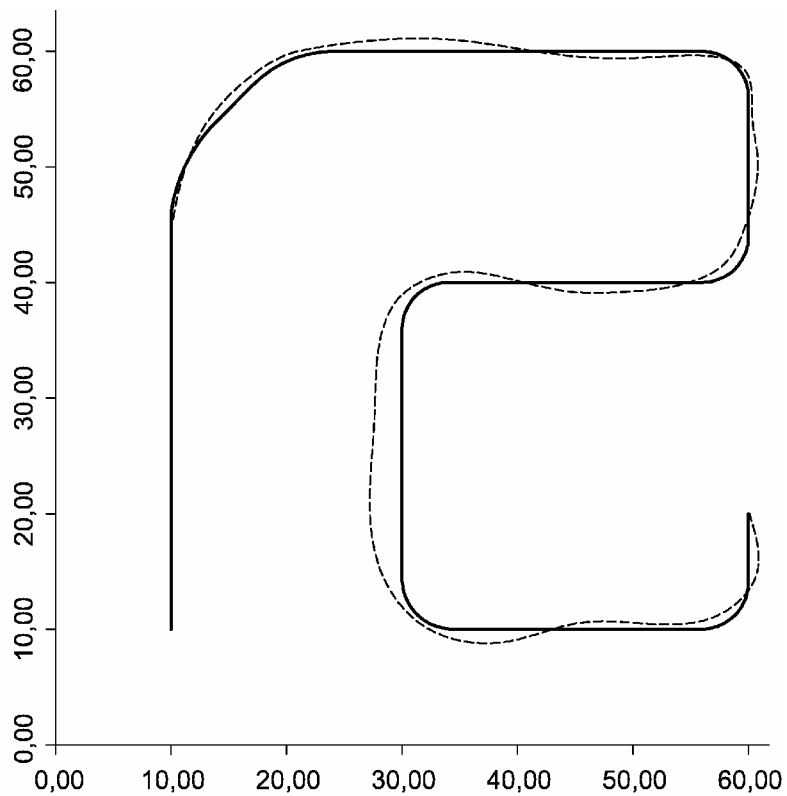


Рисунок 5.3 – Відхилення від ідеальної траєкторії та компенсації

На рис. 5.4 показано інший набір точок, які спочатку можуть бути надані транспортному засобу для проходження.

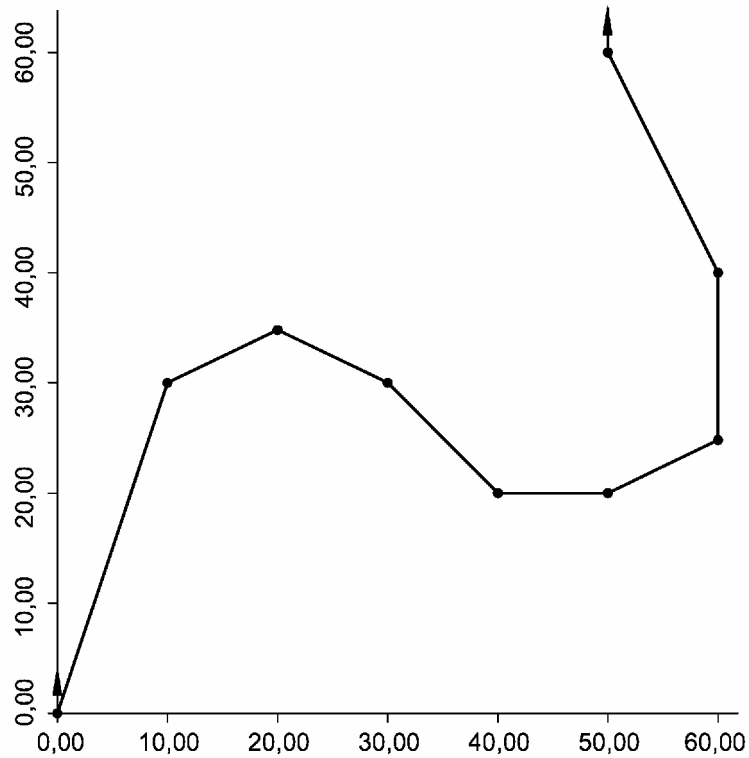


Рисунок 5.4 – Первинні та вторинні точки на заданій траєкторії

На рис. 5.5 зображено ідеальну траєкторію транспортного засобу.

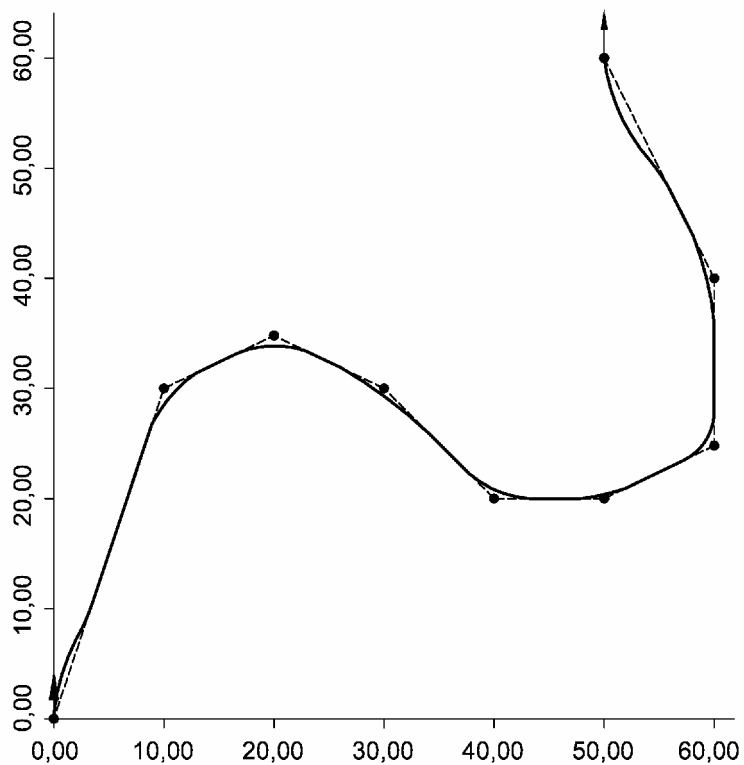


Рисунок 5.5 – Ідеальна траєкторія для точок, зазначених на рис. 5.4

З цих результатів зрозуміло, що розроблені алгоритми достатні для створення гладкого шляху, що проходить через задані точки. Методика компенсації динаміки транспортного засобу в окремих точках шляху є успішною, оскільки не дозволяє транспортному засобу відхилитися в значній мірі від ідеального шляху.

## 5.2 Моделювання планування траєкторії

Описаний алгоритм було застосовано для кількох випадків із 3 перешкодами та одного з 4 перешкодами. Як було зазначено раніше, складність обчислення пошуку шляхів у середовищі пропорційна кількості різних ребер у цьому середовищі.

Відповідно, найкращий випадок – це той, де межі точно співпадають (рис. 5.6, 5.10). Рис. 5.8 показує найгірший випадок, можливий для 3 перешкод. Це може бути, видно, що коли ця ситуація хоч трохи змінюється (рис. 5.9), складність, пов'язана з середовищем, значно зменшується.

Для кожного випадку представлено кількість вузлів і дуг у згенерованому графі. Далі для кожного випадку було обчислено 5 зразків шляхів. В таблицях 5.1 -5.4 наведено кількість початкових і кінцевих вузлів, а також представлено відхилення від оптимальної траєкторії та необхідний час обчислення.

Таблиця 5.1 – Порівняння траєкторій в найкращому випадку: 3 перешкоди

Розмір сітки: 3x7 Кількість дуг у створеному графіку: 8 Кількість виділених вузлів (опуклих форм): 6 Час налаштування графіка: 0,091 с				
Шлях	Кількість вихідних вузлів	Кількість вузлів призначення	% відхилення від опт.	Час обчислення (с)
l – e	2	2	0	0,003
b – h	2	2	0	0,066
a – g	2	2	0	0,070
c – i	1	2	0	0,065
l – f	2	2	0	0,071

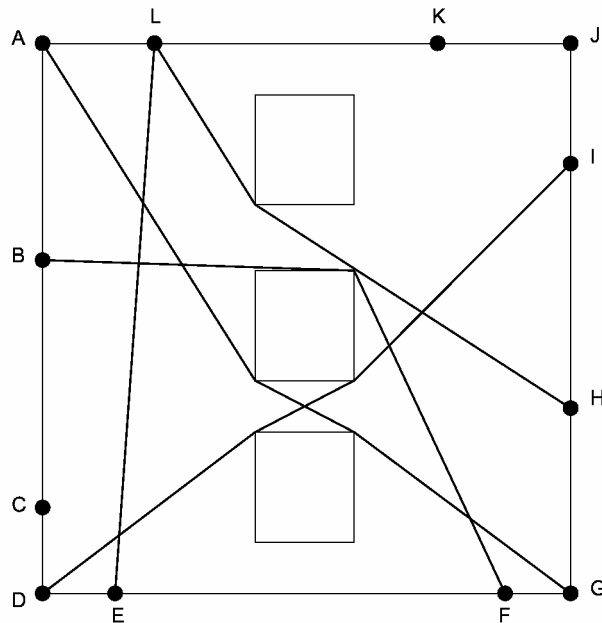


Рисунок 5.6 – Приклади траекторій для найкращого випадку: 3 перешкоди

Таблиця 5.2 – Порівняння траекторій в середньому випадку: 3 перешкоди

Розмір сітки: 6x7  
 Кількість дуг у створеному графіку: 18  
 Кількість виділених вузлів (опуклих форм): 9  
 Час налаштування графіка: 0,499 с

Шлях	Кількість вихідних вузлів	Кількість вузлів призначення	% відхилення від опт.	Час обчислення, (с)
l – e	2	3	0,00	0,003
b – h	1	1	0,70	2,190
a – g	2	3	0,00	0,508
c – i	2	1	0,05	1,578
l – f	2	3	0,80	0,505

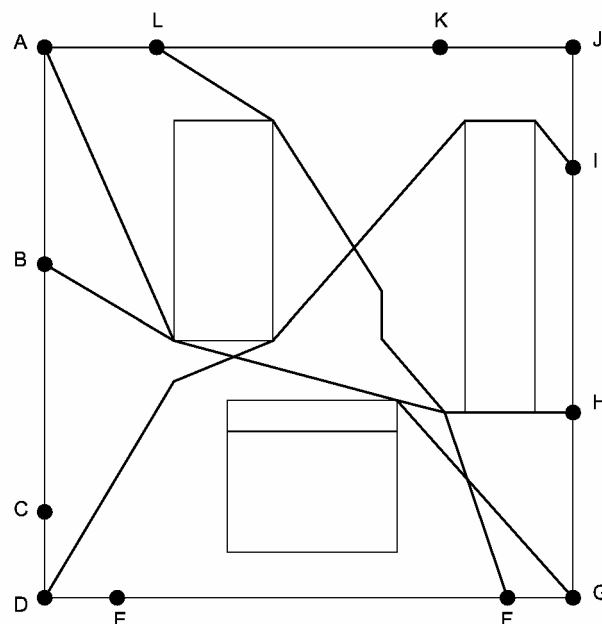


Рисунок 5.7 – Приклад траекторій для середнього випадку: 3 перешкоди

Таблиця 5.3 – Порівняння траєкторій в найгіршому випадку: 3 перешкоди

Розмір сітки: 7x7				
Кількість дуг у створеному графіку: 44				
Кількість виділених вузлів (опуклих форм): 13				
Час налаштування графіка: 0,765 с				
Шлях	К-ть вихідних вузлів	Кількість вузлів призначення	% відхилення від опт.	Час обчислення, (с)
l – e	2	3	0,00	0,003
b – h	4	3	0,00	23,684
a – g	2	3	0,03	851,266
c – i	2	2	0,00	320,903
l – f	2	3	0,00	738,136

Таблиця 5.4 – Порівняння траєкторій в гіршому випадку: 3 перешкоди

Розмір сітки: 7x7				
Кількість дуг у створеному графіку: 37				
Кількість виділених вузлів (опуклих форм): 12				
Час налаштування графіка: 0,645 с				
Шлях	Кількість вихідних вузлів	Кількість вузлів призначення	% відхилення від опт.	Час обчислення, (с)
l – e	2	3	0,00	0,003
b – h	4	3	0,00	5,579
a – g	2	3	0,00	129,470
c – i	2	2	0,00	77,619
l – f	2	3	0,00	128,113

Таблиця 5.5 – Порівняння траєкторій в найкращому випадку: 4 перешкоди

Розмір сітки: 3x9				
Кількість дуг у створеному графіку: 10				
Кількість виділених вузлів (опуклих форм): 7				
Час налаштування графіка: 1,436 с				
Шлях	Кількість вихідних вузлів	Кількість вузлів призначення	% відхилення від опт.	Час обчислення, (с)
l – e	2	2	0,00	0,003
b – h	1	1	0,00	0,253
a – g	2	2	0,00	0,199
c – i	1	2	0,00	0,193
l – f	2	2	0,00	0,189



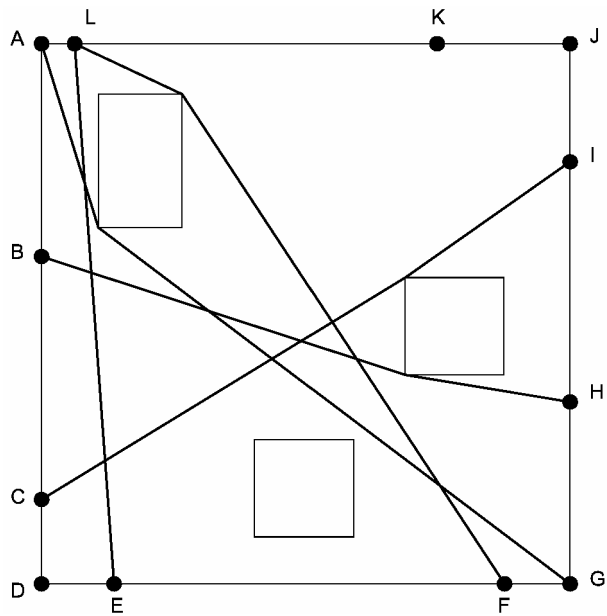


Рисунок 5.8 – Приклади траєкторій для найгіршого випадку орієнтації 3 перешкод

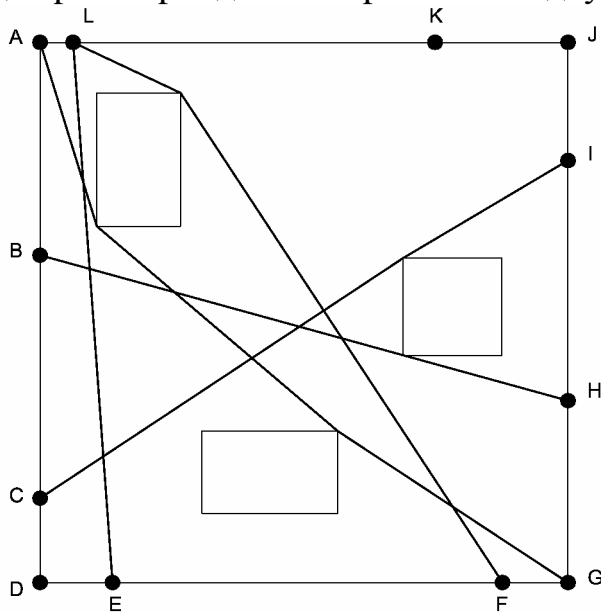


Рисунок 5.9 – Приклад траєкторії для найгіршої орієнтації 3 перешкод

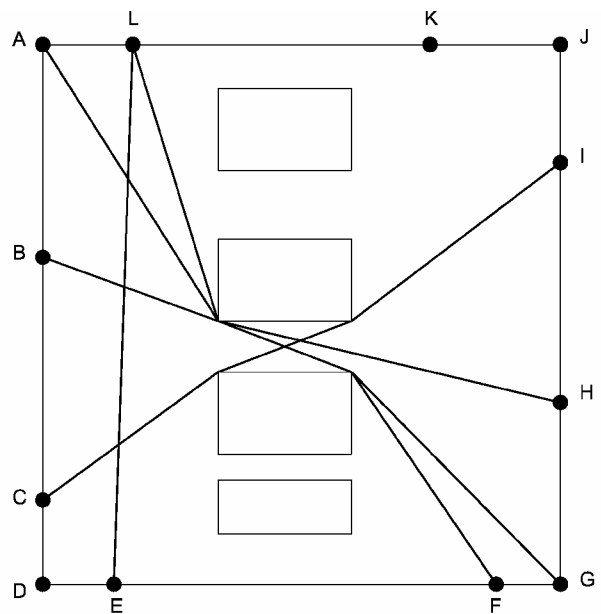


Рисунок 5.10 – Приклад траєкторії для найкращого випадку орієнтації 4 перешкод  
Результати цього моделювання показують, що в усіх сценаріях час,

необхідний для налаштування графіка, дуже малий. Оскільки використовуваний алгоритм спочатку виділяє горизонтальні смуги, використовує їх для створення  $s$  груп і проходить  $s-1$  ітерацій, його складність дорівнює  $O(ks^2)$ .

Змінна  $k$  представляє внесок у складність набору елементів у групі і тому залежить від кількості вертикальних ребер. Ця сильна залежність часу, необхідного для налаштування графіка, від кількості горизонтальних смуг: може бути проілюстрована. шляхом моделювання середовища, ідентичного тому, що на рис. 5.10, але повернуто на  $90^\circ$ . Тепер кількість горизонтальних смуг зменшується з 9 до 3, відповідно час налаштування зменшується з 1,436 с до 0,321 с.

Ці результати також показують, що в більшості випадків отримані шляхи є оптимальними. Відхилення від оптимальності (менше 0,8%), які спостерігаються в 4 з 25 шляхів вибірки є результатом неадекватності лише одного вузла, що передбачає випередження.

Помічено, що представлений алгоритм 3 недостатньо підходить для обробки ситуацій, коли на графі є велика кількість вузлів і дуг, за прийнятний проміжок часу. Це пояснюється тим, що існуючий алгоритм потребує повторного пошуку великих частин графіка.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ**

#### **6.1.1 Ергономічні вимоги до організації трудових процесів та робочих місць**

В умовах науково-технічного прогресу та постійної зміни умов трудової діяльності виникає потреба в оптимізації взаємовідносин в системі «середовище – людина – машина» (СЛМ). Цими питаннями займається ергономіка – наука, яка вивчає проблеми в системі СЛМ з метою оптимізації трудової діяльності, підвищення продуктивності праці та створення комфортних та безпечних умов праці, збереження здоров'я та працездатності працівників.

Ергономіка висуває низку вимог до організації трудових процесів: економічні, психофізіологічні, психологічні, антропометричні, біомеханічні, гігієнічні, естетичні та соціальні.

Економічні вимоги ергономіки передбачають підвищення технічного оснащення праці, вибір оптимальної технології, найповніше використання технологічного обладнання, обґрунтування оптимального ритму і темпу праці та раціональну організацію робочого місця.

Психофізіологічні вимоги ергономіки передбачають встановлення відповідності між енергетичними, швидкісними, зоровими та іншими фізіологічними особливостями людини та елементами технологічного процесу виробництва, зниження нервово-емоційних напружень та фізичних навантажень, обґрунтування оптимальних режимів праці та відпочинку.

Психологічні вимоги ергономіки передбачають встановлення відповідності між спадковими і набутими рефlekсами, можливостями пам'яті і мислення та елементами технологічного процесу виробництва.

Антропометричні та біомеханічні вимоги ергономіки передбачають встановлення відповідності між знаряддями праці, розмірами та масою тіла людини, силою і напрямком рухів.

Гігієнічні вимоги ергономіки передбачають забезпечення комфортних метеорологічних умов середовища, оптимального фізико-хімічного складу повітря, належних рівнів освітленості, виробничого випромінювання, шуму та вібрації.

Естетичні вимоги ергономіки передбачають встановлення відповідності між естетичними потребами людини та художньо-конструкторським оформленням робочих місць та виробничого середовища.

Соціальні вимоги ергономіки передбачають підвищення змісту праці, творчої активності працівника, ефективності управління виробничими процесами та персоналом.

На сучасному етапі розвитку виробництва наукова організація праці забезпечує розв'язання трьох головних завдань:

- економічного, яке полягає у якнайкращому поєднанні техніки та людей в єдиному виробничому процесі, забезпеченні найефективнішого використання матеріальних і трудових ресурсів і подальшому підвищенні продуктивності праці;
- психофізіологічного, яке передбачає створення найсприятливіших умов праці, що забезпечують підвищення працездатності із одночасним збереженням здоров'я людини у процесі трудової діяльності;
- соціального, яке передбачає виховання людини, її творче зростання та самовдосконалення під час професійної діяльності.

Всі ці завдання взаємопов'язані, їхнє успішне вирішення ґрунтується на комплексному використанні досягнень економічних, технічних, біологічних, соціальних та інших наук і реалізується за такими напрямками:

- впровадження раціональних форм поділу й кооперації праці, які б найповніше відповідали сучасній техніці;
- удосконалення організації й обслуговування робочих місць, їхнє правильне планування та забезпечення раціональним технологічним обладнанням;
- впровадження передових прийомів і методів праці, які у сучасних умовах дедалі більше переходять у прийоми керування складними агрегатами, автоматизованим устаткуванням, системами машин й автоматичними

процесами;

- підготовка й підвищення кваліфікації кадрів, які передбачають не лише набуття потрібних для цієї професії знань і навичок, підвищення ділової кваліфікації працівників, а й їхній всебічний розвиток, зростання загального культурно-технічного рівня, виховання таких людських чеснот, як почуття відповідальності;
- удосконалення нормування праці, яке, з одного боку відображає ступінь участі кожного працівника в суспільному виробництві, а з іншого, характеризує досягнутий рівень організації праці;
- поліпшення умов праці, яке передбачає широку комп'ютеризацію трудового процесу та створення оптимальних кліматичних умов (температури, вологості, рухливості та іонізації повітря), раціонального освітлення робочих місць, усунення запиленості й загазованості повітря, шкідливих випромінювань, шуму й вібрації, забезпечення психофізіологічних вимог та вимог виробничої естетики, поліпшення санітарно-побутового обслуговування працівників на виробництві;
- виховання працівників у дусі найсуворішого додержання державної і трудової дисципліни, посилення відповідальності працівників за власну та колективну безпеку.

Економічну доцільність різних форм поділу й кооперації праці визначають тим, як вони забезпечують підвищення ефективності виробництва, зростання продуктивності праці, поліпшують використання основних виробничих фондів, матеріальних і трудових ресурсів. Насамперед треба виходити з можливостей максимального скорочення тривалості виробничого циклу. Це досягається на основі раціонального поділу праці, яка дає змогу здійснити паралельне виконання робіт різними виконавцями. Психофізіологічну межу поділу праці визначають за умовою нормального функціонування людського організму. Поєднання трудових функцій повинно бути оптимальним щодо фізичних і нервових навантажень і не викликати негативних наслідків. Бажано, щоб робота складалась із різноманітних елементів, виконання яких забезпечувало б участь різних груп м'язів і чергування навантажень на різні частини тіла й органи чуття людини. Разом з тим, дроблення

трудового процесу на операції позбавляє працю монотонності. Під час досліджень фізіологи встановили, що коли тривалість одноманітних прийомів і дій, які повторюються, становить менше 30 с, то це негативно позначається на продуктивності праці. З соціального погляду, поділ праці повинен мати межі, що забезпечують достатню змістовність і привабливість праці, умови для розвитку творчих здібностей людини.

### **6.1.2 Організація та обслуговування робочих місць**

Робоче місце – це зона трудових дій працівника, обладнана для виконання певних операцій виробничого процесу. На одному робочому місці можуть працювати два або кілька працівників, які виконують спільне завдання.

Робоча зона – це площа, де безпосередньо розміщені всі засоби виробництва, які використовує працівник або група працівників для здійснення трудового процесу, і сам працівник, який виконує виробничу операцію. Робоче місце є первинною низовою ланкою у виробничому процесі підприємства, тому його вдосконалення є одним із головних пріоритетів наукової організації праці. Метою наукової організації робочого місця є забезпечення найпродуктивнішого і найповнішого використання його матеріально-технічних і трудових ресурсів; безперебійного ходу виробництва відповідно до запроектованих і науково обґрунтованих технологічних процесів; найсприятливіших психофізіологічних, санітарно-гігієнічних і естетичних умов праці. Виходячи з цих головних завдань, наукова організація робочого місця забезпечує створення працівникові всіх необхідних умов для високопродуктивної і високоякісної праці за можливо менших фізичних зусиль і мінімального нервового напруження та передбачає:

- оснащеність робочого місця відповідним його призначенню основним і допоміжним устаткуванням, технологічною й організаційною оснасткою, засобами зв'язку; раціональне планування, тобто найзручніше і найефективніше розміщення усіх елементів робочого місця для трудового процесу;
- забезпечення безперебійного обслуговування робочого місця допоміжними

службами;

- створення безпечних і здорових умов праці.

Залежно від рівня виробництва робочі місця розрізняють за змістом здійснюваних на них процесів праці, характером технічного оснащення, а також за ступенем технологічного взаємозв'язку з іншими ланками підприємства. Оскільки головним елементом трудового процесу є людина, організація робочого місця має спиратися на забезпечення їй необхідних зручностей. Тому підбирати устаткування й оснастку, а також планувати робочі місця треба з урахуванням антропометричних особливостей людини.

## **6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **6.2.1 Небезпеки сучасного урбанізованого середовища**

Сучасній людській цивілізації властиві стрімкі темпи урбанізації. Вони вирішально зумовлені двома факторами – «демографічним вибухом» другої половини ХХ ст. та науково-технічною революцією в усіх сферах.

Урбанізація (від лат. *urbanos* – міський) означає процес зростання міст і міського населення та підвищення їх ролі в соціально-економічному та культурному житті суспільства. Способи виникнення міст в історії людства були різними. Міста виникали як сумісні поселення ремісників, що полегшувало їх виробничу діяльність, як центри торгівлі, як воєнні укріплення (фортеці).

Процес світової урбанізації розпочався в Європі, де вперше почали формуватися міста завдяки концентрації засобів виробництва, великої промисловості. Становлення урбанізації почалося на зламі ХVІІІ— ХІХ ст., коли міста в Західній Європі зосереджували найважливіші засоби виробництва й посідали ключові позиції у світовій економіці. Локальний розвиток міст породив певну просторову послідовність світового процесу урбанізації: Західна Європа – Північна Америка – Австралія та Океанія – Східна Європа – Латинська Америка – Азія – Африка.

А сьогодні в багатьох країнах світу, особливо економічно розвинутих,

частка міського населення становить 85-90% і більше в загальній його чисельності. З'являються і зростають багатомільйонні міста-мегаполіси (Нью-Йорк, Лондон, Токіо та ін.), збільшується їх кількість, розміри та проблеми.

Урбанізацію неможливо розглядати без зв'язку з розвитком виробництва, зокрема важкої індустрії, енергетики, хімічної промисловості тощо. Разом з нарощуванням промислового потенціалу, створенням нових галузей виробництва у великих містах зростає чисельність населення. Сучасні великі міста – це центри зосередження багатогалузевої промисловості, розгалуженої транспортної мережі в густо населених житлових масивах. Причому найважливішим джерелом зростання міського населення була й все ще залишається міграція сільських жителів у міста. На неї припадає більше половини приросту міського населення в Україні.

Сучасне місто надає своїм жителям багато переваг економічного, соціального та суб'єктивного характеру, а саме:

- наявність місць роботи та можливість зміни роботи;
- зосередження закладів науки та культури;
- забезпечення висококваліфікованої медичної допомоги;
- можливість створювати кращі житлові та соціально-побутові умови життя;
- розвиток міжнародної та регіональної культури.

Незважаючи на переваги міського життя, міське середовище для людей є штучним і відірваним від природного, того, в якому тисячоліттями проходило їхнє життя. Штучне міське середовище шкідливо впливає на здоров'я населення через забруднення атмосферного повітря, дефіцит сонячного проміння, води, а також стресові фактори, зумовлені напруженим ритмом життя, скупченістю населення, недостатністю зелених насаджень тощо. Також небезпеку для здоров'я людей у місті становлять шумові, вібраційні навантаження, транспортні проблеми, вплив електричних, магнітних, іонізаційних полів.

Отже, в умовах великого міста загострюються всі сторони життєзабезпечення людей: постачання достатньої кількості повноцінних продуктів харчування та питної води, контроль і запобігання забруднення повітря, водних ресурсів, ґрунтів, утилізація та захоронення нагромаджуваних шкідливих



виробничих та побутових відходів, а також соціальні проблеми, пов'язані з різким зменшенням вільного «життєвого» простору, зростанням міст у висоту, збільшенням захворювань, зумовлених забрудненням, та інші.

Визначимо основні небезпеки життя в урбанізованому середовищі.

Забруднення атмосфери міст

Основними джерелами забруднення атмосфери міста є транспорт, енергетичні системи міста та промисловість.

У містах зосереджена основна маса транспортних засобів. Це вантажний, власний та громадський транспорт. Автотранспорт дає 70% усіх токсичних викидів в атмосферу.

Міста – основні споживачі енергії. Місто споживає енергію у різних формах. Досить широко використовується викопне паливо – кам'яне вугілля, нафтопродукти та природний газ. Це вже само по собі визначає забруднення міст продуктами згорання. До житлових будинків та виробничих приміщень енергія потрапляє у формі електрики, газу, парового опалення.

Зниження якості атмосферного повітря небезпечно для здоров'я міських мешканців. Людина за добу вживає в середньому 25 кг повітря. Навіть, якщо відносний вміст забруднювачів в повітрі незначний, їх сумарна кількість, яка потрапляє в організм людини при диханні, може виявитись токсичною.

Найбільш поширеною шкідливою домішкою повітряного середовища є чадний газ. Надмірна кількість цього газу в повітрі призводить до швидкої втомлюваності людини, головного болю, запаморочення, ослаблення пам'яті, порушення діяльності серцево-судинної та інших систем організму.

Забруднення міських приміщень. Специфіка проживання в місті призводить до того, що люди 80-95% свого часу проводять в приміщеннях (житлові будинки, метрополітен, службові приміщення тощо). Одним з показників якості міського життя є повітря приміщень.

Згідно з оцінкою Агентства з охорони навколишнього середовища США, повітря всередині міських приміщень забруднено в 100 разів більше, ніж зовні.

Основні токсичні матеріали, що містяться в приміщеннях – це олійні фарби і розчинники, килимовий клей, меблевий лак, із яких виділяються бензол, толуол

та інші речовини.

Причини забруднення повітря приміщень.

Заходи щодо поліпшення якості повітря приміщеннях:

- домашні рослини (очищення повітря, протидія токсинам тощо);
- замість освіжувала повітря використовувати оцет, наливши його в тарілку і поставивши на 1-2 години в кімнаті; в закритих невеликих приміщеннях (холодильники, туалет) поставити відкриту коробочку з харчовою содою; внести в кімнату свіжу гілку ялини або сосни;

- замість відбілювачів використовувати харчову соду або буру;

- робити регулярне вологе прибирання приміщення, а також провітрювання;

- обладнати кухню витяжною шафою;

- не залишати відкритими пляшки з миючими та дезінфікуючими засобами.

Шумове, вібраційне та електромагнітне забруднення міст.

Для мешканців міста шум — справа звичайна. Досить часто людина навіть не замислюється над його протиприродністю. В будь-якому регіоні міста шумить автотранспорт, з певним шумом працює підприємство. В квартирах шумлять холодильники і пральні машини, в під'їздах – ліфти. Цей перелік можна продовжити. Якщо шуму так багато в нашому житті, може здатися, що він нешкідливий. Однак за своїм впливом на організм людини шум більше шкідливий, ніж хімічне забруднення.

За останні 30 років у всіх великих містах шум збільшився на 12-15 дБ, а суб'єктивна гучність виросла в 3-4 рази. Шум знизив продуктивність праці на 15-20%, суттєво підвищив ріст захворюваності. Експерти вважають, що у великих містах шум скорочує життя людини на 8-12 років.

Частота захворювань серцево-судинної системи у людей, які живуть у зашумлених районах, у кілька разів вища, а ішемічна хвороба серця у них трапляється утричі частіше. Зростає також загальна захворюваність.

Особливо вражає вплив шуму на міських жителів. Якщо на 100 тисяч сільських мешканців припадає 20-30 тих, хто погано чує, то в містах ця цифра вираостає в 5 разів.

За даними статистики, жителі великих міст втрачають гостроту слуху вже з

30 років (в нормі – в 2 рази пізніше).

Під впливом шуму погіршується сон та сприйнятливність до навчання. Діти стають більш агресивними та вередливими.

Для позначення комплексного впливу шуму на людину медики ввели термін – «шумова хвороба». Симптомами цієї хвороби є головний біль, нудота, дратівливість, які досить часто супроводжуються тимчасовим зниженням слуху. До шумової хвороби схильні більшість мешканців великих міст, які постійно отримують шумові навантаження. Наприклад, нормативні рівні звуку для мешканців житлових кварталів повинні становити 55 дБ вдень і 45 дБ вночі.

Однак різні джерела техногенного шуму вносять вагомий внесок у звукове середовище міста. У сучасних міських районах зі значним рухом транспорту рівень шуму близький до небезпечної межі в 80 дБ.

Шум діє на організм людини не тільки прямо й опосередковано. Шум має й інші можливості впливу. Так, у міських умовах тривалість життя дерев коротша, ніж у сільській місцевості. Головною причиною цього є вплив інтенсивного шуму. При дії шуму в 100 дБ рослини виживають 10 днів. При цьому швидко гинуть квіти і уповільнюється ріст рослин.

Отже, шум шкідливий, але чи можна зменшити його вплив на живі організми, включаючи людину? Виявляється, можливо, і таких заходів багато. Насамперед, необхідно суворо дотримуватись чинних нормативів. На сьогодні на вулицях великих міст шум не спускається нижче 80 дБ.

Для того щоб зменшити цей рівень, докладаються значні зусилля, насамперед, з удосконалення самої техніки. Конструктори працюють над малошумними двигунами й транспортними засобами, житлові забудови віддаляють від вуличних магістралей, останні відокремлюють від будинків бетонними екранами, поліпшують покриття.

Ефективним заходом боротьби з шумом в містах є озеленення. Дерев, які посаджені близько одне від одного, оточені густими кущами, значно знижують рівень техногенного шуму і покращують міське середовище.

До негативних фізичних чинників міста належить також вібрація. Джерелами вібрації в містах є: рейковий транспорт, автомобільний транспорт,

будівельна техніка, промислові установки.

Зазвичай вібрація розповсюджується від її джерела на відстань до 100 м. Найбільш потужне джерело вібрації – залізничний транспорт.

Коливання ґрунту поблизу залізниці перевищує землетрус силою 6-7 балів. В метро інтенсивна вібрація розповсюджується на 50-70 м.

Несприятливо впливають на організм людини і електромагнітні випромінювання промислової частоти (50 герц) та частот радіохвильового діапазону. В помешканнях електромагнітні поля створюють: радіоапаратура, телевізори, холодильники тощо, що становить певну небезпеку.

Якщо поруч знаходиться постійне джерело електромагнітного випромінювання, яке працює на аналогічній (чи є кратною) частоті, що може призвести до збільшення або зменшення нормальної частоти роботи людського органа, то наслідком цього можуть бути головний біль, порушення сну, перевтома, навіть загроза виникнення стенокардії.

Найбільш небезпечним випромінювання є тоді, коли людина спить. Безперечно, обійтися без електропобутових приладів неможливо, та й не потрібно. Головне – дотримуватись певних правил:

- у спальні не варто встановлювати комп'ютер, «базу» для радіотелефона, а також вмикати на ніч пристрої для підзарядки батарейок та акумуляторів;
- телевізор, музичний центр, відеомагнітофон на ніч треба вимикати з електромережі;
- електронний будильник не повинен стояти в головах;
- потужність мікрохвильових печей може змінюватись, тому час від часу контролювати рівень випромінювання.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаних робіт було досліджено, розроблено, змодельовано та протестовано алгоритм керуванням автоматизованим транспортним засобом. Основною перевагою запропонованого алгоритму є використовуваних методів самостійного визначення місцезнаходження, який полягає в тому, що застосовується одночасно дві взаємозалежні системи, які разом забезпечують точне положення транспортного засобу.

Бортовий навігатор відстежує приблизне положення мобільного робота, і використовуючи цю інформацію, гоніометр забезпечує точне «виправлення». Загалом покази гоніометра дозволяють встановити та усунути зміщення помилок, створених в бортовому навігаторі.

Теоретично можна отримати показання гоніометра двічі на секунду, але насправді потрібно лише отримати «виправлення» на частоті, яка обмежить зсув помилки бортового навігатора до певного порогу.

В ході експериментальних досліджень було прийнято два спрощення. Перше – корекція на рух. В даному випадку приймається, що траєкторія транспортного засобу під час зчитування максимально наближена до маяків.

В майбутньому можна буде використати кращу модель реакції транспортного засобу. Крім того, прискорення обертання гоніометра відповідно зменшить похибку в кутах, під якими виявляються маяки. Наприклад, якщо транспортний засіб рухається зі швидкістю  $v$ , час, необхідний для одного оберту гоніометра, дорівнює  $t$ , і якщо транспортний засіб рухається так, що він рівновіддалений від маяка (відстань  $d$ ) на початку та в кінці обертання, тоді максимальна помилка (без поправки) через рух дорівнює:  $t \cdot v$ . Якщо обертання гоніометра прискорюється в  $m$  разів, то похибка зменшується також в  $m$  разів. По суті цей підхід зменшить похибку, спричинену шляхом створення наближення руху транспортного засобу протягом часу, необхідного для отримання «виправлення».

Другий напрям, який слід покращити в майбутньому, – це динамічний

зворотний зв'язок, який використовується для керування кутом повороту керма під час руху транспортного засобу за визначеною траєкторією. Наразі, зворотний зв'язок щодо положення та пеленгу отримується максимум два рази між двома вказаними точками на шляху.

Розроблена процедура планування траєкторії має багато переваг. Вона враховує всі найбільші (прямокутні) опуклі області на плані та дозволяє використовувати більшість прямих, сегменти траєкторії можна знайти дуже ефективно. Крім того, якщо вихідна і кінцева точки належать одній опуклій області, оптимальний шлях вибирається стандартним способом.

Моделювання показує, що обчислювальна складність алгоритму планування шляху прямо пропорційна кількості дуг на створеному графіку. Відносно великі обсяги, які виконуються алгоритмами під час пошуку великого графа з багатьма вузлами та дугами, можна пояснити наступним чином: алгоритм не передбачає розпізнавання раніше пройдених великих сегментів графа, якщо до них звертаються з іншого вузла, ніж раніше.

Ще однією з переваг методу є те, що графік може бути попередньо обчислений (без знання вихідних і кінцевих точок) з плану. Щоб знайти майже оптимальний шлях, ми одночасно розробляємо карту вузлів графа, а також фактичний шлях точки для руху робота.

Це дозволяє динамічно розподіляти витрати на точковий шлях і водночас використовувати техніку зворотного відстеження для заданого шляху.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. R. A. Brooks, «Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space». IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, pp. 190-197. March. 1983.
2. T. Lozano-Perez, M. A. Wesley, «An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Obstacles». Communications of A CM, Vol. 22, pp. 560-570, October, 1979.
3. D. T. Kuan, J. C. Zamiska and R. A. Brooks, «Natural Decomposition of Free space for Path Planning», IEEE Conference on Robotics and Automation, St. Louis., MO, March 1985.
4. H. Jahanshahi and N. N. Sari, «Robot path planning algorithms: a review of theory and experiment.» 2018.
5. B. K. Patle, G. Babu L, A. Pandey, D. R. K. Parhi, and A. Jagadeesh. A review: on path planning strategies for navigation of mobile robot,” Defence Technology, vol. 15, no. 4, pp. 582-606, 2019.
6. F. Rubio, F. Valero, and C. Llopis-Albert, “A review of mobile robots: concepts, methods, theoretical framework, and applications,” International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 16, no. 2, Article ID 1729881419839596, 2019.
7. G. Fraganane, D. Ivanov, M. Peron, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, «Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics». Annals of Operations Research, vol. 308, pp. 1-19, 2020.
8. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі: навчальний посібник 2-ге видання доповнене. – Львів ТзОВ «Простір М», 2014. 202 с.
9. Гайченко В.А., Коваль Г.М. Основи безпеки життєдіяльності людини: Навчальний посібник. К.: МАУП, 2002. 226 с.
10. Джигирей В.С. Екологія та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник. К.: Знання, 2002. 203 с.
11. Дідур С.Р., Капаціла Ю.Б. Дослідження та розробка методів планування траєкторії мобільних роботів. Тези доповіді на XI міжнародній науково-

практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль, 7-8 грудня 2022 р. с. 165, 166.

12. Кудрін А. Ю. Моделювання транспортного мобільного робота в гнучкому інтегрованому виробництві : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на інтегрованому виробництві другого (магістерському) рівні, спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / А. Ю. Кудрін; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2019. 77 с.
13. Маценко В.Г. Математичне моделювання: навчальний посібник / В.Г. Маценко. Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014. 519 с.
14. Хан, Дж.; Сео, Ю. Планування шляху мобільного робота з набором оточуючих точок і вдосконаленням шляху. *Soft Comput.* 2017, с. 35-47.
15. Шпітальний Д. М. Розробка методу прийняття рішень для управління мобільним роботом в невизначеному середовищі: пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / О. В. Шпітальний ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки. Харків, 2019. – 74 с.
16. Чуть М. О. Дослідження методів адаптивного керування інтелектуальною роботою технічною платформою / М. О. Чуть // Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2017) : збірник студентських наукових статей . Харків : ХНУРЕ, 2017. С. 11-15.