

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі

Назва теми

КвРАКІТР.2023197.02.03 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Назва

Виконав:

студент II курсу, група АКІТРМ-23-2

  
Підпис

Микола ГОРОШКО

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

  
Підпис, дата

Денис МАКАРИШКІН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри АКІТтаР

  
Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 16 » грудня 2024 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Валерій МАРТИНЮК

01 вересня 2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Горошко Миколі Ігоровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі

Керівник роботи Макаришкін Денис Анатолійович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи Аналіз сучасного стану розробки роботів на колесах. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення





4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Математичні моделі роботів на колесах. дослідження математичних моделей що описує роботи на колесах. Розробка узагальненої структури системи керування. Розробка алгоритму та експериментальне дослідження задачі апроксимації траєкторій руху робота. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2024р.	Виконано
3	Огляд існуючих методів	15.10.2024р.	Виконано
4	Алгоритмічне проектування	30.10.2024р.	Виконано
5	Розробка програмного забезпечення	10.11.2024р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2024р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2024р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

Студент



Підпис

Микола ГОРОШКО

Ім'я, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Денис МАКАРИШКІН

Ім'я, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі».

Автор роботи: Горошко Микола Ігорович.

Керівник роботи: Макаришкін Денис Анатолійович, к.т.н., доцент

Пояснювальна записка: 89 с., 30 рис., 4 табл., 1 дод., 70 джерел.

Графічна частина: 13 презентаційних слайдів.

АЛГОРИТМ, АНАЛІЗАТОР, АПРОКСИМАЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА  
МОДЕЛЬ, РЕГУЛЯТОР, СКІНЧЕННІ АВТОМАТИ.

**Мета роботи:** розробка моделі апроксимації завдання траєкторії руху колісних мобільних роботів в динамічному середовищі, для задавання оптимального руху робота поміж перешкодами.

Описано стан проблеми, на основі якого проводиться формування задач, які необхідно вирішити. Розглянуто математичні моделі колісних роботів. Виконано огляд відомих засобів та методів керування. Проведено аналіз математичних моделей колісного роботу. Виконано вибір методу реалізації методу керування. Сформована структурна схема системи керування. Розроблено алгоритм для апроксимації задання траєкторії руху робота на місцевості, зроблено навчання нейронної мережі, виконано тестування отриманих результатів у програмному середовищі Matlab.



Підпис студента

02.12.24

Дата

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РОБОТІВ на колесах.....	7
1.1 Схеми кінематики колісних роботів.....	8
1.2 Створення координної системи для робота .....	14
1.3 Характеристики кінематики коліс для роботів.....	18
1.4 Класифікація неголономних систем та їх застосування .....	19
1.5 Модель кінематики робота на колесах .....	21
1.6 Модель роботи у динаміці .....	22
1.7 Рівняння опису мехатронних систем .....	22
1.8 Висновки до першого розділу .....	24
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЩО ОПИСУЄ РОБОТИ НА КОЛЕСАХ.....	26
2.1 Задачі забезпечення керованості роботом .....	26
2.2 Запис диференційних рівнянь опису у канонічній формі .....	29
2.3 Лінеаризація у статичній і динамічній формах .....	31
2.3.1 Лінеаризація у статиці.....	32
2.3.2 Лінеаризація у динаміці .....	33
2.3 Забезпечення стабілізація для неголономних систем .....	34
2.4 Висновки до другого розділу.....	35
3 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	36
3.1 Постановка задачі.....	36
3.2 Розробка структури схеми для системи управління.....	38
3.3 Алгоритм апроксимації.....	42
3.4 Висновки до третього розділу .....	43
4 Розробка алгоритму та експериментальне дослідження задачі апроксимації траєкторій руху робота .....	44
4.1 Скінченні автомати .....	44

4.1.1 Розв'язання задачі «Вибірка» .....	47
4.1.2 Розв'язання задачі «Маяки-ворота» .....	52
4.1.3 Розв'язання задачі «Маяки-ворота-вісімки» .....	54
4.1.4 Розв'язання задачі «Змійка» .....	57
4.2 Алгоритм внесення корекції у траєкторію руху .....	60
4.2.1 Розробка коригувального методу .....	61
4.2.2 Навчальні етапи для нейронних мереж .....	66
4.3 Керування положенням у просторі робота .....	74
4.3.1 Задавання напрямку на маяк .....	74
4.3.2 Обертання в околі маяка .....	75
4.4 Керування зміною положення у просторі робота .....	76
4.5 Висновки до четвертого розділу .....	80
ВИСНОВКИ .....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	82
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі .....	89

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕРС – електрорушійна сила;

КМ – колісний модуль;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

КР – колісний робот;

МЦШ – миттєвий центр швидкості;

СТЗ – система технічного зору;

col – ширина;

dim – розмірність векторного простору;

rank – ряд.

## ВСТУП

**Актуальність роботи** Роботи на колесах є відносними до категорії так званих неголономних систем. Для подібних систем, окрім геометричних взаємозв'язків, відомі також і кінематичні взаємозв'язки, це такі зв'язки, що призводять до обмежень на значення швидкості кожної точки і усіх тіл системи та не можуть зводитись до геометричних взаємозв'язків. У результаті положення колісної машини описується змінними, які не є повністю автономними. Це створює значні проблеми в аналізі та синтезі колісних робіт, а також важко використовувати стандартні методи керування.

Один із популярних підходів до вирішення проблеми керування рухом роботизованої платформи базується на традиційних принципах створення систем стеження. Процес передбачає додавання в систему спеціальних компонентів (interplators), які контролюють параметри потрібного шляху.

Траєкторні методи керування використовують поточні значення відхилення від заданої траєкторії. Тут бажаний шлях руху представлено сегментом гладкої кривої, який є неявним. Робота з керування контуром полягає в тому, щоб змусити робота триматися заданої траєкторії та підтримувати задану швидкість руху по ній.

Однак у багатьох завданнях, пов'язаних із транспортуванням, попередні знання про характеристики навколишнього середовища та параметри, необхідні для виконання завдання, недоступні або обмежені, точний опис контрольного шляху подорожі також невідомий. Щоб вирішити ці проблеми, необхідно застосовувати спеціальні стратегії контролю руху по траєкторії з використанням принципів адаптації та самовдосконалення.

Цей альтернативний метод вирішення важливих транспортних питань називається ситуаційним. Метод передбачає розпізнавання ситуацій із заздалегідь визначеним набором і прийняття рішень щодо управління щодо ситуацій. Різні варіанти моделей дискретних подій, особливо кінцевих автоматів, використовуються для опису того, як відбувається перехід. Сьогодні

кінцеві автомати набувають все більшої популярності у світі програмування. Їх головні переваги – доступність і прозорість.

Тому метою магістерської роботи є розробка математичної моделі для колісного робота та розробка алгоритмів апроксимації задавання траєкторій руху колісних мобільних роботів у динамічних середовищах.

Об'єкт дослідження – процеси що полягають у завданні траєкторій динамічного руху.

Предмет дослідження – методи розв'язання задач орієнтації у просторі роботів на колесах.

Методи дослідження – методи лінійної алгебри, методи математичного аналізу, методи дослідження неголомомних систем.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- створити та проаналізувати математичні моделі мобільних роботів з колесами, орієнтованими в задачно-орієнтованих системах координат, досліджувати їх структурні властивості.

- створити структури контролера та направлення мобільного пристрою;

- створити та дослідити алгоритми, які допомагають роботам орієнтуватися в робочому просторі.

- створити та дослідити методи керування рухом мобільних роботів.

- створити та дослідити алгоритми, які дозволять роботам рухатися різними шляхами.

Наукова новизна: полягає у дослідженні аналізу математичної моделі колісного робота та побудові методів керування рухом колісного робота при відсутності чітко визначеної необхідної траєкторії руху

## 1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РОБОТІВ НА КОЛЕСАХ

Вирішення питання створення сучасної колісної роботизованої системи керування передбачає розробку математичних моделей, що описують поведінку роботизованого пристрою під час його руху в просторі. Крім того, необхідні програми, які можна виконати для керування пристроєм. комп'ютеризовані стратегії управління. У зв'язку з цим неприпустимі як прості моделі, так і надскладні моделі, остання з яких використовується для синтезу систем, призведуть до неможливості аналітичного аналізу властивостей складної системи.

Як регулятор, колісна машина за своєю суттю є складною багаточасовою динамічною системою. Математичний опис (модель руху) проблеми можна отримати за допомогою рівнянь Лагранжа або Ньютона-Ейлера, останнє з яких створює ефект сили-імпульсу  $F$  і вторинний ефект  $M$ . Останній описує основні властивості роботів у розглянутій категорії та їх відмінності від твердотільних моделей руху. Кут повороту колеса і вектор його лінійної швидкості пов'язані, що важко зробити через неголономних обмежень на кут і вектор.

Стан будь-якої механічно пов'язаної механічної системи характеризується мінімумом координатій. Збільшення кількості зв'язків між компонентами системи координат зменшує кількість ступенів вільності в системі. Зв'язки, що впливають на швидкості точок і тіл системи, які визначаються певними зв'язками між цими швидкостями, називаються кінематикою. Кінематичні співвідношення, які не зводяться до геометричних співвідношень, називаються неголономними системами, а механічні системи з цими співвідношеннями — неголономними. Це враховується прямим введенням координат, якщо всі зв'язки геометричні (повні), тобто на точки системи не накладаються обмеження, а враховується положення об'єктів (або їх зміщення під час руху). рахунок. Ці ситуації відображають фактичну кількість ступенів свободи. Однак такий вибір координат неможливий, якщо в рівняннях зв'язку існують неголономні обмеження. Неповні рівняння зв'язку не можуть

бути використані для зменшення кількості змінних, тому за наявності такого типу зв'язку необхідно використовувати змінні, які неможливо розглядати окремо. Прикладом системи, яка не є голономною, є кулька, яка котиться по шорсткій поверхні без ковзання. Крім того, накладено обмеження на положення центру сфери (геометрична залежність), а також на швидкість точки її контакту з площиною, які повинні дорівнювати нулю в кожному місці. момент (властивість руху, яка не зводиться до геометрії). Іншим прикладом є з'єднання, які накладаються на попередньо запрограмовані рухи. Наприклад, якщо рух точки такий, що її швидкість у будь-який даний момент спрямована в бік іншої точки, яка рухається, то ця умова не може бути зведена до залежності між координатами, і зв'язок вважається неповним. У робототехніці найпоширенішим прикладом системи, яка не є голономною, є мобільний робот. [6].

З точки зору теорії керування, відсутність голономних зв'язків шкодить використанню розроблених стандартних моделей, планів і засобів керування, зокрема, для роботизованої маніпуляції. У зв'язку з цим актуальним залишається питання планування та регулювання руху мобільних колісних роботів.

Метою цього розділу є обговорення питань, пов'язаних із створенням, організацією та аналізом математичних моделей колісних роботів.

### 1.1 Схеми кінематики колісних роботів

Колісний робот – це транспортний засіб, який приводиться в рух сам і має можливість автоматичного керування. Основними компонентами роботизованої конструкції є крокові функції,

Основа роботизованого механізму складається з рухомої основи (корпуса, платформи) і колеса (СМ), обидва з яких сприяють руху та швидкості роботизованого механізму на площині. Колісний модуль складається з коліс, системи підвіски та механізму приводу, як правило, двигуна постійного струму,

редуктора, гальма та інших компонентів. Конструкції колісних модулів, які фактично використовуються, можна класифікувати на три категорії: стаціонарні, обертально-симетричні та обертально-асиметричні. Тип використовуваної підвіски визначає категорію [8].

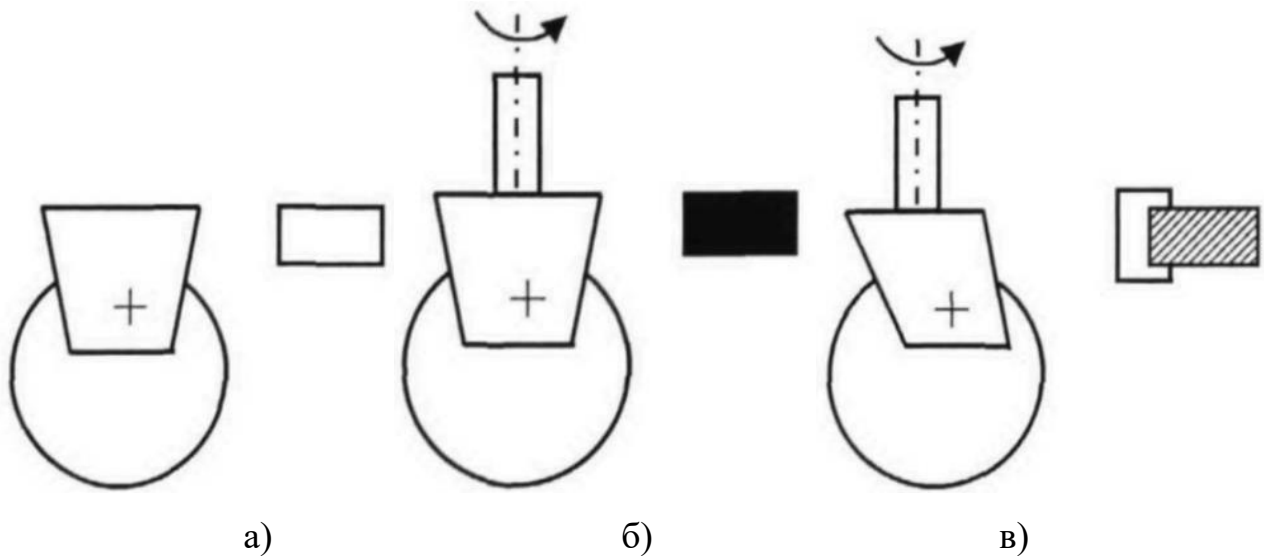


Рисунок 1.1 – Конструкції колісних модулів

Неповоротні осі (рис. 1.1а) — це деталі, у яких колеса з'єднані з рамою вилами. Цим типом модуля не можна керувати, але ним можна керувати, тобто він призначений для створення поздовжнього руху. Сферичний крокуючий робот з обертальною симетрією (рис. 1.1б) з'єднаний з рамою таким чином, що він може обертатися навколо вертикальної осі, це дозволяє модулю конструкції мати рух відносно вертикалі. axis.. Крім того, частина цього дизайну також може бути змінена. Складовою конструкції несиметрично встановленого поворотного колеса (рис. 1.1в) є відхилення горизонтальної осі колеса, прикріпленого до вил, від вертикальної осі прикріплених до рами вил. Якщо модуль колеса не обертається, його обертання навколо вертикальної осі мінімальне. У цьому контексті його також називають флюгером або самодостатнім. Об'єднання неповоротних, ротаційно-симетричних і асиметричних колісних компонентів створює механічну схему машини (рис.1.2).

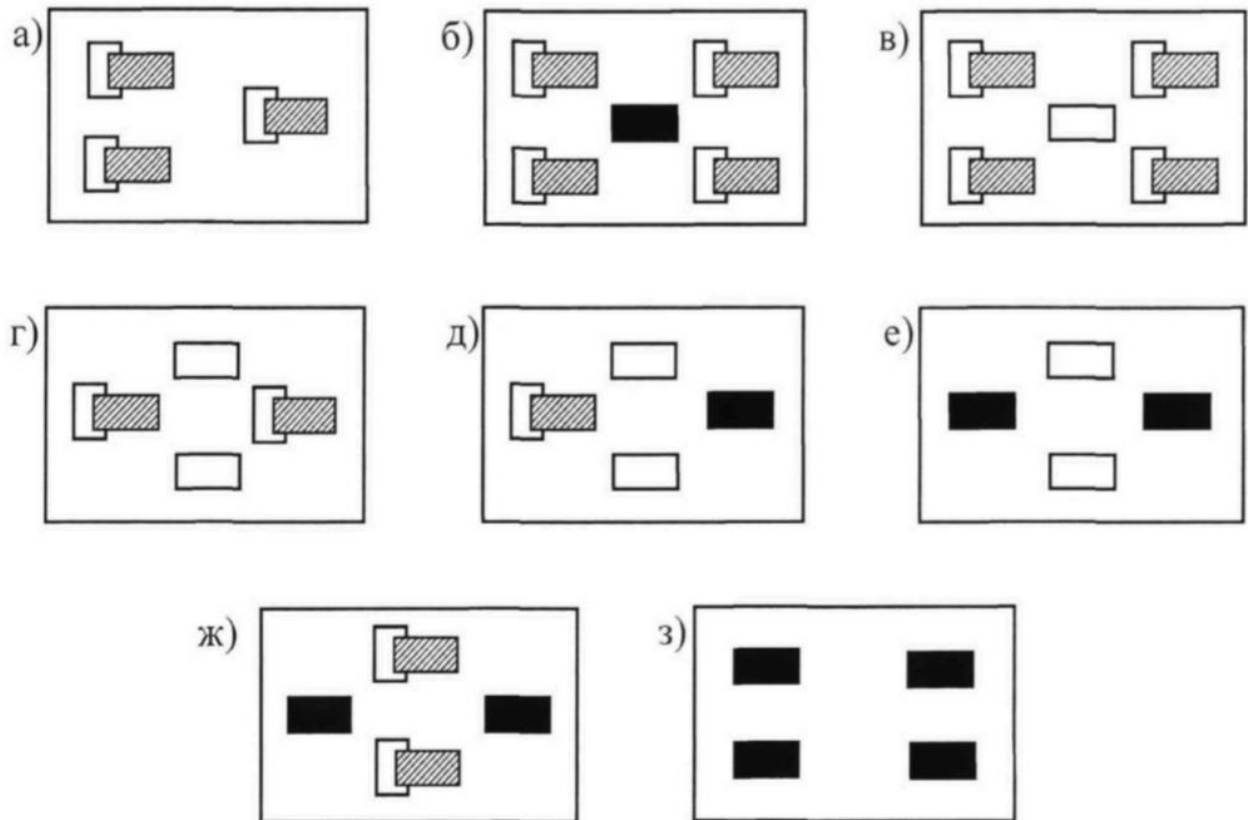


Рисунок 1.2 – Кінематичні схеми

Різноманітності кінематичних схем, які використовують колісні роботи, численні, і кожна з них має кілька пов'язаних особливостей. Ці атрибути включають, серед іншого, вимогу максимізації продуктивності з мінімальною кількістю складності та витрат, пов'язаних із проектуванням роботизованої системи. Активна поведінка колісних роботів у складних середовищах досягається завдяки використанню нових, більш складних кінематичних конфігурацій і передових технологій вимірювання, контролю та сприйняття. Необхідною умовою виконання важливих транспортних завдань і збільшення руху колісних роботів є резервування кінематичної схеми, що досягається збільшенням кількості активних (ведучих) колісних модулів та їх розподілом по корпусу робота. [9]

Щомиті плоскопаралельний рух твердого тіла узгоджується з поступальним або обертальним рухом відносно миттєвого центру швидкості, який називається центром обертання. Пряма лінія, яка проходить через центр

миттєвого руху та будь-яку іншу точку на об'єкті, перпендикулярна вектору лінійної швидкості в цій точці. Для колісних роботів, у яких відсутній бічний рух коліс, напрямок векторів швидкості необертально-симетричних компонентів визначався напрямком довгої осі цих коліс, у результаті виявлявся миттєвий центр платформи. Швидкість перетинає середину об'єму колеса і перпендикулярна до точки зустрічі ліній уздовж його поздовжньої осі. Якщо колесо розташоване таким чином, що ці лінії не перетинаються в одній точці, миттєвого центру руху немає, отже, рух на площині в цьому випадку неможливий. Якщо схема руху робота містить два неповоротних колеса, які не збігаються з горизонтальною віссю, то рух відбувається відносно фіксованого центру миттєвої швидкості. З практичної точки зору ця структура вважається декадентською.

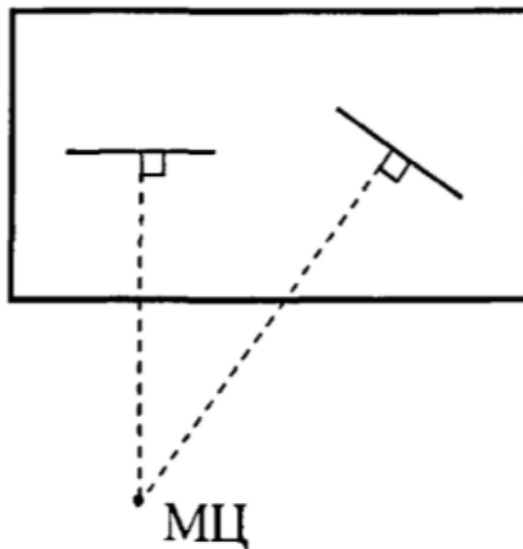


Рисунок 1.3 – Розташування миттєвого центру швидкості робота

Оцінимо подібність кінематичних схем на рисунку 1.2. Для кінематичного представлення роботизованої системи, яка має лише обертовий асиметричний компонент колеса (рис. 1.2а), миттєвий центр швидкості платформи розташований у будь-якій точці на площині руху робота в будь-який момент, змінюючи напрямок руху робота не потребує попереднього регулювання коліс.

Для кінематичної схеми, яка містить кілька модулів, які асиметрично обертаються, плюс модуль, який є обертально-симетричним (рис. 1.2б), положення миттєвого центру швидкості платформи в кожен момент може бути будь-якою точкою на горизонтальній осі обертально-симетричного модуля. В результаті для можливості переміщення відносно платформи необхідний початковий поворот коліс модуля.

Кінематична властивість наявності модуля з обертанням, відмінним від інших модулів (рис. 1.2с), полягає в тому, що миттєвий центр швидкості платформи завжди розташований на осі колеса, що не обертається, на його відстані від платформи. У цьому випадку обертання центру руху платформи навколо осі не потребує зміни орієнтації коліс. Якщо рішення містить декілька компонентів, що не обертаються (рис. 1.2д), їх горизонтальні осі мають збігатися, інакше кінематичний розв'язок буде значною мірою неефективним.

У кінематичній схемі, яка містить два перпендикулярних неповоротних колеса і сферичний модуль з обертальною симетрією (рис. 1.2г), миттєвий центр швидкості платформи в кожен момент знаходиться на перетині відрізка прямої: поперечної осі нерухоме колесо і обертально-симетричний модуль викликаний обертанням прикріплених до нього коліс це. Обертаючи напрямок колеса, центр швидкості слідуватиме осі колеса, що не обертається, це означає, що центр швидкості не може перебувати на платформі, а його численні потенційні положення будуть утворювати пряму лінію. Якщо рішення містить декілька або навіть ідентичні модулі, які обертаються навколо власної осі (рис. 1.2е), якщо вони не скоординовані один з одним, миттєвий центр швидкості платформи буде недоступний, тобто пряма лінія, що проходить через центр обертальної кожне колесо, перпендикулярне до площини обертання, повинно мати точку перетину.

У кінематичній схемі, що включає обертально асиметричні і симетричні модулі (рис. 1.2ж), миттєвим центром швидкості платформи в кожен момент є перетин горизонтальної осі колеса. Симетрично розміщені модулі можуть бути

змінені шляхом переорієнтації останніх, що призводить до того, що центр швидкості перебуває в будь-якому місці платформи. Якщо кінематична схема має більше двох обертально-симетричних модулів (рис. Якщо землетрус відбувається на відстані  $1,2\lambda$ , то їх необхідно планувати так, щоб забезпечити наявність миттєвого центру руху.

У підсумку всі розглянуті кінематичні схеми колісних роботів, що розглядаються, відповідають наступним вимогам:

- якщо конструкція має декілька коліс, що не котяться, то горизонтальне розташування їх коліс однакове;

- центр ротаційно-симетричної колісної пари не розташований на горизонтальній осі нерухомого модуля;

Якщо конструкція має два або більше модулів, ідентичних за обертанням, вони повинні бути узгоджені, щоб забезпечити наявність центру миттєвої швидкості.

Кінематичні схеми, які відповідають умовам, наведеним у першому пункті, називаються невинородженими. Також слід зазначити, що наявність асиметричних компонентів коліс не впливає на маневреність роботи, однак наявність неповоротних компонентів призводить до того, що робот стає менш ефективним.

Моделювання та дослідження колісних роботів майбутнього відбуватиметься за наступними схемами:

- Платформа і колеса повністю суцільні, робот рухається по горизонтальній площині;

- кожне колесо залишається вертикальним і обертається навколо своєї горизонтальної осі без ковзання, контакт між колесом і поверхнею по суті є точковим;

- кількість колісних компонентів, закладених у конструкцію машини, дорівнює  $N$ ;

– кінематична схема розглянутого робота є невиродженою і включає  $NH$  неповоротний,  $Nc$  що дорівнює числу ступенів свободи розглянутого робота,  $Na$  що є додатковим ступенем свободи.

## 1.2 Створення координної системи для робота

Платформу робота що рухається можна вважати суцільним твердим об'єктом відносно декартової системи координат, яка є абсолютною  $Y = R^2$ . Їх положення на плоскій поверхні (рис. 1.4) обчислюється однозначним вектором  $y = col(y_1, y_2)$ , де  $col$  – довжина та абсолютне положення точки  $C$  (центру мас або полюса платформи) у фіксованій системі координат.  $OY_1Y_2$ , який визначає положення, і кут  $\alpha$ , який визначає напрямок осі  $CZ_1$  системи координат робота  $CZ_1Z_2$ , яка пов'язана з платформою.

Для розуміння змінних швидкості, сил і моментів у відносній системі координат, пов'язаних з рухом платформи, необхідна ортогональна матриця:

$$T(\alpha) = \begin{bmatrix} \tau_1^T(\alpha) \\ \tau_2^T(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}.$$

Матриця складається з окремих, взаємно перпендикулярних векторів.

$\tau_1(\alpha), \tau_2(\alpha)$ , що показують рухомий базис робота, тож,  $\tau(\alpha)T^T(\alpha) = I_2$ .

Ортоматриця  $T(\alpha)$  відповідає диференційному рівнянню що показано нижче [11]:

$$\dot{T}(\alpha) = \dot{\alpha}ET(\alpha), \quad (1.1)$$

де  $E = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$  – кососиметрична матриця.

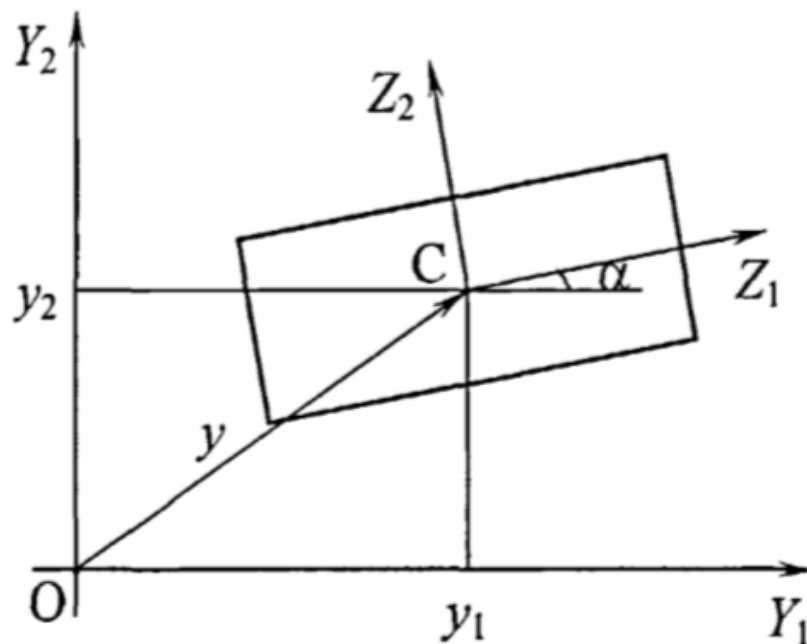


Рисунок 1.4 – Робот рухомий у фіксованій системі координат.

Розташування кожного  $j$ -го модуля коліс у координатній системі  $CZ_1Z_2$  описується розташуванням центру кріплення  $Z^j = col(Z_1^j, Z_2^j)$  (точка  $C^j$ ) і кутом орієнтації  $B^j$  поздовжньої вісі колеса (рис 1.5).

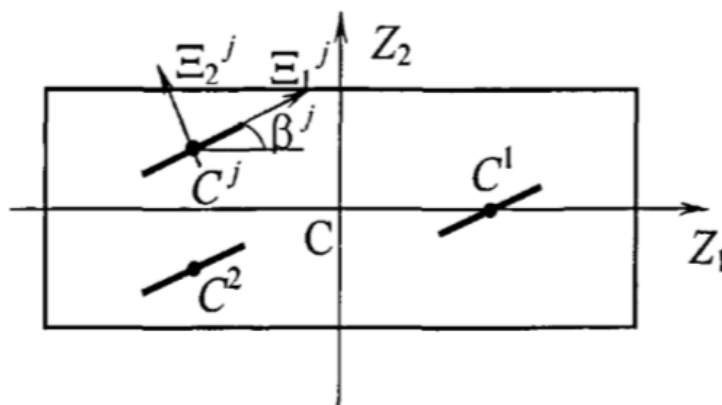


Рисунок 1.5 – Положення коліс у координатній системі робота

Для опису параметрів стану колеса кожній  $j$ -й компоненті колеса зв'яжемо систему координат з початком координат у точці  $C^j$  та кутом орієнтації  $B^j$  щодо системи (рис.1.5). Відокремте вектори  $\tau_1(B^j)\tau_2(B^j)$ , які взаємно перпендикулярні до системи координат  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  колеса і утворюють ортогональну матрицю:

$$T(B^j) = \begin{bmatrix} \tau_1^T(B^j) \\ \tau_2^T(B^j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(B^j) & \sin(B^j) \\ -\sin(B^j) & \cos(B^j) \end{bmatrix},$$

що відповідає диф. рівнянню:

$$\dot{T}(B^j) = \dot{B}^j E T(B^j). \quad (1.2)$$

Положення центру колеса  $C_0^j$  у координатній системі  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  можна описати постійним вектором  $\zeta^j = \text{col}(\zeta_1^j, \zeta_2^j)$ .

Взаємний зв'язок визначених **координатних систем**  $Y, Z, \Xi^j$  приведена на рисунку 1.6.

Нехай  $C_0^j$  – якась точка, що є нерухомою у системі  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$ . Тож, якщо  $\xi^j = \text{col}(\xi_1^j, \xi_2^j)$  є координати точки  $C_0^j$  у координатній системі колеса  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$ ,  $z^j = \text{col}(z_1^j, z_2^j)$  – координати точки  $C^j$  у координатній системі робота  $CZ_1Z_2$ , то розташування точки  $C_0^j$  в абсолютній координатній системі  $OY_1Y_2$  буде характеризуватись вектором  $y^j$ , що визначається наступним виразом:

$$y^j = y + T^T(\alpha)z^j + T^T(\alpha + \beta^j)\xi^j, \quad (1.3)$$

де  $y = \text{col}(y_1, y_2)$  – координати точки  $C$  в абсолютній системі  $OY_1Y_2$ .

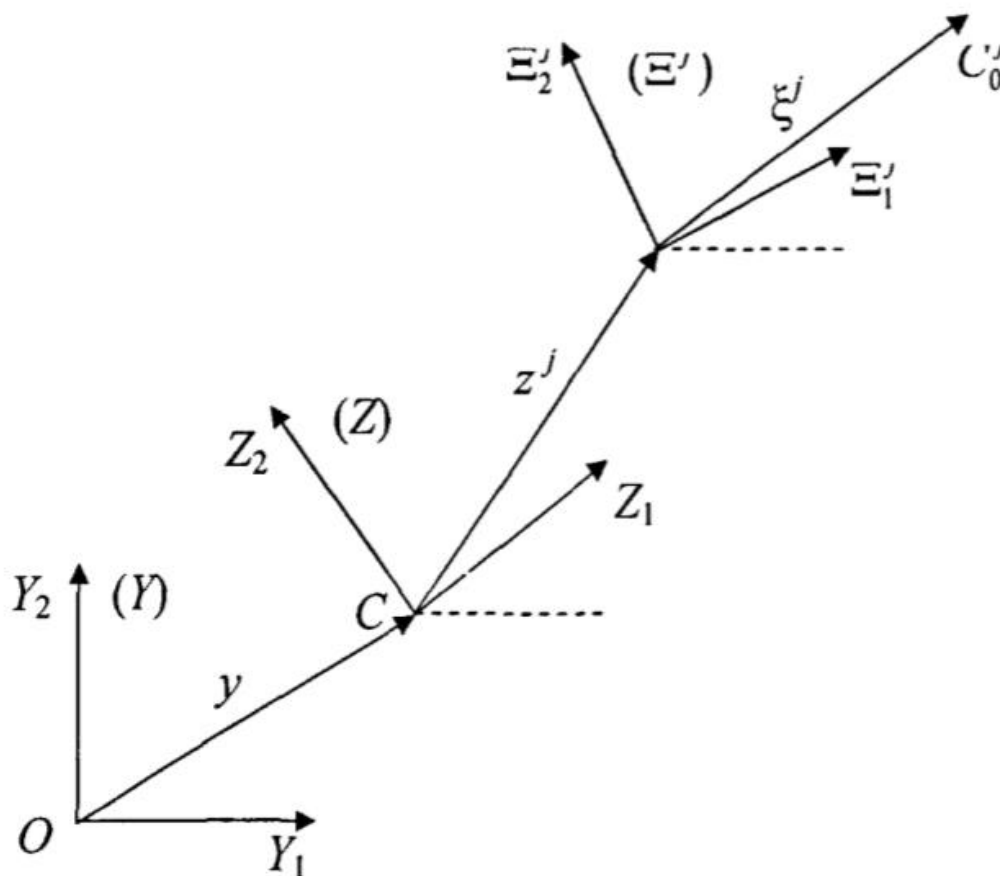


Рисунок 1.6 – Взаємний зв'язок координатних систем  $OY_1Y_2$ ,  $CZ_1Z_2$ ,  $C^j\xi_1^j\xi_2^j$

Диференціюючи (1.3) за часом і враховуючи властивості (1.1) і (1.2), можна отримати наступні формули для вектора швидкост  $\dot{y}^j$  і прискорення  $\ddot{y}^j$  даної точки  $C_0^j$ , в абсолютній системі координат:

$$\dot{y}^j = \dot{y} + \dot{\alpha}T^T(\alpha)E^T z^j + (\dot{\alpha} + \dot{\beta}^j)T^T(\alpha + \beta^j)E^T \xi^j, \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}^j = & \ddot{y} + \ddot{\alpha} T^T(\alpha) E^T z^j + (\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}^j) T^T(\alpha + \beta^j) E^T \xi^j - \\ & - \dot{\alpha}^2 T^T(\alpha) z^j - (\dot{\alpha} + \dot{\beta}^j)^2 T^T(\alpha + \beta^j) \xi^j. \end{aligned} \quad (1.5)$$

У той час як вирази (1.3) встановлюють геометричні співвідношення колісного робота, за допомогою виразів (1.4) і (1.5) ми можемо визначити значення швидкостей  $\dot{y}^j$  і прискорень  $\ddot{y}^j$  центрів коліс  $C_0^j$  робота за швидкістю  $\dot{y}$ ,  $\dot{\alpha}$  і прискоренням  $\ddot{y}$ ,  $\ddot{\alpha}$  центру платформи і відносні кутові швидкості  $\dot{\beta}^j$  та прискорення  $\ddot{\beta}^j$  колісних модулів.

### 1.3 Характеристики кінематики коліс для роботів

Колісні модулі стикаються з опорною поверхнею, по якій рухається робот. Потім визначається шлях, за допомогою якого сили передаються через нього, утримуючи робота на шляху. Потім робот може виконувати необхідні маневри в будь-якому потрібному напрямку з певною швидкістю руху. Колісний робот повністю визначається повним конструктивним набором колісних модулів. Звернемо увагу на кінематичні особливості, що визначають основні види колісних модулів.

Неповоротний (фіксований) модуль. Оскільки він може створювати рушійні сили лише в поздовжньому напрямку, модуль може обертатися лише навколо своєї горизонтальної осі. Однак його орієнтація відносно платформи фіксована.

Якщо  $N_H$  – кількість зафіксованих модулів, з яких складається конструкція платформи. Ус  $j$ -оє ( $j = 1, \dots, N_H$ ) колеса характеризується координатами центру фіксації  $z_H^j = \text{col}(z_{H1}^j, z_{H2}^j)$  (точка  $C_H^j$ ), встановленим кутом орієнтації  $\beta_H^j$  у координатній системі робота  $CZ_1Z_2$ , кутом повороту відносно власної горизонтальної осі  $\theta_H^j$  і радіусом  $r_H^j$ . Не втрачаючи

узагальнюючого опису можна припустити  $\beta_H^j = 0$  і  $z_{H1}^j = 0$  ( $j = 1, \dots, N_H$ ) (див. п.1.1). Центральні координати колеса в системі  $C_H^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  у випадку що розглядається, вони збігаються з початком координат  $C_H^j$ , отже  $\xi_h^j = 0$  ( $j = 1, \dots, N_H$ ).

Якщо припустити, що проекція точки контакту колеса із опорною поверхнею на площину  $OY_1Y_2$  співпадає із точкою  $C_H^j$  і тоді застосувавши вираз (1.4), за умови відсутності поздовжнього і поперечного ковзання коліс, можна запропонувати вираз кінематики коліс:

$$T(\alpha)\dot{y} + E^T z_H^j \dot{\alpha} - \begin{bmatrix} r_H^j \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_H^j = 0 \quad (j = 1, \dots, N). \quad (1.6)$$

В кожен момент часу розташування всіх  $N_H$  колісних модулів, що не повертаються можна описати вектором  $\theta_H = \{\theta_H^j\} (j \in [1, N_H])$  для кожного кута повороту колеса відносно вісі абсцис.

#### 1.4 Класифікація неголономних систем та їх застосування

З урахуванням типу механічних систем з кінематичними обмеженнями на прямолінійний рух:

$$\langle \sigma_j(q), \dot{q} \rangle = 0, \quad j = 1, \dots, n - m, \quad (1.7)$$

де  $q = \text{col}(q_1, \dots, q_n)$  – локальні координати гладкого  $n$ -мірного різноманіття  $M$ , що відіграє роль простору конфігурації, і

$\sigma_j(q) = \sum_{i=1}^n \sigma_j^i(q) dq_i$ ,  $j = 1, \dots, n - m$  – наперервні локально незалежні ковекторні

поля (диференційні форми), встановлені на підмножині  $V$  різноманіття конфігурацій  $M$ .

Якщо ліва частина рівнянь (1.7) містить часткові похідні за часом будь-яких координатних функцій  $f_1(q), \dots, f_{n-m}(q)$ , то ці рівняння не є інтегрованими. Це означає, що вони не можуть бути зведені до асоціацій між окремими координатами, а положення системи може бути виражене меншою кількістю координат через справжню кількість ступенів свободи.

Окремо питання комбінування виразів:

$$\langle \sigma(q), \dot{q} \rangle = 0, \quad (1.8)$$

де  $\sigma(q) = \sum_{i=1}^n \sigma^i(q) dq_i$  – гладке векторне поле, можна привести до задачі пошуку такої функції координат  $f(q)$ , що:

$$df = \sigma(q). \quad (1.9)$$

Якщо:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial q_i \partial q_k} = \frac{\partial^2 f}{\partial q_k \partial q_i},$$

тоді необхідною умовою існування таких функцій  $f(q)$ , є:

$$\frac{\partial \sigma^k}{\partial q_i} = \frac{\partial \sigma^i}{\partial q_k} \quad (1.10)$$

що еквівалентне умові  $d\sigma(q) = 0$ . Окрім цього, умова (1.10) є достатньою для існування функції у локальній ділянці  $f(q)$ , вона відповідає співвідношенню (1.9) [12]. Гладка диференціальна перша форма  $\sigma(q)$  називається замкненою, якщо її зовнішній диференціал дорівнює нулю ( $d\sigma(q) = 0$ ), і точною

(інтегрованою), за умови існування диференціалу функції  $f(q)$ , для якої  $df = \sigma$  [13].

### 1.5 Модель кінематики робота на колесах

Мета цього розділу – отримати кінематичну модель руху платформи, яка є визначальною для вирішення задачі керування колісним роботом та планування необхідної траєкторії його руху.

Якщо припустити, що колеса не ковзають, кінематична модель колісного робота визначається кінематичними обмеженнями. Лінійно незалежні рядки матриці  $J_q(q)$  задають базис розподілу на  $n_q$  – що вимірюється конфігураційним різноманіттям  $M_q$ . За умови, що:

$$q \in V_q = \{q : \text{rank} T''(\beta_c) = 3 - k_n\}, \quad (1.11)$$

де  $\text{rank}$  – ряд;  $1 \leq k_n \leq 3$ , базис розподілу.

Для знаходження базису розподілу знайдемо матрицю  $B(\beta_c)$  розмірністю  $3 \times k_n$ , що задовольняє при  $q \in V_q \subset M_q$  співвідношенням:

$$T^*(\beta_c)B(\beta_c) = 0, \quad (1.12)$$

$$3 - \text{rank} B(\beta_c) = \text{rank} T^*(\beta_c). \quad (1.13)$$

Зрозуміло, що така матриця має місце існування, але її обрання не може бути неоднозначним.

## 1.6 Модель роботу у динаміці

У цьому підрозділі ми виведемо динамічну модель для колісного робота з невідродженою конструкцією шасі. Динамічна модель формально визначатиме співвідношення між локальними координатами (узагальненими координатами)  $q = \text{col}(y, \alpha, \theta, \beta_a, \beta_c)$  у  $n_q$ -вимірному просторі  $M_q$  конфігурації та моментами, де:  $\mu_\theta$  -  $N$ -вектор моментів, прикладених до горизонтальних осей коліс;  $\mu_a - N_a$  – вектор моментів, прикладених до вертикальних осей обертових несиметричних модулів коліс;  $\mu_c - N_c$  – вектор моментів, прикладених до вертикальних осей обертових симетричних модулів коліс.

Для розробки рівнянь динаміки робота як механічної системи з неголономними обмеженнями можна використати декілька методів. Перший метод, прирівняний до принципу Даламбера, представляє колісного робота через кінцеву сукупність твердих тіл, які є його елементами (рухома платформа, колеса тощо), де представлено.

Кожному рівнянню руху відповідає один структурний елемент:

$$\frac{d}{dt}(mV)_j = f_j, \frac{d}{dt}(J\omega)_j = \mu_j,$$

де  $(mV)_j$  і  $(J\omega)_j$  – відповідно імпульс та момент імпульсу  $j$ -го елемента системи;

$f_j$  і  $\mu_j$  – сумарні зовнішня сила і момент, які прикладено до  $j$ -го з елементів.

## 1.7 Рівняння опису мехатронних систем

Багато проблем, пов'язаних зі стійкістю та керуванням рухом колісних роботів і мобільних маніпуляторів, мають базуватися на формулюванні

математичних моделей, що враховують динамічні особливості електроприводу робота. У випадку електромеханічних систем з лінійними струмами та пов'язаними з ними неголономними обмеженнями побудову цих моделей найзручніше виконувати за допомогою формалізму Лагранжа-Максвелла.

Тут ми будемо мати на увазі системи, в яких відбувається перетворення енергії між механічною та електричною енергією. Під електромеханічними системами ми маємо на увазі систему, в якій механічна та електромагнітна енергія перетворюються одна в одну [15]. Механічну підсистему електромеханічної системи зручно описувати за допомогою моделі, що складається з  $N$  взаємопов'язаних матеріальних точок (як правило, твердих тіл), які визначають певне положення в просторі вектором загальної координати  $q$ . Рівнянням Лагранжа другого роду можна описати рухи механічної підсистеми:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \left( \frac{\partial T}{\partial q} \right) = - \left( \frac{\partial U}{\partial q} \right) - \left( \frac{\partial \Psi_m}{\partial \dot{q}} \right) + Q^* + Q. \quad (1.14)$$

де  $T(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T A(q) \dot{q}$  – кінетична енергія у системі;

$A(q)$  – матриця інерції що є позитивною;

$\dot{q}$  –  $n_q$ -вимірний вектор загальних швидкостей;

$-\frac{\partial U}{\partial q}$  – потенційні сили;

$U = U(q)$  – потенційна енергія у системі;

$-\frac{\partial \Psi_m}{\partial \dot{q}}$  – сили дисипації (сила опору в'язкого тертя);

$\Psi_m = \frac{1}{2} \dot{q}^T B_m \dot{q}$  – дисипативная функція системи (Релеєвська

функція);

$B_m$  – матриця дисипативних коефіцієнтів;

$Q^*$  – вектор пондеромоторних сил (сил, що діють на тіла з боку електромагнітного поля);

$Q$  – вектор неконсервативних узагальнених сил механічної природи.

Якщо припустити, що електромеханічна система має складатись з  $m$  контурів. Усі схеми складаються з лінійних провідників і конденсаторів у контурі. Різні ланцюги не пов'язані електрично, але електромагнітні процеси в них не є незалежними, оскільки всі ланцюги знаходяться в одному магнітному полі спільності. Якщо позначити як  $i_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) струм, який протікає в  $k$ -м контурі, як  $u_k$  – задану (сторонню) електрорушійну силу (ЕРС), що прикладена до  $k$ -го контуру.

Нехай  $e_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) заряди конденсаторів, що відповідають струма формулами  $de_k = i_k dt$  або  $\dot{e}_k = i_k$ . Ввівши  $m$ -мірні вектори зарядів  $e = \text{col}(e_1, e_2, \dots, e_m)$  і струмів  $i = \dot{e}$ . Омичний опір  $k$ -го контуру покажемо як  $R_k$ , ємність конденсатора, яка входить у  $k$ -го контур, – через  $C_k$  і позначимо квадратні діагональні матриці  $R = \text{diag}(R_1, \dots, R_m)$ ,  $C = \text{diag}(C_1, \dots, C_m)$ . При умові зміни взаємного положення тіл електромеханічної системи, яка розглядається, дистанція між обкладинками конденсаторів також буде зазавати змін, при цьому значення ємностей будуть функціями які відповідають узагальненій системі координат  $C_k = C_k(q_1, \dots, q_{n_q})$ .

## 1.8 Висновки до першого розділу

У цій частині розглядається математичний опис колісної машини. Подано загальний опис існуючих засобів і методів управління.

Розглянуто порядок створення та категоризації математичних моделей колісних транспортних засобів. Розглянуто схему руху колісної машини.

Побудовано систему координатно-геометричного опису рухомого колісного транспортного засобу.

Розглянуто кінематичні властивості колеса – механічної системи з кінематичними ланками.

Беручи до уваги класифікацію неголономних систем, було помічено, що змінні, які не є повністю ізольованими, використовуються для опису положення колісного роботизованого транспортного засобу.

Сформульовано формулу Маджа для неголономних зв'язаних електромеханічних систем.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЩО ОПИСУЄ РОБОТИ НА КОЛЕСАХ

Метою цього розділу є дослідження властивостей математичної моделі колісних роботів, що передбачає участь потенційних принципів і переваг реалізації алгоритмів керування колісними роботами. Ці атрибути включають доступність, керованість і послідовність. У вирішенні питання про застосування контурних алгоритмів для регулювання моделей колісних роботів особливу роль відіграє створення так званого диференціального плоского виходу, який є, по відношенню до виходу системи, особливим виходом. Не має динаміки. У цьому випадку на поведінку всієї системи впливає умова, накладена на вихід диференціальної площини. Прикладом такого типу системи є традиційний метод Бруновського [16]. Одним із основних означень системи диференціального рівного виходу є можливість перетворити систему в конфігурацію ланцюга з кількома генераторами або подвійну на розширену конфігурацію Gurs.

В основу дослідження покладено метод геометричної теорії складних систем [18]. Щоб полегшити читання цієї глави, у ній спочатку представлено загальні принципи теорії, які мають відношення до предмета дослідження.

### 2.1 Задачі забезпечення керованості роботом

Розгляд системи, яка задана двома параметрами  $(f, D)$ , де  $f \in TM$  – неперервне векторне поле на  $n$ -вимірній неперервній множині  $M$ ,  $D \subset TM$  – неперервний розподіл на  $M$ ,  $\dim D = m$ . Відповідно до цих умов існують наступні основні векторні поля  $g_1(x), \dots, g_m(x)$ , де  $D = \text{span}\{g_1(x), \dots, g_m(x)\}$ . Система  $(f, D)$  встановлює векторне поле на множині  $M$  і її траєкторіями є розв’язання диференційного рівняння:

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)v_i, v = \text{col}(v_1, \dots, v_m) \in U \subset R^m, \quad (2.1)$$

де  $x = \text{col}(x_1, \dots, x_n)$  – локальні координати неперервної множини  $M$ ;

$f, g_1(x), \dots, g_m(x)$  – неперервні векторні поля на множині  $M$ ;

$v \in U$  –  $m$ -функція часу.

Для формулювання умов досяжності і керованості, знайдемо системи

(2.1) для послідовність неперервних розподілів  $\tilde{\Delta}_0 \subset \tilde{\Delta}_1 \subset \dots \subset \tilde{\Delta}_\infty$  і  $D_0 \subset D_1 \subset \dots \subset D_\infty$  наступним чином:

$$\tilde{\Delta}_0 = D,$$

$$\tilde{\Delta}_i = \text{span} \left\{ \tilde{\Delta}_{i-1}, \left[ f, \tilde{\Delta}_{i-1} \right] \right\}, i \geq 1,$$

$$\tilde{\Delta}_\infty = \bigcup_{i=0}^{\infty} \tilde{\Delta}_i,$$

$$D_0 = D,$$

$$D_i = \text{span} \left\{ D_{i-1}, D_f, D_{i-1} \right\}, i \geq 1,$$

$$D_\infty = \bigcup_{i=0}^{\infty} D_i,$$

де  $D = \text{span} \{g_1(x), \dots, g_m(x)\}$  – розподіл керування,

$$D_f = \{f + X : X \in D\}.$$

Відмітимо, що для системи що немає неконтрольований зносу ( $f=0$ )

справедливим є  $\tilde{\Delta}_i(x) = \Delta_i(x), i = 1, 2, \dots$  для будь-якого  $x \in F_v$  (див. п. 1.4).

Найменша підалгебра Лі  $C_0$  для  $R$  векторних полів на  $M$ , яка містить  $D_\infty$ , називається розподілом точної досяжності  $C_0 = Lie(D_\infty)$ . Розподіл  $C = span\{f, C_0\}$  можна називати розподіл досяжності.

Відомо що:

– аналітична система (2.1) має властивість точної досяжності з точки  $x$  (незлічена множина точок, досяжних з  $x$  за досить малий час  $T \geq 0$ , отримує непорожню відкриту множину  $R^n$ ), тоді і тільки тоді, коли:

$$rank C_0(x) = n; \quad (2.2)$$

– аналітична система (2.1) яка має властивість досяжності з точки  $x$  (незлічена множина точок, досяжних з  $x$  за довільний проміжок час  $T \geq 0$ , вміщує відкриту множину, що є непустою  $R^n$ ), тоді і тільки тоді, коли:  $rank C(x) = n$ .

Система (2.1) буде називається керованою, якщо для кожних двох точок  $x_0, x_1 \in R^n$  відомий скінчений проміжок час  $0 \leq T < \infty$  і припустиме керування  $v: [0, T] \rightarrow U \subset R^m$  такі, що відповідна траєкторія системи  $x(t)$  має властивість  $x(T, 0, x_0, v) = x_1$ . Пускай  $f \in D$  і множина

$F = \left\{ f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)v_i : (v_1, \dots, v_m) \in U \right\}$  є симетричною (отже з  $X \in F$  випливає

–  $X \in F$ ), то для того щоб система (2.1) такою що керується, достатньо, щоб вона була суворо досяжною, отже необхідним є виконання умови (2.2). Тоді, коли розподіл керування  $D$  є аналітичним, ця умова є також і необхідною [19].

Усі кінематичні моделі руху платформи робота, що були представлені в п. 1.6, є однозначними керованими. Для платформи з кінематичною схемою, яка в своєму складі має тільки поворотні асиметричні модулі, тоді її керованість виходить з того факту, що розподіл керування  $D_x$  має розмірність, що дорівнює

розмірності вектора стану  $x$ . Інші випадки керованості прямо впливає з повної неголономності кінематичних моделей ( $\text{rank } C_0(x) = m_a(x) = n$ , де  $n = \dim(x)$ ).

Відмітимо те, що лінійна система  $\dot{x} = \sum_{i=1}^m g_i(x_0)v_i$ , являє собою лінеаризовану систему (2.1),  $f = 0$  відносно її розв'язку  $x = x_0$ ,  $v = 0$ , повністю керована тільки в тоді, коли  $m = n$ . Отже, для кінематичної моделі колісного робота отримуємо, що лінійна апроксимація кінематичної моделі платформи, обладнаної асиметричними колісними модулями, є керованою, а для всіх інших моделей – некерованою. Тому інформація втрачається при переході від кінематичної моделі руху платформи, оснащеної не тільки асиметричними колісними модулями, до її лінійної апроксимації.

## 2.2 Запис диференціальних рівнянь опису у канонічній формі

У багатьох випадках алгоритм керування можна легко синтезувати після попередньої підстановки системних координат, завдяки чому рівняння моделі робота набувають більш простих канонічних форм. Задача перетворення нелінійної системи виду (2.1) полягає в знаходженні неособливої нелінійної зміни координат і зворотного зв'язку, за якої перетворена система представлятиме лінійну керовану систему в нових координатах, заданих:

$$\dot{e} = Ae + Bu, \quad (2.3)$$

де  $A - (n \times n)$  і  $B - (n \times m)$  – однозначні матриці і пара  $(A, B)$  є керованою.

Це особливо зводиться до того, що називається канонічною формою Бруновського, яка характеризується тим фактом, що матриці  $A$  і  $B$  приймають у цій блочно-діагональній структурі:

$$A = \text{diag}(A_1, \dots, A_m), B = \text{diag}(B_1, \dots, B_m),$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{k_i \times k_i}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{k_i \times 1},$$

де  $k_i, i = 1, \dots, m$  (цілі числа) – індекси керованості лінійної системи (2.3).

Оскільки керований розподіл не є інволютивним для системи, що розглядається, систему неможливо привести до форми Бруновського за допомогою довільного нелінійного перетворення координат і статичного зворотного зв'язку. Тим не менш, як легко побачити з рівняння (2.1)  $f = 0$ , за додатковою гіпотезою система може бути локально представлена в ланцюжку змінних, так що вона набуває конфігурації, аналогічної електронній, і відома як ланцюгова система представлення[20]:

$$\dot{e}_0 = u_0, \quad (2.4)$$

$$\dot{e}_1 = (Ae_1)u_0 + Bu_1, \quad (2.5)$$

де  $e_0 = \text{col}(e^0)$ ,  $e_1 = \text{col}(e^1, e^2, \dots, e^{m-1})$ ,  $e^i \in R^{k_i}$ ,  $i \in [1, m-1]$ ,  
 $u_0 = \text{col}(u^0)$ ,  $u_i = \text{col}(u^1, u^2, \dots, u^{m-1})$ . Матриці  $A$  і  $B$  представлені в канонічній формі Бруновського з індексами керованості  $k_1, \dots, k_{m-1}$ ,  $u_0$  – який генерує вхід.

Ланцюгове представлення спрощує побудову програмних траєкторій і вирішення таких задач, як стійкі закони зворотного зв'язку [21]. У найзагальнішому випадку форма схеми може мати більше одного генеруючого входу. Ланцюгова форма з одним породжуючим входом називається формою з



яка визначає неінволютивність  $D$ , розглядається як вектор неконтрольованого колапсу. Динамічні компенсатори будуються, коли динамічний зворотний зв'язок використовується для лінеаризації керуючих впливів, що відповідають цій підродині.

### 2.3.1 Лінеаризація у статиці

Припустимо  $m_i(x) = \text{rank} D_i(x), x \in V$  і

$$F_i = \left\{ x \in V : m_j = \sup \text{rank} D_j(x), j = 0, \dots, i \right\}.$$

Зробимо зауваження, що  $m = m_0 \leq m_1 \leq \dots \leq m_\infty \leq n = \dim R^n$  і  $V = F_0 \supset F_1 \supset \dots \supset F_\infty$ . В такому разі, для розподілу  $D_i \in$  локально регулярні, існує позитивне число  $\rho \leq n - m$  таке, що:  $D_0(x) \subset \dots \subset D_{\rho-1}(x) \subset D_\rho(x) = D_{\rho+1}(x) = \dots = D_\infty(x) = C_0, \forall x \in F_\rho$ .

Систему (2.1) називають легколінеаризовною, оскільки в околиці точки рівноваги  $V_0$  при  $x = 0$ , а разом з нею нелінійною зміною координат і статичним зворотним зв'язком, якщо відомий дифеоморфізм конфігураційного простору.

$$e = S(x), S : V_0 \subset R^n \rightarrow R^n, S(0) = 0 \quad (2.7)$$

і статичний зворотній зв'язок (рис. 2.1):

$$v = \eta(x) + \sum_{i=1}^m \zeta_i(x) u_i, u \in R^m, \quad (2.8)$$

де  $\eta(x), \zeta_i(x) : V_0 \subset R^n \rightarrow R^m, \eta(0) = 0$  і  $\zeta(x) = [\zeta_1(x) : \dots : \zeta_m(x)]$  – неособою для  $\forall x \in V_0$  матриці, такі, що система яка трансформована отримує вигляд лінійної системи (2.3) із матрицями  $A$  і  $B$ , показаними в канонічній

формі Бруновського.

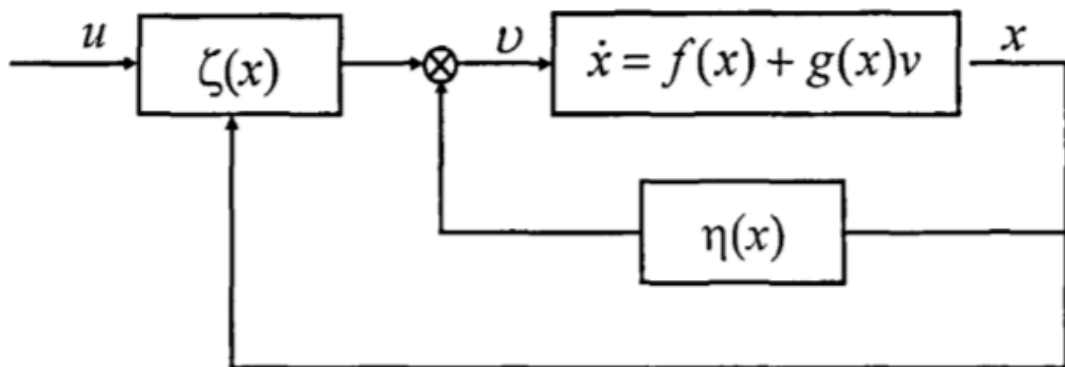


Рисунок 2.1 – Статичний зворотний зв'язок

### 2.3.2 Лінеаризація у динаміці

Нелінійний обмін координатами та динамічний зворотний зв'язок, якщо в системі є дифеоморфізм, система  $(f, D)$  може в околі  $V_0$  в околі напіврівноваги Олсона  $(x, w) = (0, 0)$  Лінійно розширте простір конфігурації за допомогою:

$$e = S(x, w), S : V_0 \subset R^n \times R^p \rightarrow R^n \times R^p, S(0, 0) = 0.$$

і динамічний зворотній зв'язок (рис. 2.2):

$$\dot{w} = f^w(x, w) + \sum_{i=1}^m g_i^w(x, w)u_i, w \in R^p, \quad (2.9)$$

$$v = \eta(x, w) + \sum_{i=1}^m \zeta_i(x, w)u_i, u \in R^m, \quad (2.10)$$

де  $f^w(x, w), g_i^w(x, w) : V_0 \subset R^n \times R^p \rightarrow R^p$ ,

$\eta(x, w), \zeta_i(x, w) : V_0 \subset R^n \times R^p \rightarrow R^m$ ,  $f^w(0, 0) = 0, \eta(0, 0) = 0$ , такі, що система яка трансформована отримує вигляд лінійної системи  $(Ae, B)$  із матрицями  $A$  і  $B$

( $\dim A = (n + \rho) \times (n + \rho)$ ,  $\dim B = (n + \rho) \times m$ ), представленими у канонічній формі Бруновського.

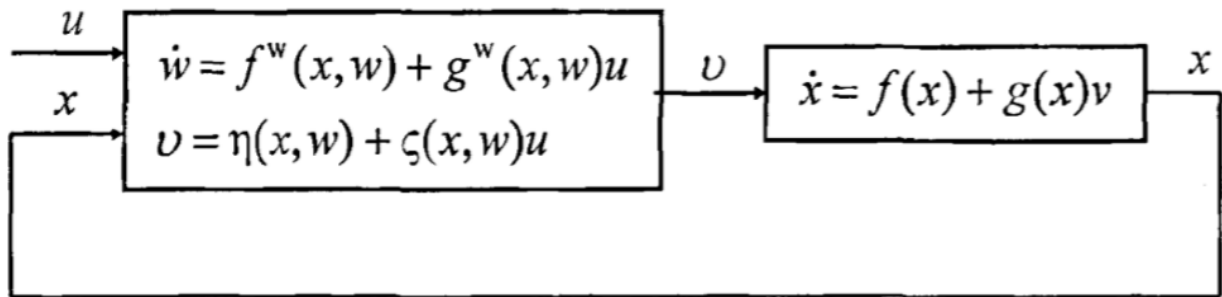


Рисунок 2.2 – Динамічний зворотній зв'язок

### 2.3 Забезпечення стабілізація для неголономних систем

Задача стабілізації системи (2.1) за допомогою неперервного зворотного зв'язку за станом формулюється так: заданий закон зворотного зв'язку  $v = K(x)$ , де  $K(x)$  – неперервна функція, знайти такий, щоб замкнута система була відомою.

$$\dot{x} = f(x) + G(x)K(x), \quad (2.11)$$

де  $G(x) = [g_1(x), \dots, g_m(x)]$ , є стійкою асимптотичним чином, отже всі розв'язки системи  $x(t) = x(t, t_0, x_0)$  також за асимптотою прямують до прийняття значення нуль для кожного початкового стану  $x(t_0) = x_0$ , які мають належність до околиці рівноважного положення. З теорії нелінійних систем, звичайно, відомо: насправді досить керувати лінійною системою, щоб існував непостійний зворотний зв'язок стабілізації стану. Нелінійною системою також можна керувати, але раніше було достатньо мати постійний стабілізуючий зворотний зв'язок.

## 2.4 Висновки до другого розділу

У цьому розділі розглядається математична модель колісних роботів. Визначено процедурний метод розв'язання задачі апроксимації траєкторії руху на основі кінцевого автомата.

Розглянуто методи керування мобільним роботом.

Проаналізовано канонічні форми та системи диференціальних площин, що стосуються поставленої проблеми.

У цій роботі проблеми, пов'язані з моделлю колісного робота, розглядалися через статичну та динамічну лінеаризацію, стійкість неголономних систем щодо мобільного колісного робота в його стані рівноваги.

### 3 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Постановка задачі

Розглянемо, наприклад, навчальне поле з 9 маяками, підвішеними на висоті 500 мм, які несуть інфрачервоні випромінювачі по колу навколо однієї з майже круглих мод. Усі маяки мають контактні датчики, які повинні реагувати, якщо контактне кільце робота («шафки») торкається маяка, і контакт утримується автоматикою полігону.

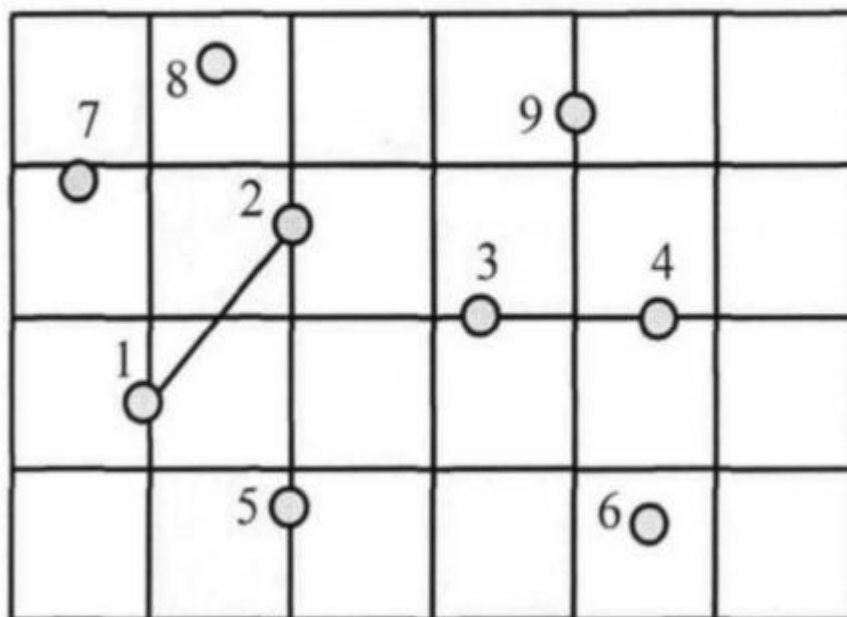


Рисунок 3.1 – Схема полігону

Система керування полігоном базується на ПК та включає апаратне забезпечення для передачі всіх показань радіомаяків датчиків у комп'ютер, активації та дезактивації маяків. Автоматичний облік часу дозволяє виконувати різноманітні поставлені завдання. У проекті полігону передбачено прокладання нових доріжок, зміна послідовності розміщення маяків.

Робот повинен виконати кілька вправ, залежно від завдання.

«Вибірка» – при формуванні алгоритму одночасно вмикаються кілька

маячків, і робот повинен рухатися так, щоб нашттовхнутися на будь-який включений, а потім вимкнений маячок. Кожен маяк повинен бути «погашений». Гра завершується реєстрацією часу контакту з останнім маячком або через фіксований проміжок часу. Порядок, у якому обробляються маяки, є випадковим;

Дія робота справді полягає в тому, щоб рухатися вперед, щоб відбувся контакт, тому минув певний проміжок часу, щоб він міг досягти маяка, який вмикається та замінюється іншим маячком, що вмикається або після сигналу контакту. передається або після затримки. Замість того, щоб подавати через інший маяк, два маяки подаються одночасно, після чого робот повинен пройти між ними та пройти через «ворота», утворені ними, не торкаючись маяків. Знаючи прохід, двері відкриваються для наступного маяка після другого і так далі. Жодна повторна активація будь-якого маяка після другого контакту не повинна здаватися роботу остаточною;

У «Маяк-ворота» вправа така ж, як і в «Маяк-ворота», з тією відмінністю: маяк, який утворює ворота, не закривається після проходження воріт, а потім робот по черговою обертається навколо маяка, тобто «вісімки». впливає. Він обходить один з маяків, знову проходить через ворота в тому ж напрямку, потім обходить другий маяк, знову проходить через ворота в тому ж напрямку і так далі. Після маяка «вісімка» закриваючий маяк закривається ногою, відкривається наступним у рядку відповідно до маяка або воріт тощо. ... дійти до фінішу

«Змійка» - при запуску та вході кількох маячків, які відкриваються в «змійковій» послідовності – «Змійка». Його початок визначається останньою парою доступних маяків таким чином, щоб він міг пройти крізь «змію», не торкаючись останніх воріт змії маяки, що його складають, закриваються, а останній відкривається.

На рисунку 3.2 представлені приклади виконання різних з представлених вище вправ: а) вправа «змійка», б) вправа «маяки-ворота-вісімки».



багато обмежень, як функцію співвідношення різних змінних систем, присутніх у просторі. . Наприклад, у траєкторних задачах найбільш значущі зв'язки представлені аналітичним описом певної траєкторії руху. Крім того, відповідальність системи управління зводиться до забезпечення стійкості об'єкта щодо заданої траєкторії та забезпечення необхідної схеми поздовжнього руху. Інші обмеження можуть стосуватися необхідності орієнтації робота та розподілу сигналів керування колісними модулями, а також необхідності індивідуальних керуючих впливів приводу. Достатня кількість цих співвідношень необхідна для формулювання правильної задачі автоматичного керування та подальшого проектування практичного багатоканального регулятора.

Структурна схема мобільної роботизованої системи керування, яка зображена на рисунку 3.3, призначена для вирішення транспортних завдань: «Відбір», «Маяки», «Маяки-8», «Змійка». Зовнішнє середовище, яке безпосередньо взаємодіє з роботом.

який впливає на роботу системи, є багатокутник з маяками:  $Y^* = \{(y_{11}^*, y_{12}^*), (y_{21}^*, y_{22}^*), \dots, (y_{n1}^*, y_{n2}^*)\}$  – вектори координат активних маяків, де  $n$  – загальна кількість активних маяків. Система датчиків отримує інформацію про поточне положення маяка відносно рухомого робота та його швидкість. Він має дві окремі частини: датчик руху та тіньову систему, яка візуалізує оточення. На підставі сигналу маяка СТЗ визначає параметри виявленого маяка: орієнтацію маяка (кут між напрямком маяка та довгою віссю робота) та відстань до маяка. Ці сповіщення надсилаються аналітику. Робота аналітика полягає в тому, щоб створити життєздатний шлях для руху робота, який базується на виконаній процедурі. На виході аналізатора міститься очікуване значення лінійної та кутової швидкостей робота. Крім того, ці сигнали надходять на вхід контролера нижнього рівня, який виробляє керуючий ефект, який переміщує робота по заздалегідь заданій траєкторії в просторі. Вихідними даними системи є вектор лінійної швидкості  $V$  і кутова швидкість машини відповідно.

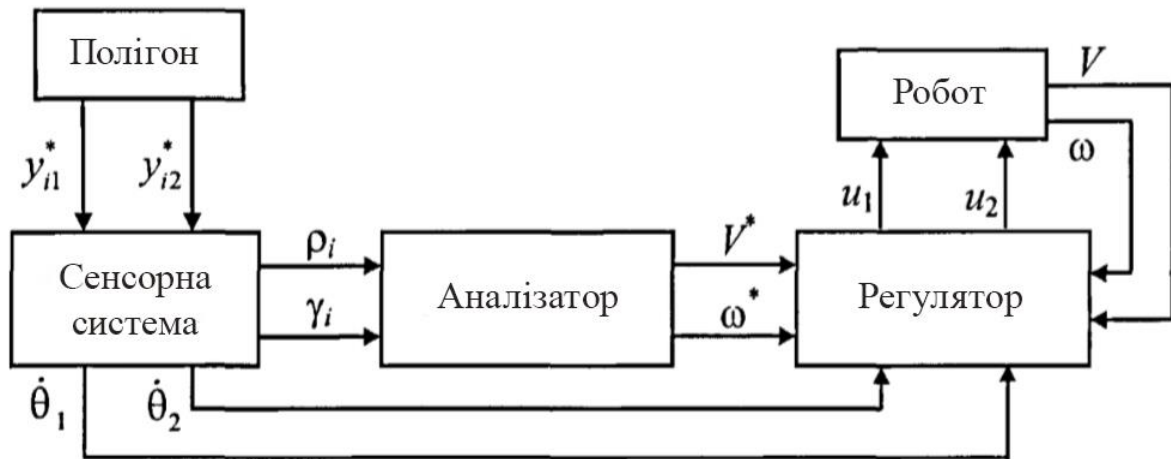


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи керування

Кожне завдання, яке виконує мобільний робот, залежить від шляху, яким він слідує, який визначається маяком. Залежно від опису завдання, робот повинен виконати наступне:

- перейти до певної локації, положення якої визначається маячком, що випромінює (рис.3.4а);
- прохід між двома маяками (рисунок 3.4б);
- рух навколо маяка (рис. 3.4в).

Виконання другого завдання аналогічно першому, відмінність лише в тому, що в другому випадку завдання полягає в переміщенні заготовки по бісектрисі кута між маяками, які створюють двері. У результаті в подальшому основними контрольними завданнями будуть вважатися лише завдання переміщення в конкретне місце та завдання переміщення навколо маяка. Відповіддю на будь-яке з перерахованих вище завдань можна вважати комбінацію двох завдань. Це означає, що будь-яку траєкторію руху робота можна описати як серію сегментів руху, які слідує за первинними елементами: прямими лініями та колами (дугами).

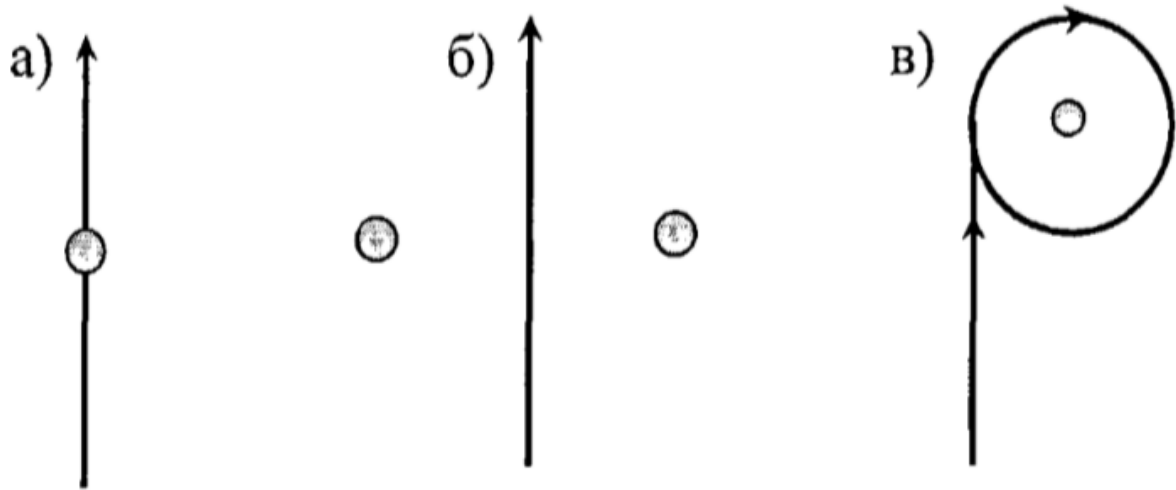


Рисунок 3.4 – Основні завдання керування рухом робота

Відповідальністю верхнього рівня системи управління є визначення типу питання, яке вирішується в даний момент, створення правильної траєкторії руху на основі інформації, отриманої від СТЗ, і передача очікуваних значень руху. параметрів на нижній рівень. - контролер рівня.

В описаній системі управління аналітик реалізований як програмний процес, який зазвичай автоматизований. Для кожної розглянутої задачі в якості кінцевого автомата використовується «маяк», «8» або «змія». Запропонований метод гарантує перш за все легітимність процесів побудови та верифікації, їх послідовність, чіткість, структурованість та формалізацію можливостей моніторингу та управління.

Інформація, отримана від аналізатора, використовується локальним контролером для створення ефектів, які направляють рух робота в просторі. Крім того, можна розпізнати такі завдання: контроль руху до маяка, контроль руху навколо маяка та динамічний контроль руху. Регулятор схожий на аналізатор, реалізований програмно; зводить синтез законів керування для розглянутої транспортної задачі до розв'язання задачі стабілізації кута повороту та поздовжньої швидкості робота. Коли ви маєте справу з проблемами керування дорожнім рухом у динамічному середовищі, також необхідно розвивати динамічних спостерігачів.

Архітектура сформованої системи керування роботом є ієрархічною. На верхньому рівні – ідентифікація завдань і планування руху робота, а на нижньому рівні – правила, які керують змінами, щоб забезпечити рух робота робочим простором відповідно до проблеми, яку потрібно вирішити. При аналізі працездатності системи керування будь-яка складна траєкторія руху робота може бути зведена до набору елементарних примітивів руху по прямих і по колу (дуг). Усі ці контролери повинні працювати в режимі реального часу, тобто вони вимагатимуть більшої швидкості від апаратного забезпечення та ефективності алгоритму.

### 3.3 Алгоритм апроксимації

У операціях що досліджуються апроксимаційний алгоритм — це алгоритм, який використовується для пошуку наближених розв'язків задач оптимізації [26].

Наближені алгоритми часто асоціюються з NP-складними задачами, оскільки для них малоймовірно, що ефективний алгоритм знайде точне рішення за поліноміальний час, тому має сенс спробувати знайти майже оптимальне рішення. Хороші евристичні алгоритми забезпечують досить хороші рішення протягом прийняттого періоду часу; апроксимації забезпечують перевірене якісне рішення протягом заданого періоду часу. В ідеалі апроксимація знаходить рішення, яке на невеликій відстані від оптимального рішення; скажімо, в якомусь невеликому коефіцієнті 5%. Наближені алгоритми все частіше застосовуються до задач, для яких ми не тільки знаємо, що оптимальний алгоритм виконується за поліноміальний час, але також знаємо з теорії, що навіть для задач помірною розміру час виконання точних алгоритмів є надзвичайно довгим. Стандартним прикладом апроксимаційного алгоритму є алгоритм у теорії графів, який вирішує проблему покриття вершин. Якщо кожен крок такого алгоритму охоплює два непокриті ребра, то це, очевидно,

може бути вдвічі більше, ніж мінімум. Таким чином, це 2-наближений алгоритм.

NP-складні проблеми зазвичай можна виразити в термінах цілочисельного програмування та розв'язати точно за експоненціальний час. Багато експоненціальних алгоритмів беруть свій початок із перетворення цілочисельних задач у задачі лінійного програмування.

В даний час відомо декілька стандартних методів розроблення алгоритмів апроксимації. Серед яких:

- а) жадібний алгоритм;
- б) локальний пошук;
- в) перерахування та динамічне програмування;

г) послаблюючий розв'язок задачі опуклого програмування, можна отримати менший розв'язок. Потім розчин перетворюється на відповідний розчин шляхом округлення. Популярні способи послабити завдання:

- 1) Зводити до задачі лінійного програмування;
- 2) Спрощена до напіввизначеної задачі програмування;

е) Визначте якусь просту міру проблеми та метод використання цієї міри для вирішення проблеми.

### 3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі описуються завдання, поставлені для подальшого вирішення: «Відбір проб», «Ворота маяка», «Ворота маяка вісім», «Змійка».

Сформовано структурну схему системи керування колісним мобільним роботом.

Розроблено апроксимаційний алгоритм виконання задачі змінних координат траєкторії руху колісного робота та напрямку руху по заданому полігону в динамічному середовищі за допомогою маяків.

## 4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ АПРОКСИМАЦІЇ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ РОБОТА

### 4.1 Скінченні автомати

Цей розділ далі зосереджується на розробці алгоритму для визначення орієнтації робота в робочому просторі (багатокутник на основі маяка). Це завдання було віднесено до вищих рівнів системи контролю. У дослідницькій роботі ми запрограмували рішення для пошуку жестів руху за допомогою кінцевих автоматів. З більш технічної точки зору, автомат — це символічна, але адекватна модель, що описує дискретні (різновид цифрових) обчислень або управління [27]. Однією з найпродуктивніших областей, в якій працюють кінцеві автомати, є моделювання систем, визначених як реактивні. Реагуючими або реактивними є типи систем, які реагують на потік подій шляхом перемикання станів і виконання дій або операцій у стані, а також виходів і входів, коли вони перемикаються між станами [28]. Початковою діяльністю, що створює джерело, є навколишнє середовище (на відміну від електронного комп'ютера, на якому виконується програма для реактивної системи). Останнім часом спостерігається поживлення інтересу до кінцевих автоматів у програмуванні логічного керування та об'єктно-орієнтованого програмування. Вони застосовуються для програмування протоколів, програмування ігор і програмованих логічних схем, а також для написання компіляторів. Автомати є однією з математичних моделей дискретної математики, але їх можна використовувати для програмування будь-якої поведінки, якими б складними не були операції. Перевага кінцевих автоматів полягає в тому, що вони дозволяють розподіляти роботу над складними загальними завданнями на простіші підзадачі. Використання пристроїв кінцевих автоматів забезпечує високий ступінь формалізації при побудові програми та при перевірці її правильності, узгодженості, наочності, структурованості, спостережливості та керованості [29]. Останній термін тут розглядається в ширшому значенні:

алгоритми та програми, як і властивості, спрощують їх коректну зміну. Також було б цікаво розглянути, яке програмне забезпечення для моделювання існує, що дозволяє створювати кінцеві автомати; таким чином, спеціальний інструмент Matlab Stateflow для синтезу, аналізу та моделювання складних активних систем, заснованих на кінцевих автоматах.

Основна ідея запропонованої технології - це концепція «внутрішнього стану» (надалі - стан). Таким чином, початкова абстракція, введена на етапі початкового алгоритму процесу, наприклад, явним визначенням кожного з них до одного з фізичних станів об'єкта управління, нарешті функціональність виробничої системи стає зміною своїх станів для відображення стану. Одночасно кожен стан в алгоритмі підтримує об'єкт у відповідному стані, а перехід до нового стану в алгоритмі задає об'єкт перейти в нове відповідний стан, забезпечуючи таким чином процес логічного контролю об'єкта. поручення. Стан системи виконує функцію її історичної пам'яті.

Система  $S = \{U, X, Y, \delta, \lambda\}$ , називається скінченим автоматом, де  $U, X, Y$  – множини що є скінченими (алфавіти):  $U = \{u_1, \dots, u_m\}$  – вхідний алфавіт,  $X = \{x_1, \dots, x_m\}$  – алфавіт стану,  $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$  – вихідний алфавіт. А  $\delta: X \times U \rightarrow X$ ,  $\lambda: X \times U \rightarrow Y$  – є функції, які встановлено для таких множинах:

$\delta$  – перехідні правила,  $\lambda$  – вихідні правила. Якщо, крім того, в автоматі  $S$  виділяється один стан, який називається початковим, то отриманий автомат можна назвати початковим.

Оскільки функції  $\delta$  і  $\lambda$  визначені на скінчених множинах, їх зручно задавати в таблицях. Зазвичай дві таблиці об'єднують в одну  $\delta \times \lambda: X \times U \rightarrow X \times V$ , звану таблицею переходів автомата або просто автоматної таблицею. Іншим поширеним і наочним методом асоціації з автоматом є орієнтований мультиграф, який називається графом переходів або діаграмою переходів. Вершини графа є станами, якщо  $\delta(x_i, u_j) = x_k$  і

$\lambda(x_i, u_j) = y_l$ , то з  $x_i$  в  $x_k$  веде ребро, на якому написані  $u_j$  і  $y_l$ . Для будь-якого графа переходів у кожній вершині  $x_i$  виконані такі умови, названі умовами автоматності або коректності [30]:

– для будь-якої вхідної букви  $u_j$  відоме ребро, що виходить з  $x_i$  у якому написано  $u_j$  (умова повноти);

– будь-яка буква  $u_j$  зустрічається тільки у одного ребра, що виходить з  $x_i$  (умова несуперечливості або ж детермінованості).

Автомат S вважається частково або повністю детермінованим, якщо хоча б одна його функція не є повністю детермінованою, тобто для деяких пар станів і входів значення функцій  $\delta$  і  $\lambda$  невідомі. У таблиці автомата незавершеність автомата демонструється тим фактом, що деякі його клітинки порожні - вони позначені рисками. У графі часткового автомата, який не є повним, умова повноти порушується у вершинах, де значення дельта невідоме.

На практиці зазвичай використовуються два різновиди автоматів - Мілі і Мура. Вихід автомата Мура залежить лише від поточного стану  $\lambda : X \rightarrow Y$ , в той час, як вихід автомата Мілі є функцією як поточного стану, так і початкового зовнішнього впливу  $\lambda : X \times U \rightarrow Y$ . Загальноприйнято думати про функцію виведення автомата Мура як про функцію з одним аргументом, ця функція називається функцією позначки, оскільки вона однозначно пов'язує кожен стан із позначкою, яка є виходом автомата, і записується як  $\mu$ . У графі автомата Мура вихід записується не на ребрах, а на вершині.

Розглянемо вирішення задачі планування руху роботизованого транспортного засобу в середовищі з оптичними маркерами за допомогою загальноприйнятого автоматичного методу. Для кожної із задач, перелічених у вхідних даних («Приклад», «Маяк шлюзу», «8 точок», «Змія»), був побудований кінцевий автомат. В якості первинної структурної моделі запропоновано використання автоматів Мура, коди станів і вихідні значення

розділені, а значення вихідної змінної в кожному стані не залежить від вхідного впливу, це спростить опис таких автоматів усунувши потребу в описі.

#### 4.1.1 Розв'язання задачі «Вибірка»

Опис задачі: кілька маяків розташовані на початку, їхнє розташування не визначене заздалегідь. Завдання роботизованого пристрою — підійти до будь-яких маяків, які є, а потім вимкнути пристрій. Важливо загасити всі маяки. Спосіб обробки маяків. Правило побудови послідовності полягає в тому, щоб мінімізувати кількість проходів по маршруту шляхом послідовного з'єднання всіх маяків. Оскільки робот рухається з постійною швидкістю, щоб виконати завдання за найкоротший час, він повинен знайти шлях, який перетинає всі активні маяки та має найменшу довжину одночасно.

Одним із можливих підходів до вирішення цієї проблеми є використання алгоритму «найближчого сусіда» [31]. Цей алгоритм вибирає маяк, найближчий до робота, як перший маяк. Коли він активний, серед усіх активних маяків ми вибираємо роботизований пристрій, який є найближчим до поточної позиції.

Давайте створимо граф завдань  $G$ , який має кожен маяк як вершину, а друга вершина представляє початковий стан роботизованого пристрою. Ребра сполучаються з маяками, а також з джерелом руху — маяками (рис.4.1). Подорож маяка ідентична порядку графа завдань ребра, який складається з двох суміжних ребер із спільною початковою точкою. Пускай кожне ребро  $(v', v'')$   $\in G$  відповідне дійсному числу  $l(v', v'')$  - його відстані. Тож довжина шляху визначається сумою довжин ребер, що містяться в ньому. Цей шлях називається маршрутом, а найкоротший маршрут — це загальна довжина найкоротших шляхів на графіку. Ми будемо вважати найкоротшим гамільтоновим циклом простий цикл, який відвідує кожен вершину даного графа і має найменшу загальну довжину ребер.

У різних випадках на тестовому сайті ми спостерігали, що згаданий раніше алгоритм «найближчого сусіда» не завжди був ефективним, тобто шлях,

отриманий цим методом, не завжди мав мінімальну довжину. Подумайте про наступний сценарій. Положення маяка показано на малюнку 4.1а. Дозвольте машині розпочати роботу з вершини А. Дотримуючись алгоритму «найближчого сусіда», описаного раніше, ми отримуємо наступний маршрут, який перетинає всі маяки:  $AC + CD + DE + EB = 2 + 1 + 2 + 3,6 = 8,6$ . Але найкоротший маршрут у цьому випадку –  $AB + BC + CD + DE = 1,83$ :

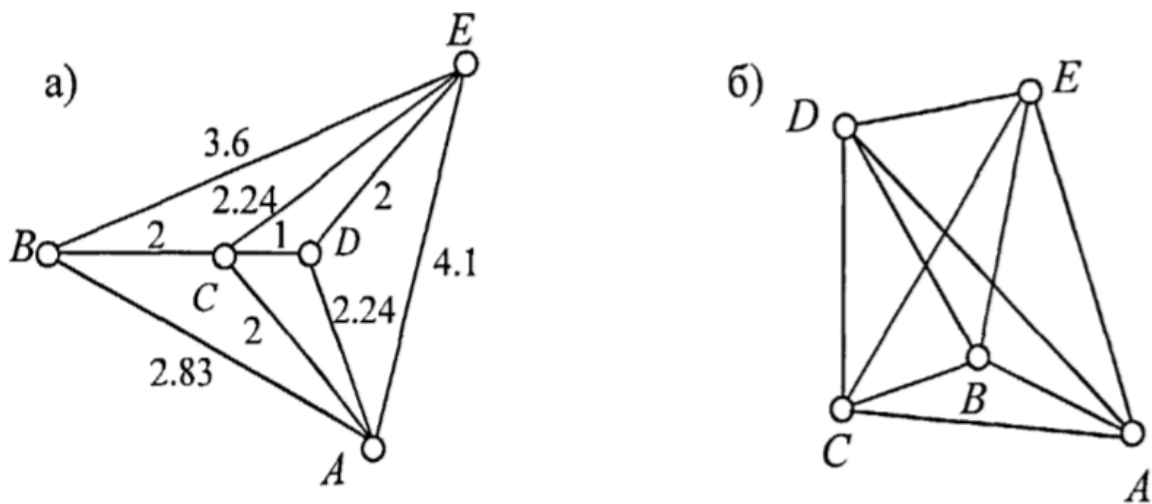


Рисунок 4.1 – Приклади графів завдання «Вибірка»

Давайте з'ясуємо обставини, за яких алгоритм «найближчого сусіда» дає шлях мінімальної довжини через усі маяки.

Теорема 4.1. Дозвольте мінімальному гамільтоновому циклу охопити всі вершини графа, задіяного в задачі. Для кожної вершини графа асоційоване з нею ребро є ребро, яке належить найкоротшому гамільтоновому шляху, і має найменшу вагу з усіх асоційованих ребер цієї вершини. Тоді шлях через усі вершини задачі графа, створений алгоритмом «найближчого сусіда», матиме найменшу довжину.

Умови теореми вимагали видалення деяких ребер із мінімального гамільтонового шляху, що призвело до маршруту мінімальної довжини, який перетинав усі вершини. Продемонструємо це твердження. Припустимо, може існувати інший маршрут  $Z'$ , який теж по'єднує всі вершини графа і не

належить до мінімального гамільтонового циклу. Маршрут розійдеться на певному етапі, проходячи через усі вершини послідовно. У той же час маршрут  $Z'$  міститиме довші ребра, оскільки всі ребра інцидентні вершині, а ребро з найменшою вагою належить найменшому гамільтоновому циклу. Тому будь-який інший маршрут  $Z'$  може містити деякі ребра маршруту  $Z$ , отримані з мінімального гамільтонового циклу, і, крім того, обов'язково довші ребра. Отже, довжина маршруту  $Z$ , отриманого з мінімального гамільтонового циклу шляхом відкидання одного з ребер, буде меншою за довжину будь-якого іншого маршруту  $Z'$ , що містить ребро більшої довжини.

Тепер давайте продемонструємо, що всі ребра в маршруті, побудованому за допомогою алгоритму «найближчого сусіда», є частиною мінімального гамільтонового циклу. Насправді алгоритм «найближчого сусіда» вибирає ребро з найменшою вагою наступним кроком у побудові маршруту. Умови теореми вказують на те, що серед усіх ребер, пов'язаних із певною вершиною, ребро з найменшою довжиною є частиною мінімального гамільтонового шляху. У результаті весь шлях, включаючи ребро з найменшою вагою, є частиною мінімального гамільтонового шляху.

Для графа на рисунку 4.2 кожна вершина задовольняє вимогам теореми. В результаті короткий шлях може бути отриманий з будь-якої вершини за допомогою протоколу «найближчого сусіда». Крім того, важливо врахувати, що під час виконання завдання «Вибір» робот по черзі пройде всі маяки та загасить їх за допомогою унікального замку. Це означає, що карта місії фактично змінюється, коли маяк гасне. Результуючий графік отримується шляхом повернення до вихідного графіка, коли гамільтонів цикл мінімізується. Цей мінімізований гамільтонів цикл повертається перед отриманням повністю згасаючого маяка, так що вершини, що відповідають повністю згасаючому маяку, і ребра, що приєднують ці вершини до інших вершин у графі, безперервно висуваються з вихідного графа. Тепер припустімо, що рух робота починається з  $A$  у верхній частині рис. 4.2. Спочатку мінімальний маршрут

передбачає таку послідовність ребер:  $AB, VS, CD, DE, EA$  для переміщення від  $A$  до  $E$ . Розрізний тип, проти  $5^\circ$  замість  $4^\circ$ ,  $AB$  пов'язаний з ребром і максимумом Кут падіння  $SWB 35^\circ$  Усі подібні створіння природи – від гір до людських кісток – відбуваються під певним кутом [goniometer.getmore.in.mp4](http://goniometer.getmore.in.mp4)'[mobvv.carry.amiodnighingaleschools](http://mobvv.carry.amiodnighingaleschools) тощо. У природі різні переломи зустрічаються під певною кількістю кутів.

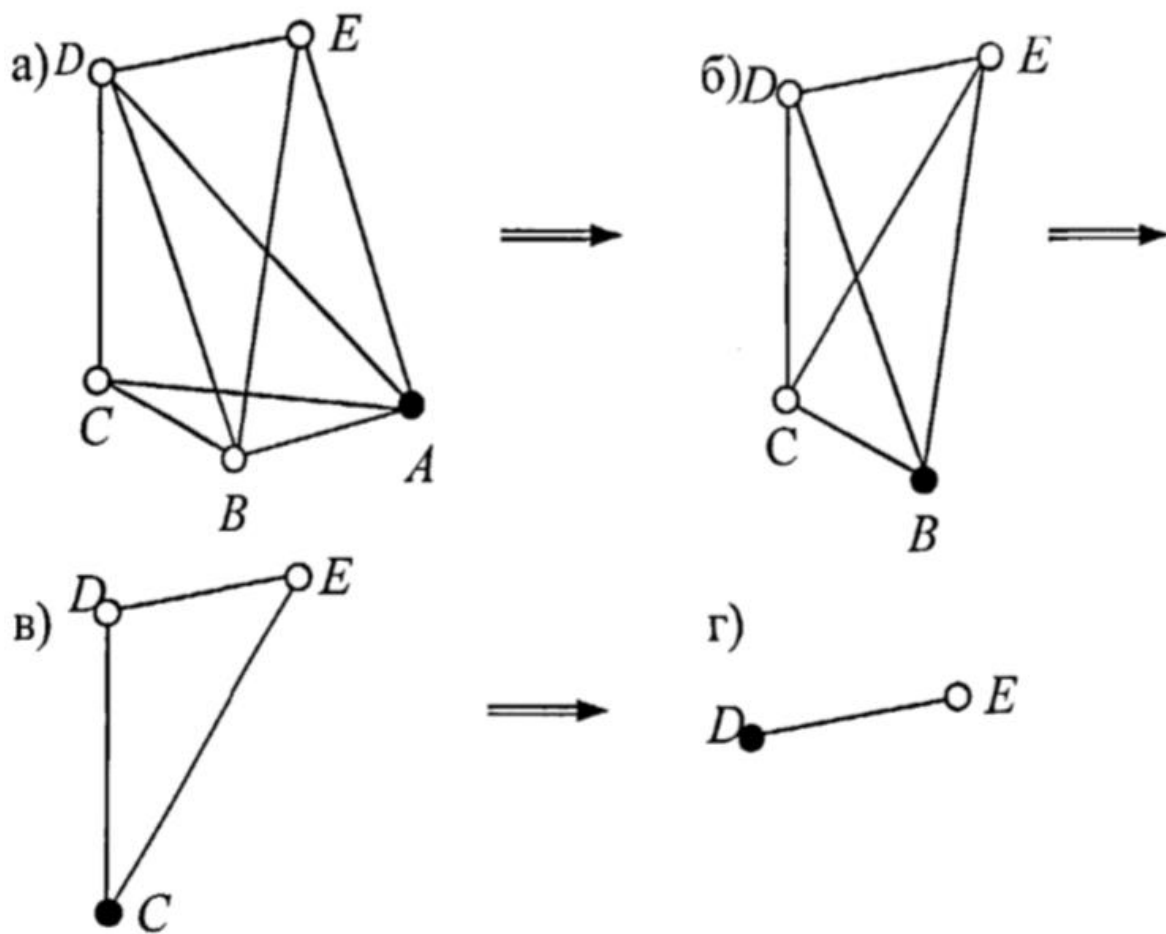


Рисунок 4.2 – Приклад знаходження мінімального маршруту

Це не умови теореми, які необхідні для побудови мінімальних шляхів, хоча їх достатньо. Давайте зробимо це більш зрозумілим за допомогою прикладу; розглянемо діаграму на рисунку 4.1b. Ряд ребер  $AB, VS, CD, DE, EA$  цього графа утворює цикл мінімальної довжини через усі вершини. Тільки перші дві початкові вершини,  $A$  і  $B$ , здатні досягти форми Гамільтона мінімальної довжини за допомогою алгоритму найближчого сусіда. Ланцюг

Гамільтона: Маршрути — це прості ланцюги, отримані з мінімального гамільтонового циклу видаленням останнього ребра з ланцюга до початкової вершини.

Однак знаходження найменшого гамільтонового циклу насправді не гарантує, що ви знайдете шлях навіть для графіка, доступного на малюнку 4.1а, який не задовольняє умови теореми. Найменший гамільтонів цикл даного графа представлено ребрами  $AB, VS, CE, ED, DA$ . Шлях найближчого сусіда виявляється мінімальним лише в тому випадку, якщо робот починає рух у вершині  $E$ , але отримані шляхи  $ED, DC, SV, VA$  перетинають один одного, але не підпадають повністю під мінімальний гамільтонів цикл графів  $AB, BC, CE, ED, DA$ . Таким чином, шлях, отриманий з мінімального гамільтонового циклу шляхом викидання одного ребра, відповідного останній вершині, не стає мінімальним. Незалежно від того, з яких інших вершин ви рухаєтесь на графі, шляхи найближчих сусідів, отримані від цих вершин і далі, починаючи з цих вершин, не дадуть мінімальної ваги.

Такі обмеження можна, наприклад, вивести з наведених прикладів, що означає, що запропонована стратегія виконання операції «вибірки» за допомогою алгоритму «найближчого сусіда» не завжди є оптимальною через обмеження, викладені в теоремі 4.1. Однак використання будь-якого іншого алгоритму вимагало б попереднього знання всього графа завдання, що обчислювально дорого і фізично досить складно. Це тому, що спочатку робот бачить маяки під певним кутом; маяки можуть накладатися, закривати один одного тощо. Отже, алгоритм «найближчого сусіда» є оптимальним алгоритмом для фізичної реалізації. Представимо розв'язок задачі «відбір і збереження» у вигляді кінцевого автомата. Вхідний алфавіт складатиметься з інформації про тип подій.

Маяки від систем технічного зору:  $U = \{u_1 - \text{хоч один активний маяк; } u_2 - \text{ немає активних маяків}\}$ . Елементи вихідної множини являють собою фази руху  $Y = \{y_1 - \text{рух прома на маяк; } y_2 - \text{зупинка}\}$ . Алфавіт станів для завдання

«Вибірка» представляє собою двоелементну множину:  $X = \{x_1 - \text{рух прямо на маяк}; x_2 - \text{зупинка}\}$ . Автомат є таким що ініційований, коли початковий стан –  $x_1$ . Граф переходів, відповідає тому що записано в кінцевому автоматі, представлено на рисунку 4.3. Таблиця 4.1 показано як таблицю переходів вказаного кінцевого автомата Мура.

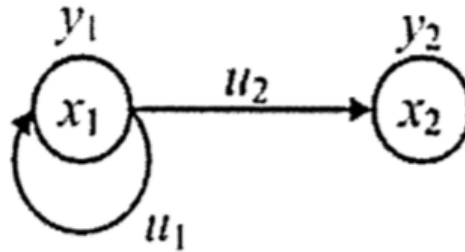


Рисунок 4.3 – Кінцевий автомат, що реалізує задачу «Вибірка»

Таблиця 4.1 – Таблиця переходів

	$u_1$	$u_2$	
$x_1$	$x_1$	$x_2$	$y_1$
$x_2$	-	-	$y_2$

#### 4.1.2 Розв'язання задачі «Маяки-ворота»

Запалюючи маячок у момент його запуску, робота має бути пов'язана з ним, після чого маячок вимикається і включається наступний і т.д. 2 з них могли бути запалені в однаковий момент, але не інший, у цей момент робота має рухатися між двома маяками в положенні, в якому вони утворюють «двері», не торкаючись їх. Коли двері вибрано, відкрийте наступний маяк або двері тощо. Маяки, які не загоряються після наступного кроку, мають виглядати роботом освітленими. Щойно останній маяк вимикається на тому, що робот інтерпретує як свій останній етап, реєструється тайм-аут, і завдання має бути виконано миттєво.

Це чимось схоже на рух до маяка, але робот повинен рухатися по бісектрисі кута між маяками. Для проходу через ворота, встановлені в цьому напрямку, серед інформації від датчика технічного зору з напрямком на маяк і відстанню до маяка визначається бісектриса кута між маяками, після чого робот рухається через ворота в цьому напрямку. Рішення цієї проблеми також можна представити за допомогою структурної діаграми, як показано на малюнку 4.4.

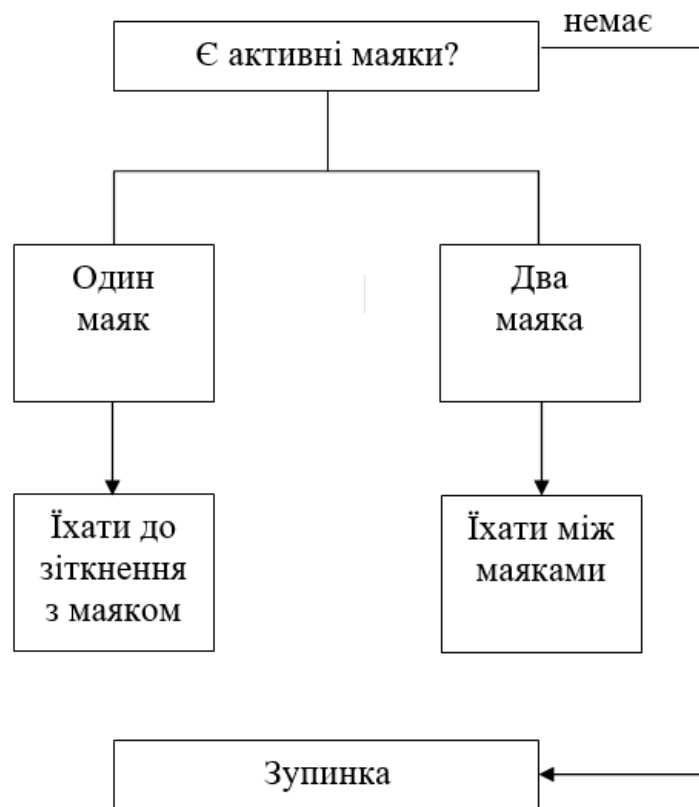


Рисунок 4.4 – Структурна схема алгоритму управління для завдання «Маяки-ворота»

Розглянемо, як розглянути задачу за допомогою кінцевої машини. Для цього ми повинні встановити не лише алфавіти введення та виведення, а й алфавіти стану. Коли ми маємо інформацію про фактичні події, які відбуваються, їх можна вважати набором вхідних даних.

Кількість маяків в системах технічного зору:  $U = \{u_1 - \text{один активний маяк}; - \text{більше двох активних маяків}; u_4 - \text{активних маяків немає}\}$ . Елементи

вихідного набору представляють фази руху  $Y = \{y_1 - \text{лінійний рух } y_2 - \text{зупинка}\}$ ; Алфавіт станів такий:  $X = \{x_1 - \text{прямолінійний рух до маяка; } x_2 - \text{прямолінійний рух між маяками; } x_3 - \text{зупинка}\}$ . Автомат ініціалізовано, а початковий стан –  $x_1$ . Діаграма переходу, що відповідає скінченному автомату для розв'язку задачі маякових воріт, показана на малюнку 4.5. Таблиця 4.2 є таблицею переходів для описаного кінцевого автомата Мора.

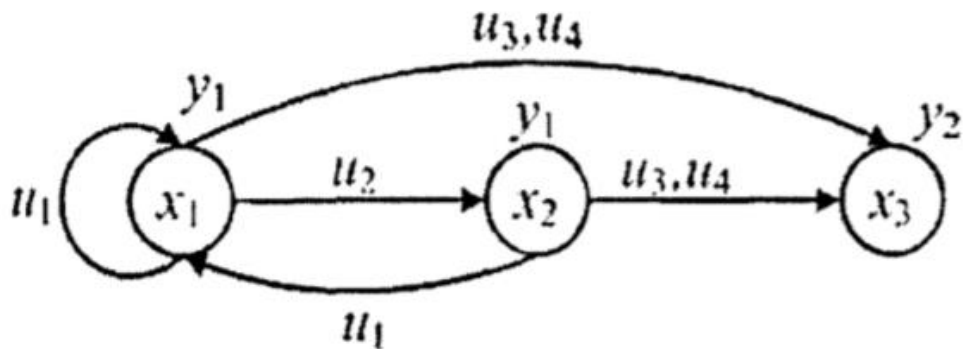


Рисунок 4.5 – Кінцевий автомат, що реалізує задачу «Маяки-ворота»

Таблиця 4.2 – Таблиця переходів

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	
$x_1$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_3$	$y_1$
$x_2$	$x_1$	-	$x_3$	$x_3$	$y_1$
$x_3$	-	-	-	-	$y_2$

#### 4.1.3 Розв'язання задачі «Маяки-ворота-вісімки»

Рухаючий маяк спочатку слід увімкнути, підійти до нього на пряму видимість, а потім вимкнути маячок і запустити наступні. Відкрито тощо. Два маяки можна відкривати поруч, а інший не відкривати, таким чином створюючи «ворота». Якщо маяк, який працює як ворота, також не може закрити стовп, робот проходить через ворота, тоді робот обійде маяк у формі вісімки. Він обходить один із маяків, знову проходить через ворота в тому ж

напрямку, що й раніше, потім обходить другий маяк, знову проходить через ворота в тому ж напрямку, що й раніше, і так далі. Він може не торкатися маяка. Після кількох проходів нерухомої «вісімки» дверний маячок закривається, наступний маячок або двері відкриваються і так далі. На трасі до фінішу може бути чимала кількість «вісімок». Робота повинна бути виконана в найкоротші терміни.

Описану задачу можна розкласти за допомогою традиційних методів автоматизації, що робить вищеописану задачу та її рішення простим прямолінійним рухом робота до точки та круговим рухом навколо маяка. Найбільш складним є вибір правильного критерію переходу від поступального руху до обертального і навпаки. У цьому документі точка, в якій обидва активні маяки розташовані позаду робота через ворота, вибирається як критерій для переходу в обертаний рух. Перехід від обертального до поступального руху відбувається при зміні азимута одного з видимих маячків, тобто вони вибудовуються по різні сторони поздовжньої осі робота. Пізніше алгоритм розпізнавання восьми задач, заснований на Beacons-gate-Eights, можна описати так: згідно з інформацією від датчиків робота система зору, перший маяк, який робот спрямований збити, є активним маяком. Потім робот направляється до наступного відкритого маяка або через обидва активні маяки. Тим часом маяк вийшов на ігрове поле, щоб пройти крізь ворота, це все одно, що пройти до маяка; єдина відмінність полягає в тому, що об'єкт повинен рухатися вздовж бісектриси кута між маяками, що утворюють ворота. Якщо після перетину фінішної лінії маяк за ним продовжує блимати, це просто означає, що він перейшов у режим повороту та починає обертатися навколо лівого маяка по колу радіусом  $r$  одиниць від цього маяка, де вибрано  $r$  щоб не вдарити. Тут слід чітко пояснити, що для кожного оберту робот завжди приземляється в таку позицію, в якій є два активних маяка, і формується лише один запис у таблиці маяків STZ. У цьому випадку необхідно продовжувати обертання до тих пір, поки другий попередній маяк не з'явиться в полі зору і праворуч. Другий попередній маяк і зміна його орієнтації формують покажчик переходу від

обертального руху до поступального: робот йде по прямій між двома маяками до шлюзу. Після перетину лінії воріт робот перемикається в режим обертання навколо маяка справа. Коли ліворуч і попереду видно другий маяк, алгоритм знову повертається до проходження воріт. Якщо після повторного перетину роботами маяки, які їх створюють, все ще горять, алгоритм повторюється. В іншому випадку буде показано новий маяк або пройде нова лінія воріт залежно від кількості активних маяків на багатокутнику.

Давайте розглянемо задачу «Lighthouse-gate-eight» і представимо її рішення у вигляді кінцевого автомата. Набір вхідних даних буде підрахунком активних маяків, виявлених системою бачення, і їх положенням відносно робота:  $U = \{u_1 - \text{відсутні активні маяків}; u_2 - \text{один активний маяк}; u_3 - \text{два активних маяка, обидва маяка ззаду робота}; u_4 - \text{два активних маяка, хоча б один з них праворуч попереду}; u_5 - \text{два активних маяка, хоча б один з них ліворуч попереду}; u_6 - \text{більше двох активних маяків}\}$ . Елементи вихідної множини представляють собою фази руху  $Y = \{y_1 - \text{рух прямо}; y_2 - \text{поворот ліворуч}; y_3 - \text{поворот праворуч}; y_4 - \text{зупинка}\}$ . Алфавіт станів представляє з себе наступну множину:  $X = \{x_1 - \text{рух прямо на маяк}; x_2 - \text{рух прямо між маяками}; x_3 - \text{поворот відносно лівого маяка}; x_4 - \text{рух прямо між маяками}; x_5 - \text{поворот відносно правого маяка}; x_6 - \text{зупинка}\}$ . Робота алгоритму починається зі стану  $x_1$ , отже автомат є ініційованим. Граф переходів, що відповідає представленому кінцевому автомату, що показано на рисунку 4.6. Таблиця 4.3 являє собою таблицю переходів знайденого кінцевого автомата Мура.

Різноманітні маяки утворюють безперервні «змійки» під час відправлення та прибуття. Робот повинен рухатися так, щоб пройти повз «змійку», не торкаючись маяка. Пройшовши «змійку», вона повинна перейти до останнього

маяка. Критеріями зупинки є коли він контактує з останнім маяком. Він повинен закінчити роботу якомога швидше.

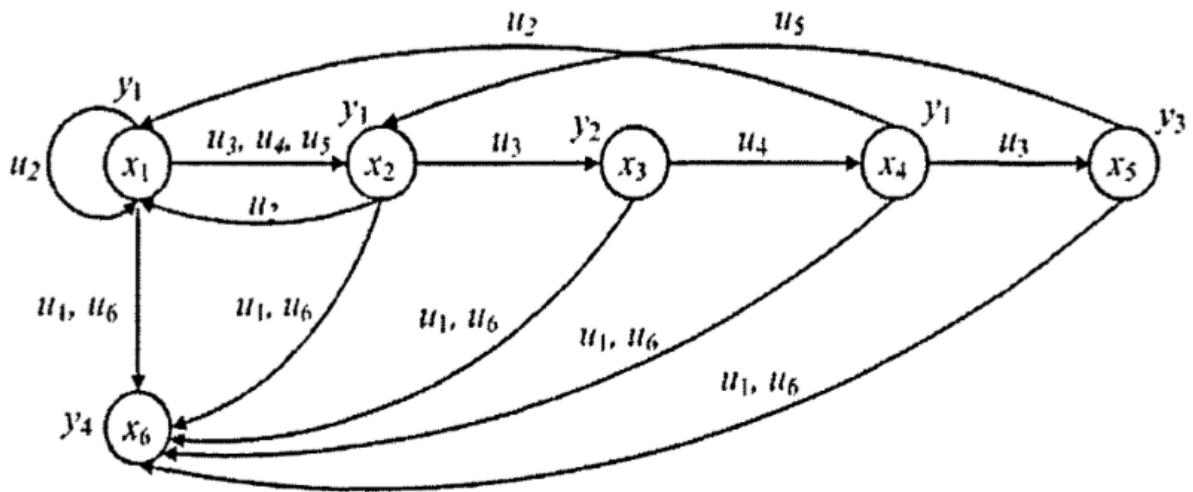


Рисунок 4.6 – Кінцевий автомат, який реалізує завдку «Маяки-ворота-вісімки»

Таблиця 4.3 – Таблиця переходів

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	
$x_1$	$x_6$	$x_1$	$x_2$	$x_2$	$x_2$	$x_6$	$y_1$
$x_2$	$x_6$	$x_1$	$x_3$	-	-	$x_6$	$y_1$
$x_3$	$x_6$	-	-	$x_4$	-	$x_6$	$y_2$
$x_4$	$x_6$	$x_1$	$x_5$	-	-	$x_6$	$y_1$
$x_5$	$x_6$	-	-	-	$x_2$	$x_6$	$y_3$
$x_6$	-	-	-	-	-	-	$y_4$

#### 4.1.4 Розв'язання задачі «Змійка»

Подібно до місії Weason – Малюнок 8 Door, розв'язання місії Snake можна розглядати як комбінацію місії переміщення до точки та місії переміщення навколо маяка. Щоб увійти в перші ворота, потрібно використовувати алгоритм проходження воріт, наведений вище. Подорож у межах «Змійки» відбувається вздовж дуги радіусом  $r$  у послідовності «правий маяк, лівий маяк, правий маяк» тощо. Значення радіуса  $r$  вибрано таким чином, щоб маяки не торкалися під час

його обертання, а також не має бути занадто великим, щоб мінімізувати час виконання завдання. Однак, як і в попередньому завданні, критерій переходу до обертального руху знову пов'язаний з тим моментом, коли робот проходить через ворота з двома найближчими активними маяками по обидві сторони від них, але потім позаду. Ця орієнтація від обертального до поступального руху буде викликана, коли знак орієнтації одного з маяків, найближчих до спостерігача, перевернеться. Це просто означає, що найближчий маяк перейшов на інший бік поздовжньої осі робота. Припустимо умову, що коли всі маяки в той конкретний момент, коли робот починає роботу, всі розташовані по одну сторону від його поздовжньої осі, то в цьому випадку алгоритм розпізнавання «змійки» завдання буде виглядати так: Використовуючи дані датчиків STZ, він рухається через ворота, утворені двома найближчими маяками. Коли два найближчих маяка відриваються від решти, він повертається до обертання на основі маяка навколо крайнього правого маяка. Робот переходить у режим пропуску воріт, коли виявлено новий «найближчий» маяк, що з'являється ліворуч попереду, він обертається навколо маяка ліворуч. Вимкнення з петлі відбувається, коли в поле зору потрапляє найближчий маячок зліва, спереду справа. Коли робот перетинає двері, створені найближчим маяком справа, він дотримується послідовності «правий маяк, лівий маяк, правий маяк тощо». До моменту згасання всіх маячків у «Змійці». Потім робот переміщується до фінішного маяка звичайним дуже фундаментальним способом переміщення до заданої точки.

Давайте розробимо скінченний автомат для вирішення проблеми «змійки». Також, як і в попередньому завданні, у якості вхідного набору буде прийнята інформація про кількість активних маячків та їхнє положення відносно робота за спостереженнями системи технічного зору:  $U = \{u_1 - \text{кілька активних маяків, хоча б один з двох найближчий справа попереду; } u_2 - \text{кілька активних маяків, хоча б один з двох найближчий зліва попереду; } u_3 - \text{кілька активних маяків, два найближчих позаду робота; } u_4 - \text{один активний маяк; } u_5 - \text{немає активних}$

маяків}. Елементи вихідної множини являють собою фази руху  $Y = \{ y_1 - \text{рух прямо; } y_2 - \text{поворот праворуч; } y_3 - \text{поворот ліворуч; } y_4 - \text{зупинка} \}$ . Алфавіт станів являє собою наступну множину:  $X = \{ x_1 - \text{обертання навколо лівого найближчого маяка; } x_2 - \text{рух по прямій між маяками; } x_3 - \text{обертання навколо правого найближчого маяка; } x_4 - \text{рух по прямій між маяками; } x_5 - \text{рух по прямій на маяк; } x_6 - \text{старт; } x_7 - \text{фініш} \}$ . В цьому випадку автомат також є ініціальним, оскільки виконання вправи завжди починається з початкового стану  $x_6$ . Діаграма переходів, що відповідає кінцевому автомату, що реалізує розв'язок задачі «змійка», показана на рисунку 4.7. Таблиця 4.4 містить таблицю переходів, що відповідає цьому кінцевому автомату.

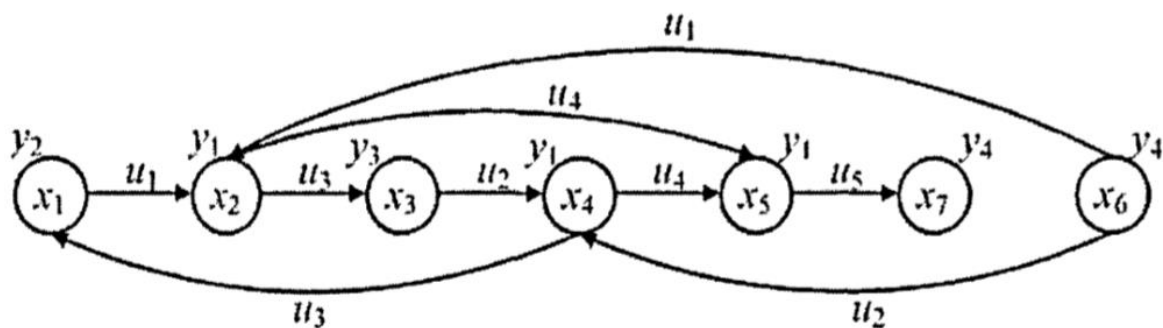


Рисунок 4.7 – Кінцевий автомат, що реалізує завдання «Змійка»

Таблиця 4.4 – Таблиця переходів

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	
$x_1$	$x_2$	-	-	-	-	$y_2$
$x_2$	-	-	$x_3$	$x_5$	-	$y_1$
$x_3$	-	$x_4$	-	-	-	$y_3$
$x_4$	-	-	$x_1$	$x_5$	-	$y_1$
$x_5$	-	-	-	-	$x_7$	$y_1$
$x_6$	$x_2$	$x_4$	-	-	-	$y_4$
$x_7$	-	-	-	-	-	$y_4$

Передбачалося, що в таблиці маяків STZ записи сортуються за збільшенням відстані від маяка під час розробки програми.

З наведеного вище опису можна помітити, що всі розроблені кінцеві автомати є початковими та детермінованими в тому сенсі, що всі вони задовольняють умову унікального переходу; що під дією будь-якого вхідного сигналу жоден автомат не може перейти в якийсь інший заданий стан до більш ніж одного іншого конкретного стану.

#### 4.2 Алгоритм внесення корекції у траєкторію руху

Алгоритм визначає траєкторію робота, коли він проходить крізь двері, щоб уникнути зіткнення з маяками. Проходячи через ворота, визначені двома маяками, робот рухається по бісектрисі кута між маяками. Однак таке вихідне положення для робота щодо воріт було б можливим, у якому робоча лінія, проведена за встановленим алгоритмом, не проходила б близько до жодного з маяків, як на (рис. 4.8), і це не повинно статися з маяком би торкався.

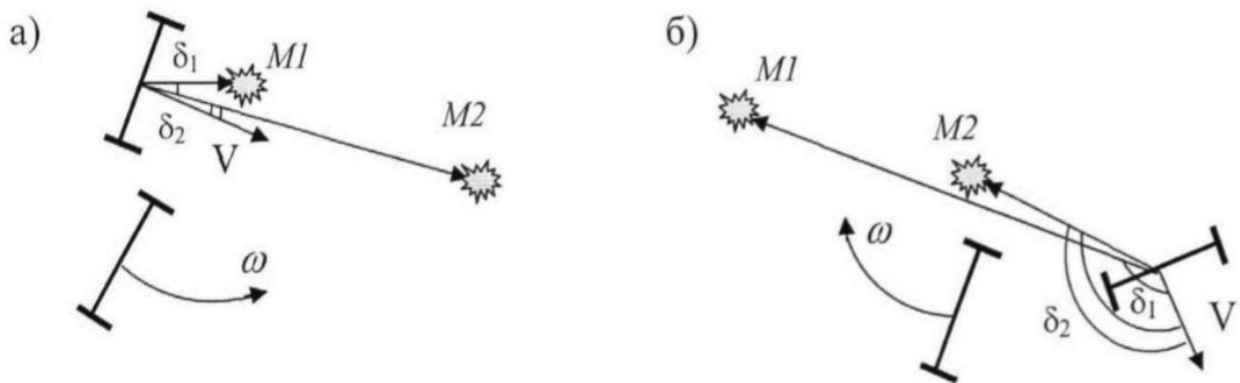


Рисунок 4.8 – Варіанти рухів робота при проходженні «воріт» залежно від початкового положення

Стани передаються алгоритмом між переходами кінцевого автомата до маяків. Якщо потрібно, алгоритм додає деяку поправку  $\pm\Delta$  до обчисленого кута дверей, щоб робот залишив зону злиття маяка. Величина корекції визначається конструктивними параметрами роботизованої системи зору.

Нечітка логіка та технологія нейронних мереж [32] інтегровані в алгоритм налаштування. Структурована форма алгоритму проілюстрована на рисунку 4.9. Структура алгоритму визначає послідовність, у якій він має бути реалізований.

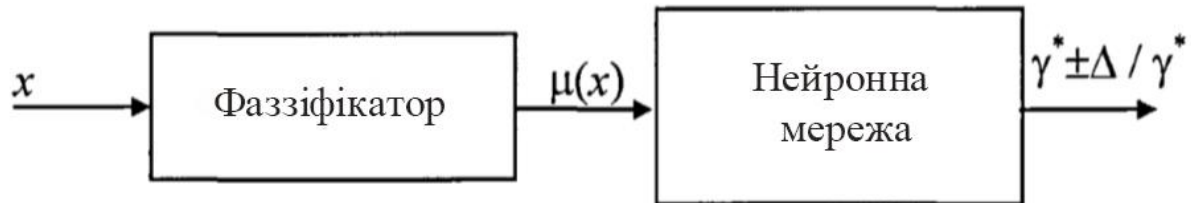


Рисунок 4.9 – Структура алгоритму коригування траєкторії

#### 4.2.1 Розробка коригувального методу

За умови  $|\gamma_1 - \gamma_2| < \Delta_0$  і  $\gamma_1 - \gamma_2 > 0$  ( $\gamma_1 > \gamma_2$ ), то  $\gamma^* = \gamma^* - \Delta$ ;

За умови  $|\gamma_1 - \gamma_2| < \Delta_0$  і  $\gamma_1 - \gamma_2 < 0$  ( $\gamma_1 < \gamma_2$ ), то  $\gamma^* = \gamma^* + \Delta$ ;

За умови  $|\gamma_1 - \gamma_2| \geq \Delta_0$ , то  $\gamma^* = \gamma^*$ ,

де  $\gamma_1, \gamma_2$  – кут на перший і другий маяк відповідно;

$\Delta_0$  – визначається особливостями конструкції СТЗ робота;

$\gamma^*$  – розрахунковий кут проходження воріт, що розраховується кінцевим автоматом.

Тільки якщо робот бачить маяки на достатній відстані один від одного, настройка не потрібна.

Функції належності для змінної  $|\gamma_1 - \gamma_2|$  наведені на рисунку 4.10.

Для змінної  $|\gamma_1 - \gamma_2|$  функції належності визначаються функцією:

$$\mu(x) = \frac{(\text{sign}(x) + 1)}{2} \text{ при } \gamma_1 - \gamma_2 > 0,$$

$$\mu(x) = \frac{(-1 - \text{sign}(x))}{2} \text{ при } \gamma_1 - \gamma_2 < 0.$$

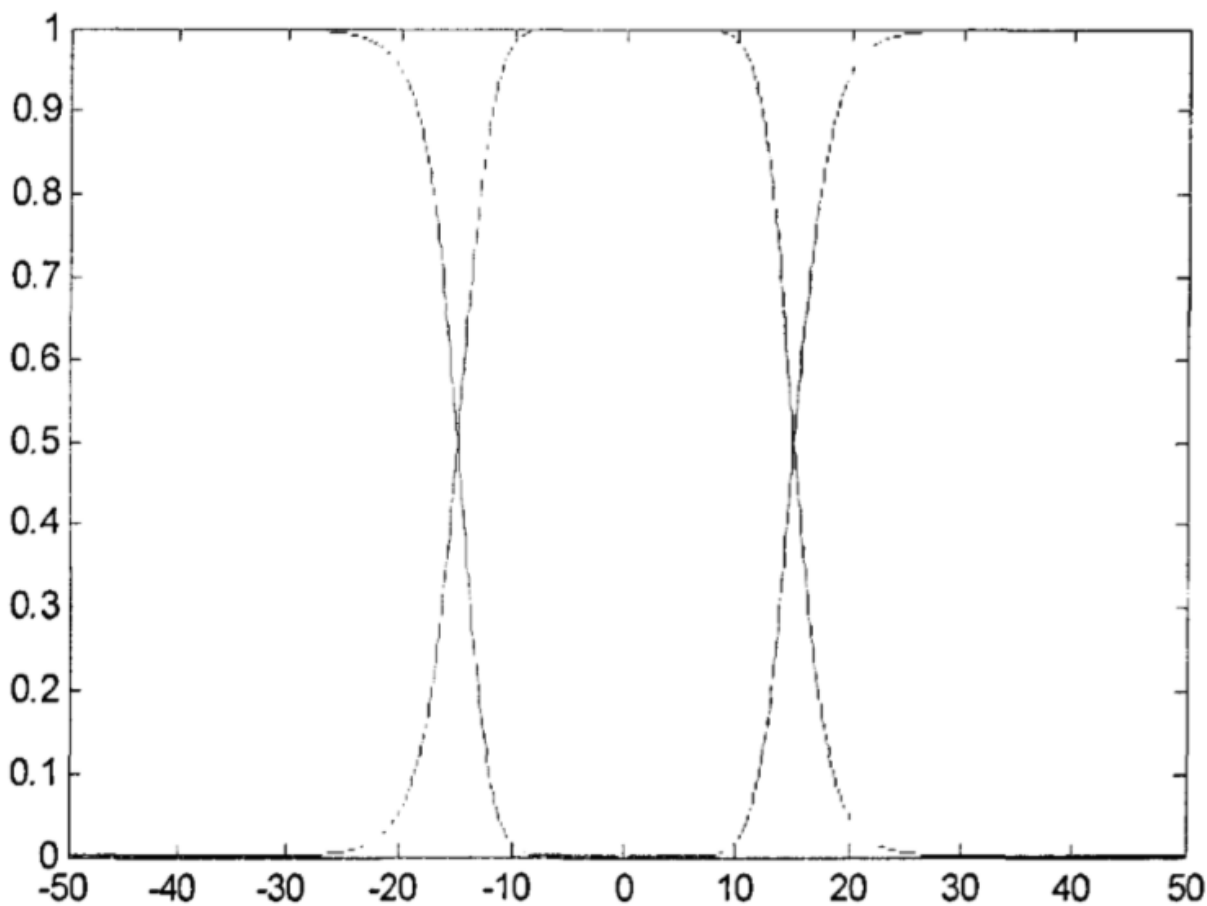


Рисунок 4.10 – Вид функцій приналежності для вхідної змінної  $|\gamma_1 - \gamma_2|$

Значення функцій належності подаються в нейронну мережу. Вибір структури нейронної мережі залежить від характеру та складності розв'язуваної задачі. У цьому випадку було вирішено використовувати багаторівневу мережу прямого розповсюдження; тобто багатошаровий перцептрон. Основним елементом такої мережі є нелінійна модель нейронів, як показано на рис. 4.11.

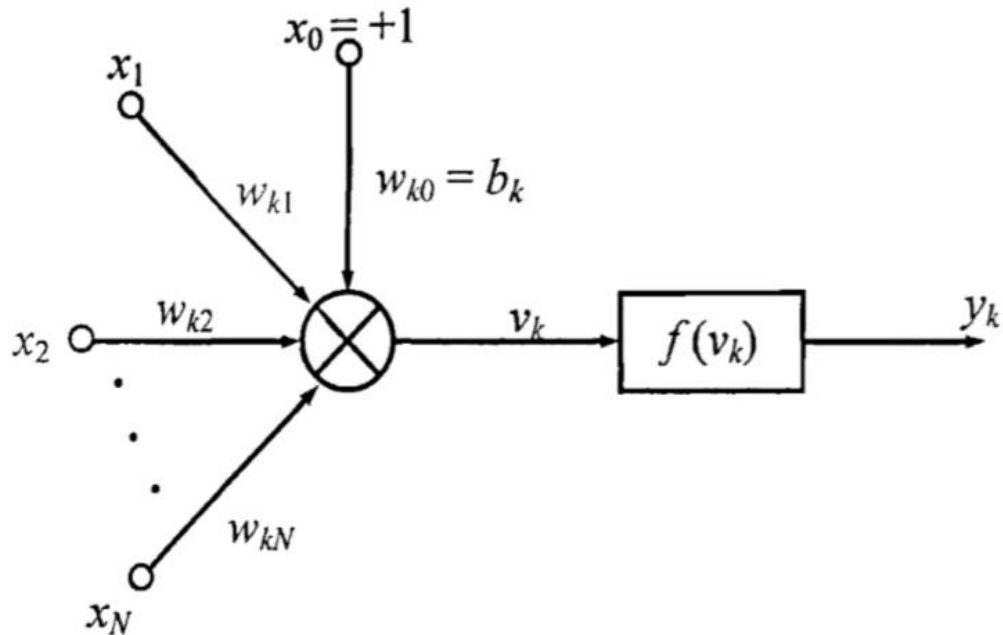


Рисунок 4.11 – Нелінійна модель нейрона

В математичному поданні функціонування нейрона  $k$  описується наступною парою рівнянні:

$$v_k = \sum_{j=1}^N w_{kj} + b_k = \sum_{j=0}^N w_{kj} x_j, \quad (4.1)$$

$$y_k = f(v_k), \quad (4.2)$$

де  $x_1, x_2, \dots, x_N$  – вхідні сигнали;

$v_k$  – індуковане локальне поле або потенціал активації нейрона  $k$ ;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kN}$  – синаптичні ваги нейрона  $k$ ;

$b_k = w_{k0}$  – порогове значення;

$y_k$  – вихідний сигнал нейрона;

$f(\cdot)$  – функція активації.

У наведеній вище формулі передбачається, що вхідний вектор  $x$  доповнюється нульовими членами  $x_0 = 1$ , які формують сигнал поляризації.

Використання Threshold  $b_k$  забезпечує ефект афінного перетворення виходу лінійного суматора  $u_k$  [33].

Функція активації  $f(v)$  визначає вихідний сигнал нейрона на основі індукованого локального поля  $v$ . У роботі в якості функції активації використовується сигмоїдна уніполярна функція (рис. 4.12):

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-\beta v}}. \quad (4.3)$$

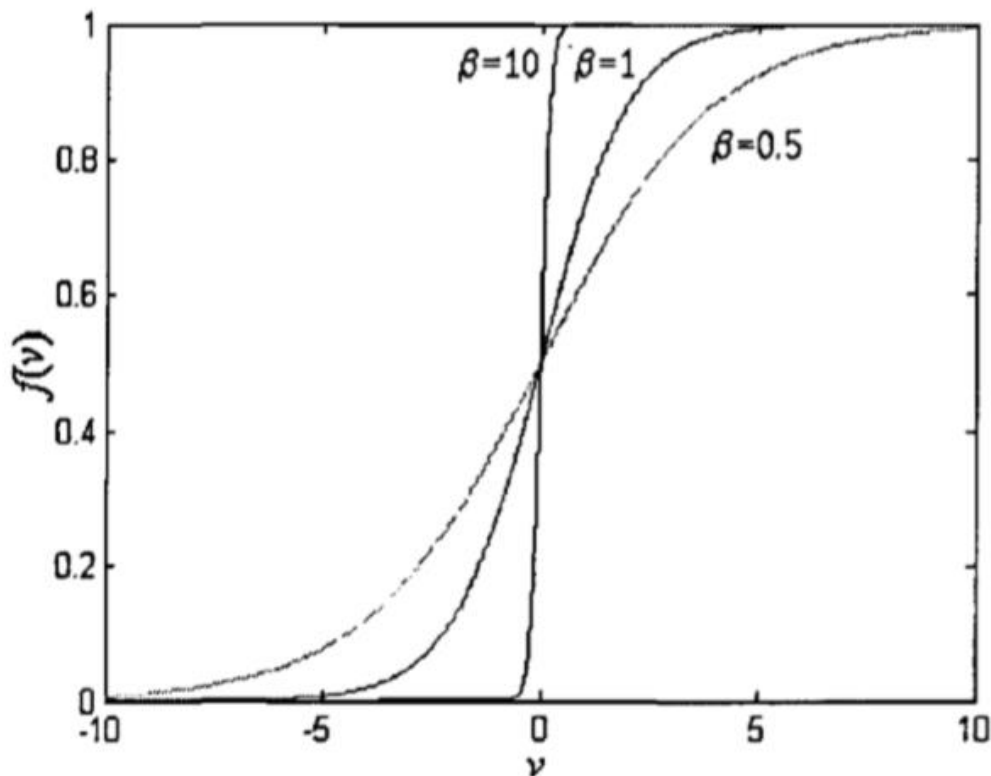


Рисунок 4.12 – Сигмоїдальна функція активації при різних значень параметра  $\beta$

Параметр  $\beta$  впливає на форму функції активації, у міру зростання його значення збільшується крутизна графіка. При  $\beta \rightarrow \infty$  сигмоїдальна функція вироджується в порогову.

Крім того, ще однією важливою властивістю сигмоїдальної функції активації є її диференційованість, оскільки вона робить можливим використання градієнтних методів у навчанні.

Її утворюють з'єднані між собою нейрони штучними нейронними мережами. Сенсорні елементи відомі як багатошарові перцептрони, деякі з яких утворюють вхідний рівень, один або більше обчислювальних нейронів у прихованому шарі та один нейрон у вихідному шарі. Вхідний сигнал просувається по мережі, від одного рівня до іншого. Статистику вищого порядку можна виділити за допомогою прихованих шарів. Це дозволяє використовувати локальні зв'язки для отримання глобальних властивостей даних завдяки додатковим синаптичним зв'язкам і збільшеній взаємодії між нейронами в таких мережах.

Рисунок 4.13 показує як повністю підключена мережа з одним прихованим рівнем.

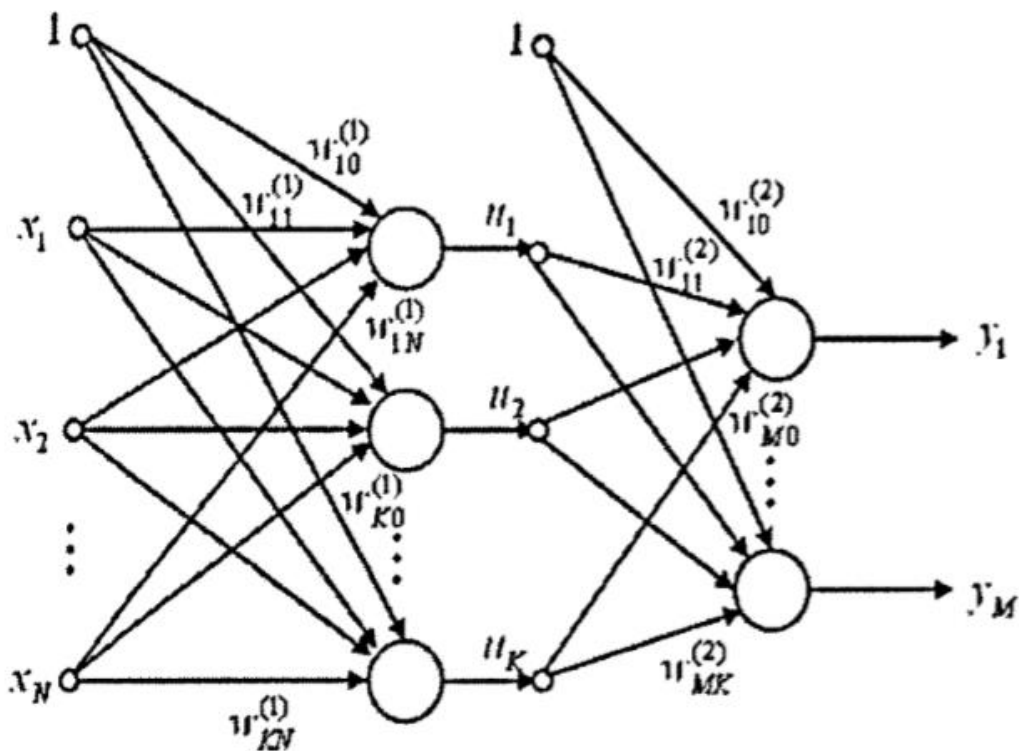


Рисунок 4.13 – Загальна структура двошарової сигмоїдальної нейронної мережі

Вихідний сигнал  $i$ -го нейрона прихованого шару описується функцією:

$$u_i = f \left( \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right), \quad (4.4)$$

де  $0$  – індекс, який відповідає сигналу та вагам поляризації, при цьому  $u_0 \equiv 1, x_0 \equiv 1$ .

Вихідний сигнал, що формується  $k$ -им нейроном вихідного шару, визначається як:

$$y_k = f \left( \sum_{i=0}^K w_{ki}^{(2)} u_i \right) = f \left( \sum_{i=0}^K w_{ki}^{(2)} f \left( \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right) \right). \quad (4.5)$$

З рівняння (4.15) очевидно, що значення вихідного сигналу залежить від ваги кожного шару, тоді як сигнал, створений прихованим шаром, не залежить від ваг вихідного шару.

Значення функції приналежності є входом для нейронної мережі, а корекція воріт визначається на виході за кутом, отже ця мережа має чотири входи та один вихід для алгоритму корекції.

#### 4.2.2 Навчальні етапи для нейронних мереж

Багатошарове навчання персептрону зазвичай виконує вчитель. Мета навчання полягає в тому, щоб вибрати значення для ваг  $w_{ij}^{(1)}$  і  $w_{ki}^{(2)}$  для всіх рівнів мережі так, щоб для заданого вхідного вектора  $x$  вихідне значення сигналу  $y_j$ , відповідало очікуваному значенню для  $i = 1, 2, \dots$

Іншою мірою близькості є її значення цільової функції, яку також називають функцією вартості або енергією помилки. У явному навчанні

векторів  $p \langle x, d \rangle$  для мережі з  $M$  вихідними нейронами цільову функцію можна розглядати в такому значенні евклідової норми:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \|y^{(k)} - d^{(k)}\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M (y^{(k)} - d^{(k)})^2. \quad (4.6)$$

Саме сигнал є вихідним значенням нейрона, що позначає деяку функцію мережевих ваг, встановлених за критерієм мінімізації цільової функції в процесі навчання. Якщо цільова функція є диференційованою, метод навчання поруч із нею найкраще називається методом градієнтної оптимізації, відповідно до якого оновлення вагових коефіцієнтів здійснюється за допомогою наступного рівняння:

$$w(k+1) = w(k) + \Delta w, \quad (4.7)$$

$$\Delta w = \eta p(w), \quad (4.8)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт навчання;

$p(w)$  – напрямок в багатовимірному просторі  $w$ .

Дослідження багат шарових мереж за допомогою градієнтних методів вимагає визначення градієнта по відношенню до кожного шару в мережі, що необхідно для правильного вибору напрямку  $p(w)$ . Ця проблема має очевидне рішення лише для оригінальних ваг шару. Для інших рівнів була розроблена конкретна стратегія, яка в теорії штучних нейронних мереж називається алгоритмом зворотного поширення [35]. За цим алгоритмом у кожному з тренувальних циклів виконується:

У генерації вхідних сигналів, які складають наступний вектор  $x$ , який є кроком, пов'язаним із прямим напрямком передачі інформації, ви повинні виконати аналогічний процес аналізу нейронної мережі. Результатом аналізу є обчислення значень вихідних сигналів нейронів, що належать як до прихованого, так і до вихідного шару, а також відповідних похідних

$\frac{df(u_i^{(1)})}{du_i^{(1)}}, \frac{df(u_i^{(2)})}{du_i^{(2)}}, \dots, \frac{df(u_i^{(m)})}{du_i^{(m)}}$  функції активації кожного шару ( $m$  – кількість шарів мережі);

Щоб створити мережу зворотного розповсюдження помилок, зробіть потік сигналу у зворотному напрямку та замініть функцію активації її похідною та застосуйте до виходу (тепер вхідної) мережі-порушника різницю між фактичними та фактичними очікуваними значеннями. Для мережі, визначеної таким чином, робиться спроба розрахувати значення дефіциту для корекції.

– на основі результатів, представлених вище для вихідної мережі та мережі зворотного поширення, рівняння (4.7), (4.8) використовуються для уточнення вагових коефіцієнтів для навчання мережі.

– повторіть цей процес, описаний вище, для всіх навчальних зразків, доки не будуть виконані умови для зупинки алгоритму. При завершенні роботи алгоритму норма градієнта повинна бути нижче деякого апріорно заданого значення  $\varepsilon$  (що відіграє роль точності процесу навчання).

Розглянемо тепер трохи докладніше алгоритм для мережі з одним шаром прихованих блоків (рис. 4.13). Нехай кількість вхідних вузлів дорівнює  $N$ , кількість нейронів прихованого шару –  $K$ , а кількість нейронів вихідного шару –  $M$ . Ми будемо використовувати сигмоїдну функцію для запуску цих нейронів. Цей алгоритм заснований на обчисленні значення цільової функції, що визначається як сума квадратів різниць між фактичним значенням вихідного сигналу мережі та очікуваним значенням. Для одного навчального кортежу  $\langle x, d \rangle$  цільова функція визначається наступним чином:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (y_k - d_k)^2. \quad (4.9)$$

$A$  – набір навчальних вибірок  $j (j = 1, 2, \dots, p)$  – розрахованих за формулою (4.6). Для спрощення викладання використаємо цільову функцію

виду (4.9), яка дозволяє уточнювати ваги після представлення кожної навчальної вибірки (режим «онлайн»).

З урахуванням позначень, введених на рисунку 4.13, ця формула визначається таким виразом:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \left[ f \left( \sum_{i=0}^K w_{ki}^{(2)} v_i \right) - d_k \right]^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \left[ f \left( \sum_{i=0}^K w_{ki}^{(2)} f \left( \sum_{j=0}^N w_{ij}^{(1)} x_j \right) \right) - d_k \right]^2. \quad (4.10)$$

Компоненти в градієнті розраховуються при диференціюванні кореляції (4.10). Спочатку виберіть ваги нейронів вихідного шару. Для початкових ваг ми маємо:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(2)}} = (y_i - d_i) \frac{df(u_i^{(2)})}{du_i^{(2)}} v_j, \quad (4.11)$$

$$\text{де } u_i^{(2)} = \sum_{j=0}^K w_{ij}^{(2)} v_j.$$

Якщо ввести позначення  $\delta_i^{(2)} = (y_i - d_i) \frac{df(u_i^{(2)})}{du_i^{(2)}}$ , то відповідний компонент градієнту відносно ваг нейронів вихідного шару можна представляється наступним чином:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(2)}} \delta_i^{(2)} v_j. \quad (4.12)$$

Елементи градієнта по відношенню до нейронів прихованого шару визначаються за тим самим принципом, але керуються іншою, більш складною залежністю, яка є результатом існування функції, визначеної:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(1)}} = \sum_{k=1}^M (y_k - d_k) \frac{dy_k}{dv_i} \frac{dv_i}{dw_{ij}^{(1)}}. \quad (4.13)$$

Після уточнення кожної складової цієї формули отримуємо:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(1)}} = \sum_{k=1}^M (y_k - d_k) \frac{df(u_k^{(2)})}{du_k^{(2)}} w_{ki}^{(2)} \frac{df(u_k^{(1)})}{du_k^{(1)}} x_j. \quad (4.14)$$

Введемо позначення:

$$\delta_i^{(1)} = \sum_{k=1}^M (y_k - d_k) \frac{df(u_k^{(2)})}{du_k^{(2)}} w_{ki}^{(2)} \frac{df(u_k^{(1)})}{du_k^{(1)}}, \quad (4.15)$$

тоді отримаємо формулу для знаходження компонентів градієнта відносно ваг нейронів прихованого шару у виді:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(1)}} = \delta_i^{(1)} x_j. \quad (4.16)$$

В обох випадках (формули (4.12) і (4.16)) опис градієнта має однакову структуру з добутком двох сигналів - один відповідає початковому вузлу зваженого з'єднання, що розглядається, а інший вимірює кількість помилок, переданих до вузла, на якому він був встановлений з одиницею, визначає вектор градієнта. Це важливо для подальшої розробки процесу зважування. У класичному алгоритмі зворотного розповсюдження помилок коефіцієнт  $p(w)$ ,

який розглядається в природному виразі (4.7), визначає напрям від'ємного градієнта, отже:

$$\Delta w = -\eta \nabla E(w). \quad (4.17)$$

Навчання з виправленням помилок – це навчання, кероване зворотним зв'язком, що відповідає навчанню за замкнутим циклом у термінології контролю. Дійсно, з теорії керування цілком очевидно, що стійкість таких систем залежить від параметра зворотного зв'язку — у даному випадку від коефіцієнта швидкості навчання  $\eta$ . Вибір цього параметра повинен гарантувати стабільність та/або збіжність ітераційного навчання. Вибір параметрів швидкості навчання також впливає на точність та інші параметри навчання. Таким чином, параметр швидкості навчання  $\eta$  зробив свій внесок у реальну продуктивність процесу навчання.

Навчання розглянутої нейронної мережі здійснюється за алгоритмом зворотного поширення методу найкрутішого спуску, векторна форма індикації визначається як:

$$p_k = -g(w_k), \quad (4.18)$$

де  $[g(w)]^T = \nabla E = \left[ \frac{\partial E}{\partial w_1}, \frac{\partial E}{\partial w_2}, \dots, \frac{\partial E}{\partial w_n} \right]^T$  – це вектор градієнта.

І навпаки, використання компонентів першого порядку в розкладі цільової функції в ряд Тейлора має базуватися на невідомій інформації про її кривизну. Тому метод буде сходитися повільно. Через цей недолік разом із різким уповільненням мінімізації поблизу точки оптимального рішення алгоритм найшвидшого спуску є неефективним, коли значення функції градієнта приймає дуже малі значення. У той же час, будучи дуже простим, малопотужним за обсягом пам'яті і з не дуже великими значеннями

обчислювального об'єму, цей метод залишається домінуючим при дослідженні багаторівневих мереж. Насправді його ефективність у багатьох випадках можна підвищити шляхом перевизначення критеріїв напрямку (зазвичай евристичних) для просування по шляху вирішення. Дійсно, хороші результати можна також отримати за допомогою так званого методу негайного навчання. Таким чином ваги мережі уточнюються ( $w_{k+1} = w_k + \Delta w_k$ ) відбувається з урахуванням модифіцированої формули визначення значення  $\Delta w_k$ :

$$\Delta w_k = \eta_k p_k + \alpha(w_k - w_{k-1}), \quad (4.19)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт моменту, який приймає значення в інтервалі  $[0,1]$ .

Перший член цього виразу відповідає традиційному найкрутішому спуску, тоді як другий член враховує останню зміну ваг і не залежить від фактичного значення градієнта. Чим більше значення коефіцієнта  $\alpha$ , тим більшу роль відіграє індикатор у цей момент у коригуванні ваги. Цей ефект різко посилюється в межах плато цільової функції та в околицях локальних мінімумів, коли значення градієнта наближаються до нуля.

У плоскій частині цільової функції при постійних значеннях коефіцієнтів навчання збільшення вагових коефіцієнтів залишається приблизно таким же. Це означає, що  $\Delta w_k = \eta p_k + \alpha \Delta w_k$ , тому ефективне приріст значень ваг можна описати відношенням:

$$\Delta w_k = \frac{\eta}{1-\alpha} p_k. \quad (4.20)$$

$\Delta w_k$  При значенні  $\alpha = 0,9$  це відповідає 10-кратному збільшенню ефективного значення коефіцієнта навчання і, отже, також 10-кратному прискоренню процесу навчання.

Близький до локального мінімуму індикатор моменту, який не вловлюється градієнтом, може різко похитнути вагові коефіцієнти в дуже значний спосіб, змушуючи значення цільової функції підвищуватися та залишати «зону тяжіння» цього мінімуму. Для малих значень градієнта в (4.19) необхідно обмежити домінування показника моменту; інакше вагові коефіцієнти збільшуються до такої швидкості, що значення цільової функції збільшується, дозволяючи залишити зону локальних мінімумів. Показник моменту, однак, не повинен бути повністю домінуючим протягом усього процесу навчання, оскільки за таких умов алгоритм дуже часто нестабільний. Щоб обмежити таке надмірне домінування, значення цільової функції регулюється таким чином, щоб його збільшення дозволялося лише в певних межах (не більше 5% у розглянутій мережі). При такому підході, якщо на чергових ( $k$ -м і  $(k+1)$ -м) кроках ітерації виконується умова  $E(k+1) < 1.05 E(k)$ , то зміни ігноруються і вважається, що  $(w_k - w_{k-1}) = 0$ . При цьому градієнтний індекс починає домінувати над моментним, і процес розвивається в напрямку мінімізації, заданої вектором градієнта. Слід підкреслити, що підбір значень моментних коефіцієнтів вимагає широкого експериментування, спрямованого на вибір значень, які найкраще відображають специфіку розв'язуваної задачі.

На малюнку 4.14 показано графіки збіжності помилки навчання для методу найкрутішого спуску (а) і моменту  $\alpha = 0,9$  (б). Разючий стрибок у зміні похибки добре помітний на графіку, типовий для методу найкрутішого спуску.

Підхід, заснований на теорії кінцевих автоматів, був використаний для розробки досить простих і легко реалізованих алгоритмів для створення шляхів, якими рухалися мобільні роботи під час виконання завдань «Зразок», «Ворота маяка», «Вісімка» та «Змійка». Проблеми, розглянуті в цьому розділі, демонструють, що дійсно за допомогою кінцевих автоматів можна реалізувати досить складні алгоритми керування. Як показали експериментальні дослідження, розроблений тут алгоритм може працювати з багатьма нерелевантними ситуаціями, що виникають під час виконання транспортних

завдань, і легко ретушується для дотримання певних конкретних правил виконання завдань.

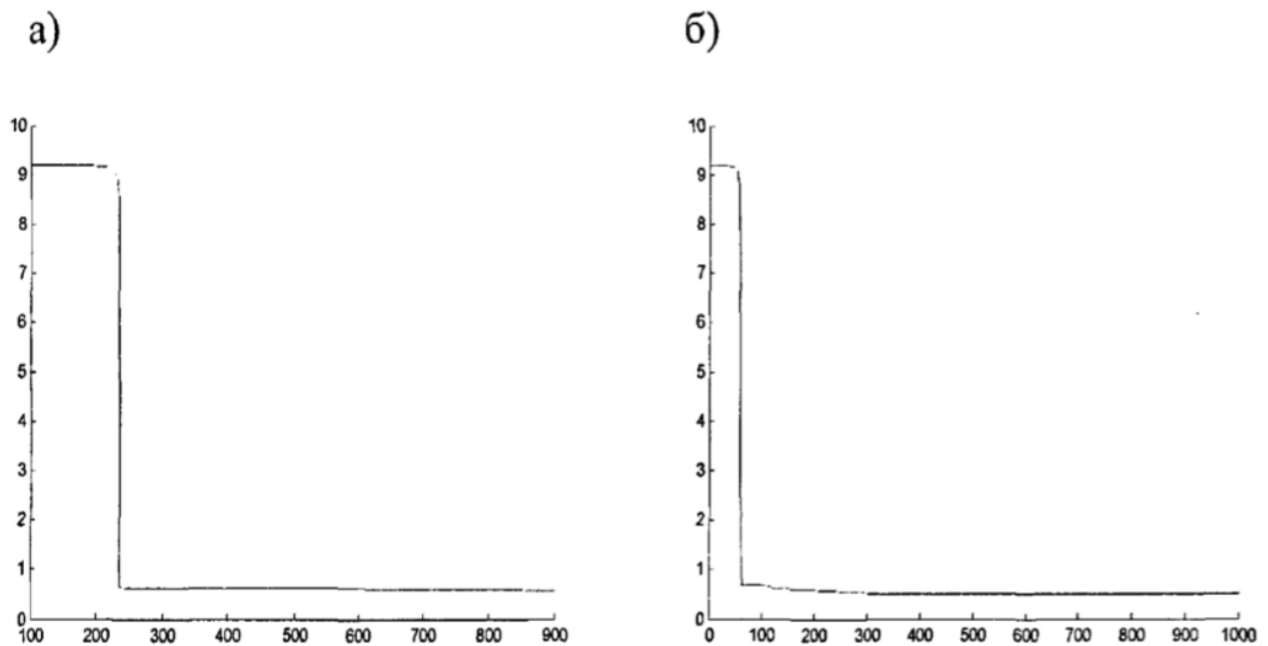


Рисунок 4.14 – Графік зміни помилки навчання

### 4.3 Керування положенням у просторі робота

Завдання керування полягає в тому, щоб знайти напруги управління  $U_1, U_2$ , що компенсують похибку кутовий орієнтації  $\delta = \alpha - \alpha^*$ .

#### 4.3.1 Задавання напрямку на маяк

При невеликих відхиленнях  $\delta \approx 0, \dot{\delta} \approx 0, \ddot{\delta} \approx 0$  рівняння динаміки буде мати вигляд:

$$\ddot{\delta} + \left[ a_{\omega V} V^* + a_{R/L} \right] \dot{\delta} + \left[ a_{\omega \delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{\omega V} V^* \right] \delta = -a_{\omega \sigma} a_{\sigma V} V + \bar{U}_\delta, \quad (4.21)$$

де  $\bar{U}_\delta$  – вплив керування, яке пов'язане зі змінними  $U_\sigma, U_\delta$  виразом:

$$b_{1/L}(a_{\omega\sigma}U_\sigma + a_{\omega\delta}U_\delta) = \bar{U}_\delta, \quad (4.22)$$

$$U_\delta = U_2 - U_1. \quad (4.23)$$

Виберемо вплив керування у вигляді:

$$\bar{U}_\delta = a_{\omega\sigma}a_{\sigma V}V - k_{\delta 0}\delta, \quad (4.24)$$

і введемо позначення:  $k_{\delta 2} = a_{\omega V}V^* + a_{R/L}$ ,  $k_{\delta 1} = a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^*$ .

Тоді вираз замкнутої системи буде мати вигляду:

$$\ddot{\delta} + k_{\delta 2}\dot{\delta} + k_{\delta 1}\delta = 0. \quad (4.25)$$

При знайдених коефіцієнтах зворотного зв'язку  $k_{\delta 0} : 0 < k_{\delta 0} < k_{\delta 2}k_{\delta 1}$  ( $k_{\delta 2} > 0, k_{\delta 1} > 0$ ), замкнута система є асимптотично стійкою.

#### 4.3.2 Обертання в околі маяка

При невеликих відхиленнях  $\delta \approx 0, \dot{\delta} \approx 0, \ddot{\delta} \approx 0$  рівняння динаміки буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta} + \left[ a_{\omega V}V^* + a_{R/L} \right] \dot{\delta} + \left[ a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^* \right] \delta = \\ - \left[ a_{\omega\delta}a_{\delta\omega} + a_{R/L}a_{\omega V}V^* \right] \rho^*V^* - a_{\omega\sigma}a_{\sigma V}V + \bar{U}_\delta, \end{aligned} \quad (4.26)$$

де  $\rho^*$  – еталонне значення радіусу кривини повороту;

$\bar{U}_\delta$  – керуючий вплив, який пов'язан зі змінними  $U_\sigma, U_\delta$  виразом (4.22).

Позначимо:  $k_{\delta 2} = a_{\omega V} V^* + a_{R/L}$ ,  $k_{\delta 1} = a_{\omega \delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{\omega V} V^*$ , і виберемо вплив керування у вигляді:

$$\bar{U}_\delta = \left[ a_{\omega \delta} a_{\delta \omega} + a_{R/L} a_{\omega V} V^* \right] \rho^* V^* + a_{\omega \sigma} a_{\sigma V} V - k_{\delta 0} \delta. \quad (4.27)$$

Тоді вираз замкнутої системи буде мати вигляду:

$$\ddot{\delta} + k_{\delta 2} \dot{\delta} + k_{\delta 1} \delta + k_{\delta 0} \delta = 0. \quad (4.28)$$

При  $0 < k_{\delta 0} < k_{\delta 2} k_{\delta 1}$  ( $k_{\delta 2} > 0, k_{\delta 1} > 0$ ) система (4.28) є асимптотично стійкою.

#### 4.4 Керування зміною положення у просторі робота

Завдання керування полягає в тому, щоб отримати напруги  $U_1, U_2$ , що компенсують невязку по швидкості  $\sigma = V(t) - V^*(t)$ . При невеликих відхиленнях  $\sigma \approx 0, \dot{\sigma} \approx 0$  рівняння динаміки буде мати вигляду:

$$\begin{aligned}
& \ddot{\sigma} + \left[ a_{V\omega} \rho^* V^* + a_{R/L} \right] \dot{\sigma} + \left[ a_{V\sigma} a_{\sigma V} + a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* V^* \right] \sigma = \\
& = -a_{V\omega} \ddot{V}^* - \left[ a_{V\delta} a_{\delta\omega} + a_{R/L} a_{V\omega} V^* \right] \dot{\delta} - \\
& - a_{V\sigma} a_{\sigma V} V^* - a_{V\delta} a_{\delta V} \rho^* V^* - a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* (V^*)^2 + \bar{U}_\delta,
\end{aligned} \tag{4.29}$$

де  $\bar{U}_\delta$  – вплив керування, який пов'язан зі змінними  $U_\sigma, U_\delta$  виразом:

$$b_{1/L} (a_{V\sigma} U_\sigma + a_{V\delta} U_\delta) = \bar{U}_\delta, \tag{4.30}$$

$$U_\delta = U_2 - U_1. \tag{4.31}$$

Введемо позначення:

$k_{\sigma 1} = a_{V\omega} \rho^* V^* + a_{R/L}$ ,  $k_{\sigma 0} = a_{V\sigma} a_{\sigma V} + a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* V^*$ , і виберемо вплив керування у вигляді:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_\delta = & a_{V\sigma} a_{\sigma V} V^* + a_{V\delta} a_{\delta\omega} \rho^* V^* + a_{R/L} a_{V\omega} \rho^* (V^*)^2 + \\
& + \left[ a_{V\delta} a_{\delta\omega} + a_{R/L} a_{V\omega} V^* \right] \dot{\delta},
\end{aligned} \tag{4.32}$$

забезпечує асимптотичну стійкість замкнутої системи:

$$\ddot{\sigma} + k_{\sigma 1} \dot{\sigma} + k_{\sigma 0} \sigma = -a_{V\omega} \ddot{V}^*. \tag{4.33}$$

Усі ці закони керування, отримані з першого порядку наближення, забезпечують асимптотичну стійкість малих нелінійних систем згідно з теоремою Ляпунова-Пуанкаре. Біля маяка робот втік, управління також має

технічну систему бачення, але в цьому випадку швидкість була досить великою, щоб робот продовжував рухатися за інерцією, що дозволило йому загасити маяк. Переваги полягають у тому, що для представленого закону керування існує не лише опис траєкторії руху, але й будь-яке бічні відхилення траєкторії. Ще одна перевага полягає в тому, що всі параметри, які використовуються в алгоритмі керування, є такими, які можна виміряти, тобто систему можна реалізувати фізично.

Робота алгоритму, описаного в цьому розділі, проілюстрована результатами, отриманими в результаті імітаційного моделювання.

Рисунок 4.15 показує варіації похибки куткової орієнтації та її похідних у міру того, як змодельований робот рухається до поздовжньої швидкості маяка, і час, потрібний для досягнення бажаної поздовжньої швидкості.

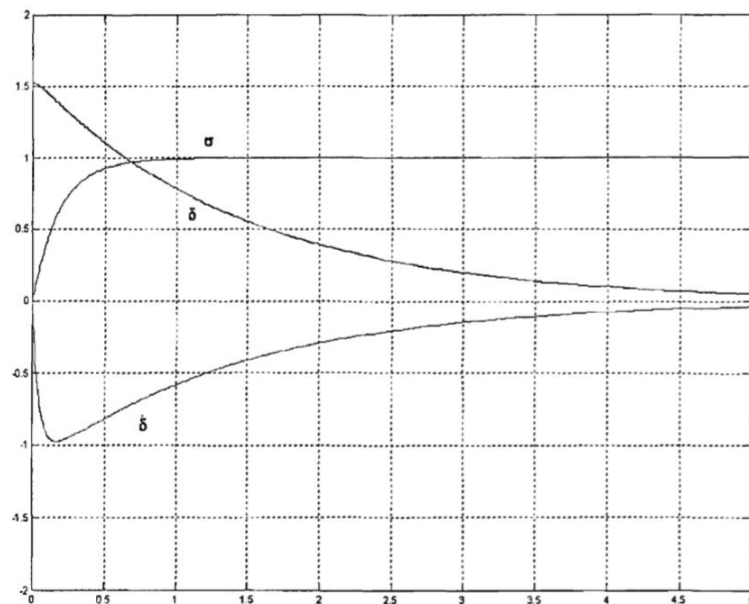


Рисунок 4.15 – Зміна похибки по швидкості ( $\sigma$ ), похибки кутовий орієнтації ( $\delta$ ) і її похідної ( $\delta'$ ) при наведенні робота на маяк

Фазова графіка конвергенції від різних початкових положень робота до маяка проілюстрована на рис. 4.16. На рис. 4.17 зображено часовий графік похибки кутового напрямку та її похідних разом зі зміною похибки швидкості для змодельованого робота, що рухається навколо маяка. Рис. 4.18 Круговий

рух робота з різних початкових положень у різних початкових напрямках. Необхідно підкреслити, що при виведенні закону керування така стабілізація кола для робота не ставилася як завдання. Рис. 4.18 демонструє, що такий вид стабілізації має місце.

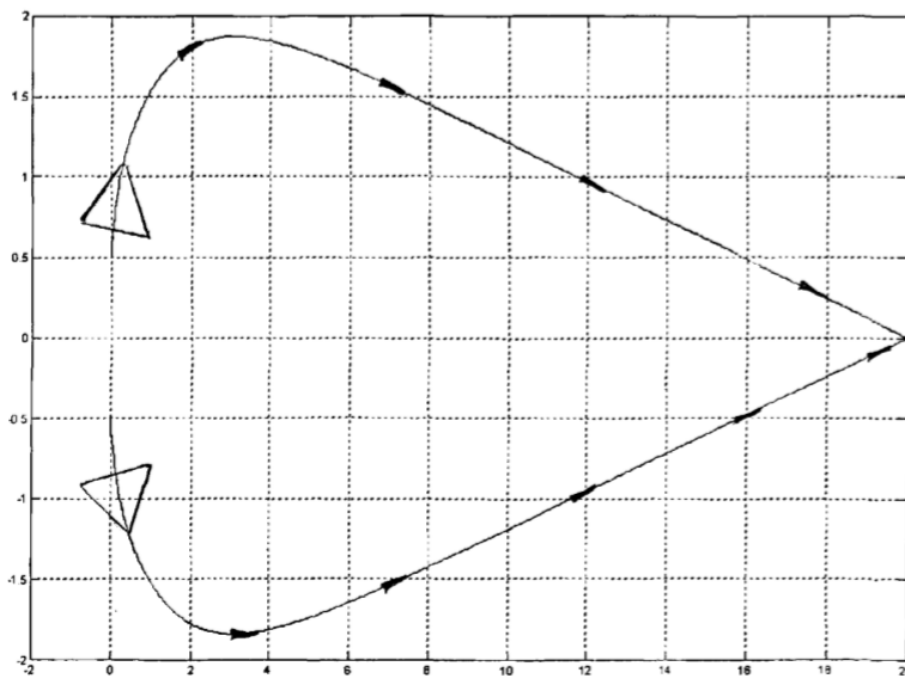


Рисунок 4.16 – Фазовий портрет при наведенні робота на маяк

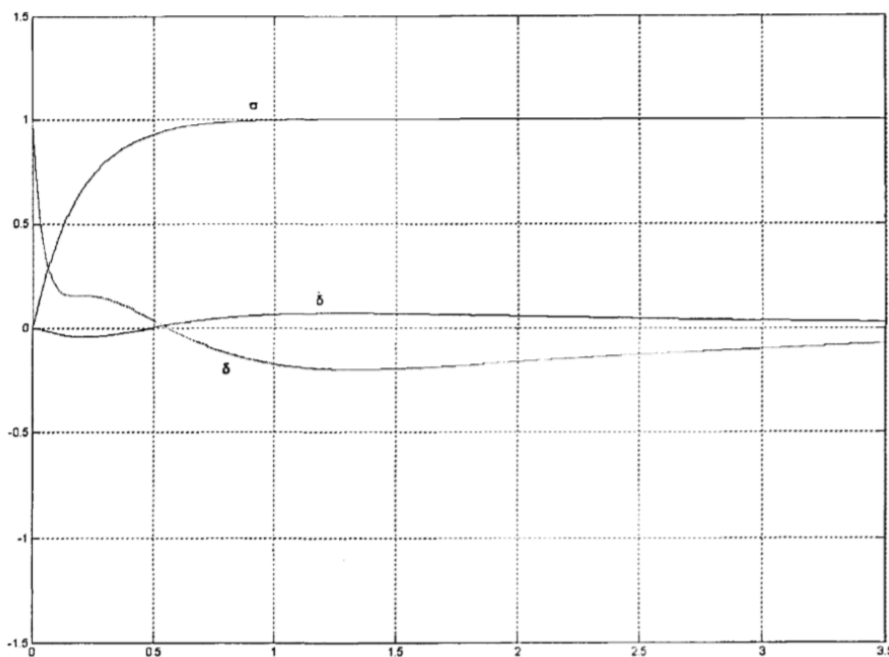


Рисунок 4.17 – Зміна помилки по швидкості ( $\sigma$ ), помилки кутувий орієнтації ( $\delta$ ) і її похідної ( $\delta'$ ) при русі робота навколо маяка

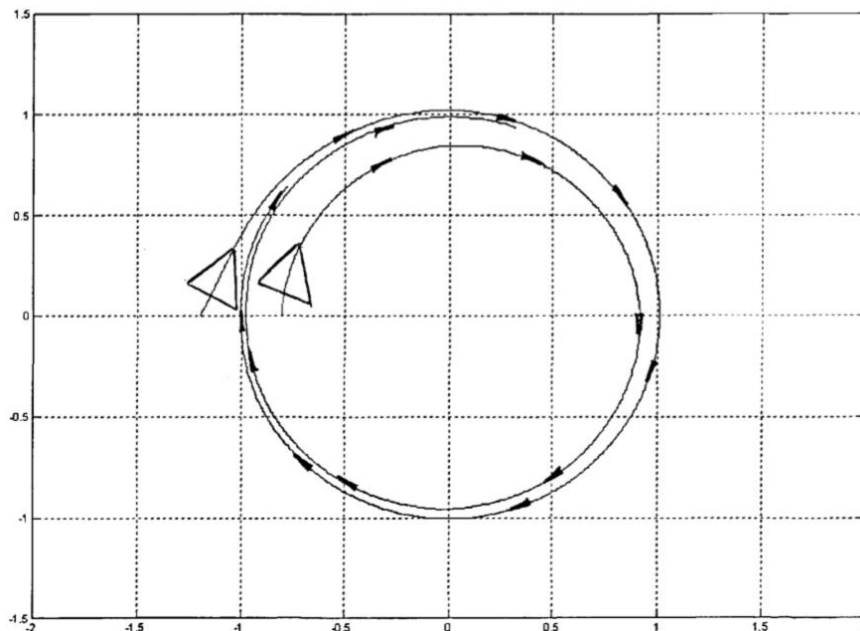


Рисунок 4.18 – Фазовий портрет при русі робота навколо маяка

#### 4.5 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі представлено обговорення та аналіз скінченних автоматів.

Програмні реалізації, відтворені для кінцевих автоматів «Вибір», «Маяки-ворота», «Маяки-ворота-вісім», «Змія»

Розроблено алгоритм апроксимації завдання траєкторії руху робота на полігоні та реалізовано навчання нейронної мережі.

## ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена дослідженню аналізу математичної моделі колісного робота та побудові законів керування рухом колісного робота при відсутності чітко визначеної необхідної траєкторії руху:

- метод побудови та класифікація математичних моделей колісних роботів. Ключем до побудови моделі робота є узагальнення кінематичних обмежень, створених колісним модулем;

- розроблено структуру системи керування мобільними роботами, в якій верхній контролер складається з двох модулів: аналізатора та модуля корекції руху.

- траєкторію в робочому просторі будь-якого мобільного колісного робота можна розбити на примітивні рухи прямолінійного або криволінійного руху, використовуючи цей підхід у розробці алгоритму планування траєкторії, наприклад, для представлення траєкторії руху, за якою слідує кінцевий ефектор робота в робочому просторі. Це гарантує простоту алгоритму, а також зручність і видимість кінцевого контролера руху.

- розроблений алгоритм локального керування вирішує задачу керування роботом за відсутності визначених завдань траєкторії руху зі знанням поточного відхилення від траєкторії;

- на основі методу нечіткої логіки разом із нейромережевою технологією розроблено алгоритм налаштування траєкторії робота так, щоб він не зіткнувся з об'єктами в його робочому просторі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Теорія механізмів і машин. Курс лекцій для студентів спеціальності „Динаміка і міцність машин”/ Автор: к.т.н., доц. О.П. Заховайко. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 243 с.
2. Forming of Involute Gearing: Instructions on term project hpreparation on the discipline “Theory of Mechanisms and Machines” for international students of 241 engineering specialities / Уклад.: О.П. Заховайко. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 48 с.
3. Theory of Mechanisms and Machines: Instructions on laboratory works procedure for international students of engineering specialities /Уклад.: О.П. Заховайко, О.І. Дубинець, Ю.М. Сидоренко. – К.:НТУУ «КПІ», 2006. – 88 с.
4. Дубчак В. М. Вища математика в прикладах та задачах. Навчальний посібник / В.М.Дубчак, В.М.Пришляк, Л.І.Новицька. – Вінниця: ВНАУ, 2018. – 254 с
5. Харченко А.П. Вища математика в прикладах і задачах, частина І: Навчальний посібник / А.П.Харченко, В.О.Гаєвська, Г.В.Лисянська. – Х:НТМТ, 2017. – 194 с
6. Харченко А.П. Вища математика в прикладах і задачах, частина ІІ: Навчальний посібник / А.П.Харченко, В.О.Гаєвська, Г.В.Лисянська. – Х:НТМТ, 2017. – 233 с
7. Вища математика: базовий підручник для вузів / В.С.Пономаренка. – Х.: Фоліо, 2016. – 669 с
8. Герасимчук В. С. Вища математика. Повний курс у прикладах і задачах / В.С.Герасимчук, Г.С.Васильченко, В.І.Кравцов. – К.: Книги України ЛТД, 2015. – 470 с
9. Практикум з вищої математики: Навчальний посібник / За ред. В.О.Ковалю. – Ж: ЖДТУ, 2008. – 448 с
10. Вища математика. Загальний курс: Збірник задач та вправ. / А.Д.Тевяшев, О.Г.Литвин. URL: <https://www.twirpx.com/file/277182/> (дата

звернення 12.05.2021)

11. Вища математика. Збірник задач: Навчальний посібник / В.П.Дубовик. URL:

[https://issuu.com/erudytnet/docs/1dubovik\\_v\\_p\\_yurik\\_i\\_i\\_vishcha\\_mate](https://issuu.com/erudytnet/docs/1dubovik_v_p_yurik_i_i_vishcha_mate) (дата звернення 12.11.2024)

12. Коруд В.І., Електротехніка: Підручник / В.І. Коруд, О.Є. Гамола, С.М. Малинівський; За заг. ред. В.І. Коруда. – 3-є вид., переробл. і доп. – Львів: Магнолія Плюс, 2006. – 447 с.

13. Михайленко В.Є., Інженерна та комп'ютерна графіка: Підручник / В.Є. Михайленко, В.В. Ванін, С.М. Ковальов; За ред. В.Є. Михайленка. – 6-е вид. – К.: Каравела, 2012. – 368 с.

14. Титаренко М.В., Електротехніка: Навчальний посібник/ М.В. Титаренко. – К.: Кондор, 2013. – 240 с.

15. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : Підручник / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.

16. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка і мікросхемотехніка / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. під ред. А. Г. Соскова. – Вид. 2-ге, виправл. і доповн. – Харків : ХДАМГ, 2003. – 281 с.

17. Теорія електропривода : Підручник / [М. Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 2003. – 454 с.

18. Руденко В. С. Промислова електроніка / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – Київ : Либідь, 2003. – 432 с.

19. Костін М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст]: підручник у 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпро: Видво ДНУЗТ, 2006. – Т. 1. – 336 с; 2007.- Т.2.- 276 с; 2011. – Т.3, Ч.1. – 224 с; 2012.– Т.3, Ч.2. – 352 с.

20. Качан Ю. Г. Лінійна електротехніка (теоретичні основи) [Текст]: навч. посібник / Ю. Г. Качан.– Запоріжжя: Вида-во Запорізької держ. інж. академії, 2005. – 206 с.

21. Гуржій А. М. Електротехніка та основи електроніки : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Гуржій, С. К.

Мещанінов, А. Т. Нельга, В. М. Співак. - Київ : Літера ЛТД, 2020. - 288 с.

22. Електрика та магнетизм : підручник / Л. Д. Дідух. - Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. - 464 с. - Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31412..>

23. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайчен-ко. - Київ : Освіта України, 2010. - 159 с. - Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.

24. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський. - Київ : Каравела, 2006. - 384 с.

25. Макаренко В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотех-ніка» [Електронний ресурс] / В. В. Макаренко, В. М. Співак ; НТУУ «КПІ». -Київ : НТУУ «КПІ», 2015. - 314 с. - Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>.

26. Панчевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практика / Б. І. Панчевний, Ю. Ф. Свєргун. - 2-ге вид. - Київ : Каравела, 2004. - 440 с.

27. Воробйова О. М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / О. М. Воробйова, Ю. В. Флейта. - Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018. - 208 с.

28. Бойко В. І. Мікрокомп'ютерна техніка / В. І. Бойко, А. Т. Нельга. - 2-ге вид. - Київ : Науково-методичний центр вищої освіти, 2008. - 254 с.

29. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.: іл.

30. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г.,Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

31. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. –

617 с.

32. Матвійчук А. Я. Електротехніка: навчально-методичний посібник/ Матвійчук А. Я., В. Л. Стінянський; Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського.– Вінниця, 2017. -270 с.

33. Загальна електротехніка з основами автоматики: Навчальний посібник / Т.В.Левченко. – К., 2010. – 358 с.

34. Технічний сервіс в агропромисловому комплексі: навчальний посібник / Коновалюк О.В., Кіяшко В.М., Колісник М.В. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 404 с.

35. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.

36. Електроніка та мікросхемотехніка: Навчальний посібник / За ред. проф. В.Ф. Яковлева. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.

37. Монтаж електрообладнання і систем керування / За заг. ред. проф. Яковлева В.Ф. – К.: Аграрна освіта, 2009. – 348 с.

38. Довідникова книга з електроенергетики: навчальний посібник/ П.В. Волох, М.П. Цоколенко, Л.В. Ревенко, В.А. Грічаненко та ін. –К. : Аграрна освіта, 2014. – 506 с.

39. Електроніка і мікропроцесорна техніка / Сенько В.І., Лисенко В.П., Юрченко О.М., Лукін В.Є., Руденський А.А. — К. : «Агроосвіта», 2015. — 676 с.

40. Електропостачання агропромислового комплексу : підруч. / Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М. – К. : Аграрна освіта, 2011. – 448 с.

41. Ремонт машин та обладнання : підручник / [Сідашенко О.І. та ін.]; за ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К. : Агроосвіта, 2014. – 665 с.

42. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т : Т 1 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. А.В. Рудя. – К. : Агроосвіта, 2012. – 584 с.; іл.

43. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т : Т 2 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. А.В. Рудя. – К. : Агроосвіта, 2012. – 434 с.; іл.
44. Комп'ютери та комп'ютерні технології : навч. посіб. Ч. 1. Програмування в математичному пакеті MathCAD / В.П. Лисенко. І.М. Болбот. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 229 с.
45. Костинюк Л.Д. Моделювання електроприводів/ Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук.. - Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2004. - 404 с.
46. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування/ М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. -Київ, “Либідь”, 2007.-504 с.
47. Ткачук В.І. Електромеханотроніка. Підручник/ В.І. Ткачук. - Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2006. - 440 с.
48. Півняк Г.Г. Сучасні частотно-регульовані електроприводи зі широтно- імпульсною модуляцією: Монографія/ Г.Г. Півняк, О.В. Волков.. - Дніпропетровськ, НГУ, 2006. - 470 с.
49. Ісікова, Н. П. Проектування інформаційних систем [Текст] : навч. посіб. / Н. П. Ісікова, Т. В. Решетняк. — Краматорськ : ДДМА, 2020. — 111 с.
50. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Мікропроцесорні пристрої» для студентів спеціальності 092206 «Електричні машини та апарати» / Уклад.: Ю. С. Грищук, Т. П. Павленко. – Харків : ХДПУ, 2009. – 32 с.
51. Мікропроцесорна техніка : підручник / Ю. І. Якименко, Т. О. Терещенко, Є. І. Сокол та ін. / за ред. Т. О. Терещенко. – Київ : Політехнік, 2003. – 440 с.
52. Алексієв О. П. Мікроконтролери для транспортних і промислових застосувань.: архітектура та програмування : навч. посіб. / О. П. Алексієв, О. Б. Богаєвський, В. П. Волков. – Харків : ХНАДУ, 2004. – 156 с.
53. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Мікропроцесорні пристрої». – Ч. 2 : «Однокристальні мікро контролери» для

студентів спеціальностей 092206 «Електричні машини та апарати» і 092205 «Електропобутова техніка» усіх форм навчання / уклад. Ю. С. Грищук. – Харків : НТУ «ХП», 2003. – 43 с.

54. Міліх В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В.І. Міліх, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І.Міліх. – Київ : Каравела, 2012. – 688 с.

55. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка / В.І. Міліх. – Київ : "Каравела", 2006. – 376 с.

56. Андрієнко В.М. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К. : НУХТ, 2010. – 366 с.

57. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.

58. Електричні машини : підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.

59. Яцун М.А. Електричні машини : навч. посіб. для студ. базового напрямку «Електромеханіка» / М.А. Яцун – 2-ге вид., стер. – Львів : Видво Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.

60. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек – Л. : Энергия, 1974. – 840 с. 11. Кацман М.М. Электрические машины : учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений / М.М. Кацман - 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2001. – 463 с.

61. Щерба А.А., Поворознюк Н.І. Електротехніка. Частина І. Електричні кола.: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с.

62. Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 272 с.

63. Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. Теоретичні основи

електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 2: Перехідні процеси у лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2008. – 224 с.

64. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с. Ч.2: Основи електроніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 307 с.

65. Малинівський С.М. Загальна електротехніка. – Львів: Видавництво Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 594 с.

66. Електротехніка та електроніка. Теоретичні відомості, розрахунки та дослідження за підтримкою комп’ютерних технологій: Навчальний посібник. / А.А. Щерба, В.М. Рябенський, М.С. Кучеренко, К.К. Побєдаш. В.І. Чибеліс, А.Т. Кінаш, Л.В. Солобуто: За заг. ред. А.А. Щерби та В.М. Рябенського. – К.: «Корнійчук», 2007. – 488 с.

67. Васильєва Л.Д., Медведенко Б.І., Якименко Ю.І. Напівпровідникові прилади: Підручник. – К.: ІВЦ, “Видавництво «Політехніка»”, 2003. – 388 с.

68. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти у 4-х т. Під ред. В. І. Сенька. – Т.1: Елементна база електронних пристроїв. – К.: ТОВ “Видавництво Обереги”, 2000.– 300 с.

69. Навчально-методичний посібник з курсу “Електротехніка”. Розділ “Розрахунок лінійних кіл постійного струму” / укл. Щерба А. А., Грудська В. П., Спінул Л.Ю - К.: ІВЦ «Політехніка».- 2004.

70. Навчально-методичний посібник з курсу “Електротехніка”. Розділ “Розрахунок лінійних кіл однофазного синусоїдного струму” / укл. Щерба А.А.,Грудська В. П., Спінул Л.Ю. - К.: ІВЦ «Політехніка».- 2004.

## ДОДАТОК А

### Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка у технологічних процесах»)

УДК 681.5

DOI:

МАКАРИШКІН Денис

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>

[makaryshkind@khmnu.edu.ua](mailto:makaryshkind@khmnu.edu.ua)

ГОРОШКО М.І.

Хмельницький національний університет

ЛЮБЧИК Віталій

ТОВ «Карат»

[vitaly1612@gmail.com](mailto:vitaly1612@gmail.com)

#### ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ КОЛІСНИХ РОБОТІВ

У статті розглядається математична модель колісного робота. Подано огляд існуючих засобів і методів управління. Розглянуто та проаналізовано процес створення та класифікації математичних моделей колісних роботів. Розглянуто кінематичну схему колісного робота. Розроблено систему координат і геометрію мобільного колісного робота. Розглянуто кінематичні характеристики колеса, механічної системи з кінематичними зв'язками. Розглядаючи класифікацію неголономних систем, виявлено, що для опису положення колісного мобільного робота використовуються змінні, які не є повністю незалежними. Встановлено рівняння Магджі для неголономних зв'язаних електромеханічних систем.

Ключові слова: математична модель, колісний робот, кінематична характеристика колеса, неголономна система

MAKARYSHKIN Denys, HOROSHKO M.I.

Khmelnytsky National University

LIUBCHYK Vitalii

Karat LTD

#### RESEARCH OF WHEEL ROBOT MODELS

The article considers the mathematical model of a wheeled robot. An overview of existing control tools and methods is given. The process of creating and classifying mathematical models of wheeled robots is considered and analyzed. The kinematic scheme of a wheeled robot is considered. The coordinate system and geometry of a mobile wheeled robot are developed. The kinematic characteristics of a wheel, a mechanical system with kinematic connections, are considered. Considering the classification of non-holonomic systems, it is found that variables that are not completely independent are used to describe the position of a wheeled mobile robot. The Maggi equation for non-holonomic coupled electromechanical systems is established.

Further research is proposed to be carried out in the direction of improving mathematical models of the movement of a wheeled robot, to increase the predictability of movement and improve its navigation. This will allow more accurately designing mobile platforms with improved characteristics. It is also advisable to use the developed models for mathematical modeling at the stage of designing wheeled robots.

Keywords: mathematical model, wheeled robot, kinematic characteristic of the wheel, non-holonomic system

#### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Рішення задачі проектування сучасної системи керування колісним роботом потребує адекватних математичних моделей, які адекватно описують, з одного боку, поведінку робота під час його руху в робочому просторі, а з іншого боку, програм, придатних для виконання синтетичних алгоритмів керування. У цьому

відношенні однаково неприйнятні як примітивні моделі, так і надто складні моделі, використання яких для синтезу систем створить непереборні аналітичні труднощі.

Як об'єкт управління колісний робот є за своєю суттю нелінійною багатоканальною динамічною системою. Його математичний опис (модель руху) можна отримати за допомогою рівнянь Лагранжа або Ньютона-Ейлера, де ефекти сили-імпульсу  $F$  і  $M$  створюються зубчастою передачею. В останньому визначено основні характеристики моделей роботів розглянутої категорії та їх відмінності від твердотільних моделей руху. Кут повороту колеса та вектор його лінійної швидкості взаємопов'язані, тобто на них діють неголономні обмеження, що викликає великі труднощі при аналізі та синтезі систем колісних роботів.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Стан будь-якої механічної системи описується певним мінімальним набором координат. Введення додаткових зв'язків між системою координат зменшує кількість її ступенів свободи. Співвідношення, які обмежують швидкості точок і тіл системи, тобто встановлюють певні співвідношення між цими швидкостями, називаються кінематикою. Кінематичні зв'язки, які не можна звести до геометричних зв'язків, називають неголономними системами, а механічні системи з такими зв'язками - неголономними [1]. Це враховується прямим введенням координат, якщо всі зв'язки геометричні (повні), тобто обмеження накладаються тільки на точки системи і положення об'єктів (або переміщення під час руху), а не на величину їх швидкостей. Ситуації відповідають дійсному числу ступенів свободи. Однак цей вибір координат неможливий, якщо в рівняннях зв'язку є неголономні обмеження. Рівняння неповних зв'язків не можна використовувати для зменшення числа координат, тому за наявності таких зв'язків неминуче використовувати координати, які не можуть бути незалежними. Прикладом неголономної системи є кулька, що котиться по шорсткій поверхні без ковзання. При цьому накладається обмеження не тільки на положення центру сфери (геометрична залежність), а й на швидкість точки її контакту з площиною, яка повинна дорівнювати нулю в будь-якому місці. Інший приклад - зв'язки, накладені на керовані рухи. Наприклад, якщо рух точки задовольняє умову, що її швидкість у будь-який момент повинна вказувати на іншу рухомию точку, то ця умова не може бути зведена до будь-якої залежності між координатами, і зв'язок є неповною. У робототехніці найпоширенішим прикладом неголономної системи є мобільний робот [2].

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття**

З точки зору теорії керування, наявність неголономних зв'язків перешкоджає використанню розроблених стандартних алгоритмів моделювання, планування та керування, особливо для маніпулювання роботами [3]. Тому проблема планування та керування рухом мобільних колісних роботів залишається актуальною.

#### **Формулювання цілей статті**

Завдання статті полягає у систематизації питання, пов'язані з конструюванням, класифікацією та аналізом математичних моделей колісних роботів.

#### **Виклад основного матеріалу**

Колісний робот — це самохідна колісна машина з функціями автоматичного керування. Основними елементами конструкції робота є крокуючі пристрої,

Ходова частина робота складається з рухомої основи (кузова, платформи) і колісного модуля (КМ), які забезпечують необхідний напрямок руху і швидкість руху робота на площині. Колісний модуль складається з коліс, підвіски та приводного механізму, як правило, включає двигун постійного струму, вбудований редуктор, гальмо тощо. Конструкції колісних модулів, які фактично використовуються, можна розділити на фіксовані (нерухомі), ротаційно-симетричні (рульові) та ротаційно-асиметричні за типом використовуваної підвіски [4].

Неповоротні колісні модулі (рис. 1а) – це модулі, в яких колеса кріпляться до рами за допомогою вил. Цей тип модуля не можна керувати, тобто він призначений для створення поздовжньої рушійної сили. Обертально-симетричний колісний робот (рис. 1б) з'єднаний з рамою таким чином, щоб він міг обертатися навколо вертикальної осі, тому модуль даної конструкції оснащений приводом, який дозволяє йому обертатися відносно вертикальної осі. Крім того, модулем такої конструкції також можна керувати. Особливістю

конструкції обертально асиметричного колісного модуля (рис. 1в) є ексцентриситет між горизонтальною віссю колеса, встановленого на вилці, і вертикальною віссю вилки, встановленої на рамі. Якщо колісний модуль такої конструкції не повертається, його обертання навколо вертикальної осі може здійснюватися з мінімальним зусиллям. В цьому випадку його ще називають флюгером або самовирівнюванням. Комбінація неповоротних, ротаційно-симетричних і асиметричних колісних модулів утворює кінематичну схему робота (рис. 2).

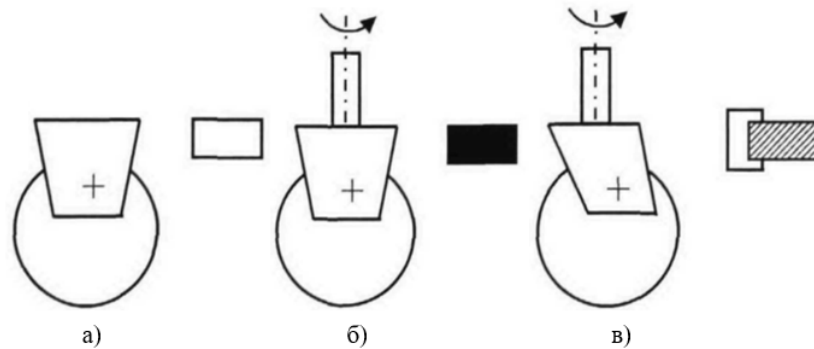


Рис. 1 – Конструкції колісних модулів

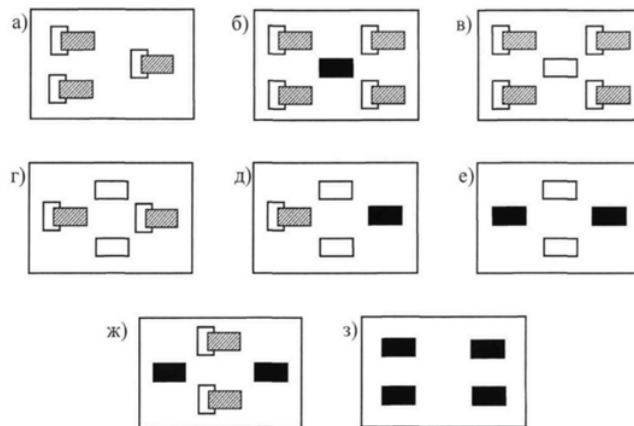


Рис. 2 – Кінематичні схеми

Кінематичні схеми колісних роботів різноманітні і пояснюються багатьма застосовуваними в них особливостями. Ці характеристики включають, серед іншого, необхідність досягнення максимальної працездатності з мінімальною складністю конструкції робота та мінімальними витратами. Активна поведінка колісних роботів у складних середовищах досягається за рахунок використання нових, більш складних кінематичних схем і передових систем вимірювання, контролю та зондування. Необхідною умовою виконання важливих транспортних завдань та підвищення мобільності колісних роботів є резервування кінематичної схеми, що досягається збільшенням кількості активних (ведучих) колісних модулів та їх раціональним розташуванням на корпусі робота [5].

У кожен момент плоскопаралельний рух твердого тіла узгоджується з поступальним або обертальним рухом відносно деякої точки, яка називається миттєвим центром швидкості. Прямая лінія, що проходить через центр миттєвої швидкості та будь-яку точку на даному об'єкті, перпендикулярна вектору лінійної швидкості в цій точці. Для колісних роботів без бокового ковзання коліс напрямком векторів осьової швидкості коліс необертально-симетричних модулів визначається напрямком поздовжньої осі цих коліс, отже, положенням

миттєвого центру платформи Швидкість проходить через центр колеса і перпендикулярно до перетину прямих його поздовжньої осі (рис. 3). Якщо колесо розташоване так, що ці прямі не перетинаються в точці, миттєвого центру швидкості немає, тому рух на площині в цьому випадку неможливий. Якщо схема руху робота містить два неповоротних колеса, горизонтальні осі яких не збігаються, робот може рухатися лише відносно фіксованого центру миттєвої швидкості. З практичної точки зору ця структура є виродженою.

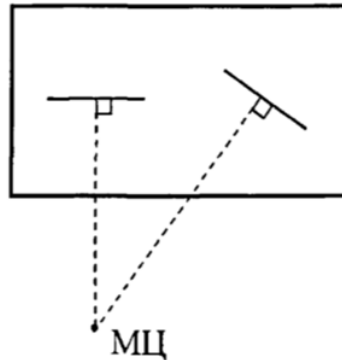


Рис. 3 – Миттєвий центр швидкостей робота

Проведемо порівняльний аналіз кінематичних схем, зображених на рисунку 2. Для кінематичної схеми робота, оснащеного тільки обертовим асиметричним модулем колеса (рис. 2а), миттєвий центр швидкості платформи може знаходитися в будь-якій точці площини руху робота в кожен момент, змінюючи напрямку руху робота не потребує попередньої настройки колеса.

Для кінематичної схеми, що містить кілька обертально-асиметричних модулів і один обертально-симетричний модуль (рисунку 2б), положення миттєвого центру швидкості платформи в кожен момент може належати будь-якій точці на горизонтальній осі обертально-симетричного модуля. Тому для його переміщення відносно платформи потрібна попередня переорієнтація коліс модуля.

Кінематична властивість наявності обертально-асиметричного модуля та одного неповоротного модуля (рис. 2в) полягає в тому, що миттєвий центр швидкості платформи завжди знаходиться на осі неповоротного колеса, його положенні відносно платформи. У цьому випадку переміщення центру швидкості платформи вздовж осі не вимагає переорієнтації коліс. Якщо схема складається з двох і більше модулів, що не обертаються (рис. 2г), то їх горизонтальні осі повинні збігатися, інакше кінематична схема практично недоцільний.

У кінематичній схемі, що містить два співвісних неповоротних колеса і обертально-симетричний модуль (рис. 2д), положення миттєвого центру швидкості платформи в кожен момент належить точці перетину: поперечна вісь нерухомого колеса і обертально-симетричний модуль. Керування цим роботом відбувається за рахунок переорієнтації обертових коліс. Змінюючи напрямку обертового колеса, центр швидкості переміщується вздовж осі неповоротного колеса, тобто центр швидкості не може перебувати в будь-якій точці платформи, а його безліч можливих положень утворює пряму лінію. Якщо до складу рішення входять два або більше обертально-симетричних модулів (рис. 2д), то вони повинні бути узгоджені між собою, щоб забезпечити існування миттєвого центру швидкості платформи, тобто прямої, що проходить через центр обертально-симетричного модуля. Кожне колесо, перпендикулярне його площині обертання, повинно перетинатися в точці.

У кінематичній схемі, складеній з обертально асиметричного і симетричного модулів (рис. 2ж), положення миттєвого центру швидкості платформи в кожен момент належить точці перетину горизонтальної осі колеса. Обертально-симетричні модулі і можуть бути змінені за рахунок переорієнтації останніх, так що центр швидкості може перебувати в будь-якій точці платформи. Якщо кінематична схема включає більше двох обертально-симетричних модулів (рис. 2з), то вони повинні бути узгоджені для забезпечення існування миттєвого центру швидкостей.

Таким чином, усі розглянуті кінематичні схеми колісних роботів задовольняють такі умови:

- якщо конструкція обладнана декількома неповоротними колісними модулями, то горизонтальні осі їхніх коліс збігаються;
- центр колеса оберально-симетричного колісного модуля не розташований на горизонтальній осі неповоротного модуля;
- якщо конструкція містить два або більше оберально-симетричних модулів, вони повинні бути скоординовані, щоб забезпечити умови для існування центру миттєвої швидкості.

Кінематичні схеми, які задовольняють перелічені умови, називаються невиродженими [6, 7]. Також слід зазначити, що наявність асиметричних колісних модулів не впливає на маневреність робота, а наявність неповоротних колісних модулів спричиняє її погіршення.

Моделювання та дослідження колісних роботів майбутнього буде здійснюватися за такими модельними припущеннями:

- платформа і колеса абсолютно тверді, робот рухається по горизонтальній площині;
- кожне колесо залишається вертикальним і обертається навколо своєї горизонтальної осі без ковзання, а контакт колеса з опорною поверхнею точковий;
- кількість колісних модулів, що входять до конструкції робота, дорівнює  $N$ ;
- кінематична схема розглянутого робота є невиродженою і складається з  $N_H$  неповоротного,  $N_C$  симетричного обертання,  $N_A$  обертання асиметричного колісних модулів.

Платформа (основа) роботу, що рухається можна розглядати як тверде тіло у абсолютній декартовій системі координат  $Y = R^2$ . Її розміщення на поверхні площини (рис. 4) визначається однозначним вектором  $y = col(y_1, y_2)$ , де  $col$  – ширина, координат точки  $C$  (центру маси або полюсу платформи) у абсолютній (фіксованій) системі координат  $OY_1Y_2$ , що визначає положення, і кутом  $\alpha$ , що визначає орієнтацію осі  $CZ_1$  системи координат роботу  $CZ_1Z_2$ , яка зв'язана з платформою.

Щоб провести аналіз змінних швидкості і сил і моментів у відносній системі координат  $Z$ , зв'язаних з рухомою платформою, потрібно ввести у розгляд ортогональну матрицю: [8, 9]

$$T(\alpha) = \begin{bmatrix} \tau_1^T(\alpha) \\ \tau_2^T(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}.$$

Матриця визначена окремими взаємно-ортогональними векторами  $\tau_1(\alpha), \tau_2(\alpha)$ , які показує рухомий базис роботу, тож,  $\tau(\alpha)T^T(\alpha) = I_2$ .

Ортогональна матриця  $T(\alpha)$  відповідає і такому диференційному рівнянню [11]:

$$\dot{T}(\alpha) = \dot{\alpha}ET(\alpha), \quad (1)$$

де  $E = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$  – кососиметрична матриця.

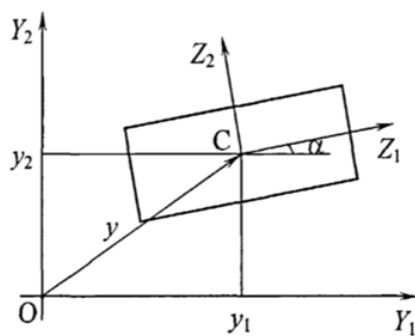


Рис.4 – Рухомий робот у абсолютній системі координат

Розташування кожного  $j$ -го модуля коліс у системі координат  $CZ_1Z_2$  записується розташуванням центру кріплення  $Z^j = col(Z_1^j, Z_2^j)$  (точка  $C^j$ ) і кутом орієнтації  $B^j$  поздовжньої вісі колеса (рис 5).

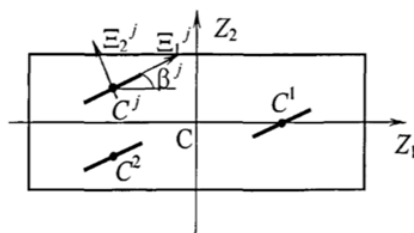


Рис. 5 – Взаємна орієнтація колісних модулів у системі координат робота

Для опису параметрів стану колеса із кожним  $j$ -им модулем колеса встановимо зв'язок системи координат  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  із початком в точці  $C^j$  та кутом орієнтації  $B^j$  по відношенню до системи  $CZ_1Z_2$  (рис. 1.5). Окремі взаємо-ортогональні вектора  $\tau_1(B^j) \tau_2(B^j)$  із системи координат колеса  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  формують ортогональну матрицю:

$$T(B^j) = \begin{bmatrix} \tau_1^T(B^j) \\ \tau_2^T(B^j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(B^j) & \sin(B^j) \\ -\sin(B^j) & \cos(B^j) \end{bmatrix},$$

яка відповідає диф. рівнянню:

$$\dot{T}(B^j) = \dot{B}^j ET(B^j). \quad (2)$$

Положення центру колеса  $C_0^j$  у системі координат  $C^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  можна записати постійним вектором  $\zeta^j = col(\zeta_1^j, \zeta_2^j)$ .

Взаємозв'язок запропонованих систем координат  $Y, Z, \Xi^j$  наведена на рис. 6.

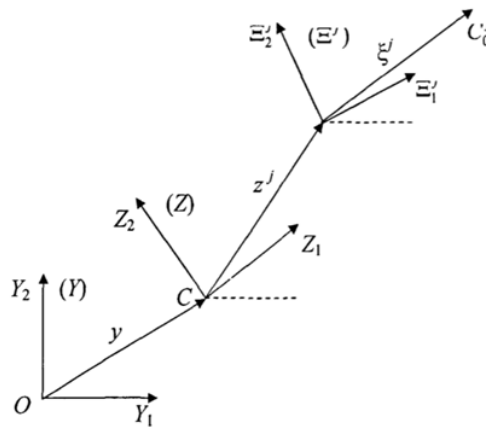


Рис. 6 – Взаємний зв'язок систем координат  $OY_1Y_2$ ,  $CZ_1Z_2$ ,  $C^jXi_1^jXi_2^j$

Нехай  $C_0^j$  – деяка точка, є нерухомою у системі  $C^jXi_1^jXi_2^j$ . Тож, якщо  $\xi^j = col(\xi_1^j, \xi_2^j)$  є координати точки  $C_0^j$  у системі координат колеса  $C^jXi_1^jXi_2^j$ ,  $z^j = col(z_1^j, z_2^j)$  – координати точки  $C^j$  у системі координат робота  $CZ_1Z_2$ , то положення точки  $C_0^j$  в абсолютній системі координат  $OY_1Y_2$  буде описуватись вектором  $y^j$ , що записується наступним виразом:

$$y^j = y + T^T(\alpha)z^j + T^T(\alpha + \beta^j)\xi^j, \quad (3)$$

де  $y = col(y_1, y_2)$  – координати точки  $C$  в абсолютній системі  $OY_1Y_2$ .

Для вектору швидкості  $\dot{y}^j$  і прискорення  $\ddot{y}^j$  точки  $C_0^j$ , заданих в абсолютній системі координат, знаходячи диференціал за часом (3) і з огляду на властивості (1), (2), отримано наступні формули:

$$\dot{y}^j = \dot{y} + \dot{\alpha}T^T(\alpha)E^T z^j + (\dot{\alpha} + \dot{\beta}^j)T^T(\alpha + \beta^j)E^T \xi^j, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}^j = \ddot{y} + \ddot{\alpha}T^T(\alpha)E^T z^j + (\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}^j)T^T(\alpha + \beta^j)E^T \xi^j - \\ - \dot{\alpha}^2 T^T(\alpha)z^j - (\dot{\alpha} + \dot{\beta}^j)^2 T^T(\alpha + \beta^j)\xi^j. \end{aligned} \quad (5)$$

Врази (3) описують геометричні властивості колісного робота, вирази (4) і (5) дозволяють отримати значення швидкості  $\dot{y}^j$  і прискорення  $\ddot{y}^j$  центрів коліс  $C_0^j$  роботу використовуючи швидкості  $\dot{y}$ ,  $\dot{\alpha}$  і прискорення  $\ddot{y}$ ,  $\ddot{\alpha}$  центру платформи і відносні кутові швидкості  $\dot{\beta}^j$  і прискорення  $\ddot{\beta}^j$  колісних модулів.

За допомогою колісних модулів робот взаємодіє з опорною поверхнею. Через нього передаються сили, які утримують робота на шляху, дозволяючи йому виконувати необхідні маневри в потрібному напрямку та із заданою швидкістю руху. Конструктивні характеристики колісного робота повністю визначаються набором

колісних модулів, що входять до його конструкції. Розглянемо кінематичні характеристики основних типів колісних модулів.

Неповоротний (фіксований) модуль. Розроблений модуль призначений для створення поздовжніх рушійних сил, оскільки він може обертатися навколо своєї горизонтальної осі, але його орієнтація відносно платформи є фіксованою.

Якщо  $N_H$  – кількість фіксованих модулів, з яких утворюється конструкція платформи. Усі  $j$ -і ( $j = 1, \dots, N_H$ ) колеса описується координатами центру приєднання  $z_H^j = \text{col}(z_{H1}^j, z_{H2}^j)$  (точка  $C_H^j$ ), заданим кутом орієнтації  $\beta_H^j$  у системі координат робота  $CZ_1Z_2$ , кутом повороту відносно своєї горизонтальної осі  $\theta_H^j$  і радіусом  $r_H^j$ . Не нехтуючи узагальненням можна припустити  $\beta_H^j = 0$  і  $z_{H1}^j = 0$  ( $j = 1, \dots, N_H$ ). Координати центру колеса в системі  $C_H^j \Xi_1^j \Xi_2^j$  у випадку який розглядається, вони мають збіг із початком координат  $C_H^j$ , отже  $\xi_h^j = 0$  ( $j = 1, \dots, N_H$ ).

Припускаючи, що проекція точки контакту коліс із поверхнею опори на площину  $OY_1Y_2$  співпадає із точкою  $C_H^j$  і тож взявши за основу вираз (4), за умови відсутності ковзання поздовжнього та поперечного коліс, можна записати вираз кінематики коліс:

$$T(\alpha)\dot{y} + E^T z_H^j \dot{\alpha} - \begin{bmatrix} r_H^j \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_H^j = 0 \quad (j = 1, \dots, N). \quad (6)$$

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті розглядається математична модель колісного робота. Подано огляд існуючих засобів і методів управління. Розглянуто та проаналізовано процес створення та класифікації математичних моделей колісних роботів. Розглянуто кінематичну схему колісного робота. Розроблено систему координат і геометрію мобільного колісного робота. Розглянуто кінематичні характеристики колеса, механічної системи з кінематичними зв'язками. Розглядаючи класифікацію неголономних систем, виявлено, що для опису положення колісного мобільного робота використовуються змінні, які не є повністю незалежними. Встановлено рівняння Маджи для неголономних зв'язаних електромеханічних систем.

Подальші дослідження пропонується проводити у напрямку удосконалення математичних моделей руху колісного робота, для підвищення прогнозованості руху та покращення його навігації. Це дозволить більш точно проектувати мобільні платформи із покращеними характеристиками. Також розроблені моделі доцільно використовувати для математичного моделювання на етапі проектування колісних роботів.

#### Література

1. Campton G., Bastin G., D'Andera-Novel B. Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots // IEEE Trans, on Robotics and Automation. – 1996. – V.12, №1. – P.47-61.
2. Seradji H. Configuration control of redundant manipulators: theory and implementation // IEEE Trans, on Robotics and Automation. – 1989. – V.5, №4. – P.472-490.

3. Sordalen O.J., Nakamura Y., Chung W.J. Path planning and stabilization of nonholonomic manipulator // Proc. of 3rd European Control Conference. – Roma, 1995. –P.2642-2647.
4. Nijmeijer H., van der Schaft A.J.H. Nonlinear dynamical control systems. – N.Y.: Springer-Verlag, 1990.
5. Tilbury D., Sordalen J., Bushnell L., Sastry S. A multi-steering trailer system: Conversion into chained form using dynamic feedback // IEEE Trans, on Robotics and Automation. – 1995. – V.11, №6. – P.807-818.
6. Brockett R.W. Asymptotic stability and feedback stabilization // Differential Geometric Control Theory. Birkhauser: Boston, 1983. – P. 181-191.
7. Nijmeijer H., van der Schaft A.J.H. Nonlinear dynamical control systems. – N.Y.: Springer-Verlag, 1990.
8. Sordalen O.J., Egeland O. Exponential stabilization of chained nonholonomic systems // Proc. 2nd European Control Conference. – Groningen, The Netherlands, 1993. – P. 1438-1443
9. Su C., Stepanenko Y. Robust motion/force control of mechanical systems with classical nonholonomic constraints // IEEE Trans, on Automatic Control. – 1994. V.39, №3. – P. 609-614.

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Горошко Микола Ігорович

Тема: Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 90

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка математичної моделі для колісного робота та розробка алгоритмів апроксимації задавання траєкторій руху колісних мобільних роботів у динамічних середовищах
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі розглядається математичний опис колісної машини. Подано загальний опис існуючих засобів і методів управління. Розглянуто порядок створення та категоризації математичних моделей колісних транспортних засобів. Розглянуто схему руху колісної машини. Побудовано систему координатно-геометричного опису рухомого колісного транспортного засобу. У другому розділі розглядається математична модель колісних роботів. Визначено процедурний метод розв'язання задачі апроксимації траєкторії руху на основі кінцевого автомата. Розглянуто методи керування мобільним роботом. Проаналізовано канонічні форми та системи диференціальних площин, що стосуються поставленої проблеми. У третьому розділі описуються завдання, поставлені для подальшого вирішення: «Відбір проб», «Ворота маяка», «Ворота маяка вісім», «Змійка». Сформовано структурну схему системи керування колісним мобільним роботом. Розроблено апроксимаційний алгоритм виконання задачі змінних координат траєкторії руху колісного робота та напрямку руху по заданому полігону в динамічному середовищі за допомогою маяків. У четвертому розділі представлено обговорення та аналіз скінченних автоматів. Програмні реалізації, відтворені для кінцевих автоматів «Вибір», «Маяки-ворота», «Маяки-ворота-вісім», «Змія». Розроблено алгоритм апроксимації задавання траєкторії руху робота на полігоні та реалізовано навчання нейронної мережі.
4. Позитивні сторони роботи: розроблено математичну модель для колісного робота та розробка алгоритмів апроксимації задавання траєкторій руху колісних мобільних роботів у динамічних середовищах

5. Негативні сторони роботи: недостатньо уваги приділено огляду наявних технічних рішень, наявні граматичні, стилістичні помилки

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (4,00/5)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Чесюха Віктор Миколадович

канд. техн. наук, доцент кафедри

кібербезпеки

"13" 12 2024 р.

  
(підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Горошко Микола Ігорович

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТм-23-2

### ЗАЯВА


З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.12.24

дата



підпис

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Микола ГОРОШКО

**Співавтор:**

**Назва:** Горошко на антиплагіат

**Науковий керівник:** Денис МАКАРИШКІН

**Підрозділ:** Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**Коефіцієнт подібності 1:**40.8%

**Коефіцієнт подібності 2:**25.2%

**Мікропробіли:** 4

**Заміна букв:** 12

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2024-12-13 08:08:56.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

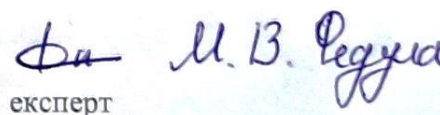
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-13

Дата

  
експерт

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Микола ГОРОШКО

**Співавтор:**

**Назва:** МКР Горошко в1

**Науковий керівник:** Денис МАКАРИШКІН

**Підрозділ:** Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**Коефіцієнт подібності 1:** 17.4%

**Коефіцієнт подібності 2:** 10%

**Мікропробіли:** 6

**Заміна букв:** 10

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2024-12-16 14:21:36.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

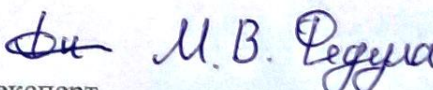
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-16

Дата

  
експерт

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 3.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 9%**

ID: 158534 Назва: МКР Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі Додано в БД: 2024-12-13 Автора: Микола ГОРОШКО Керівники: Денис МАКАРИШКІН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	94245	903	4002 (4%)	58 (6%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 25.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 9%**

ID: 160044 Назва: МКР Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі Додано в БД: 2024-12-16 Автора: Микола ГОРОШКО Керівники: Денис МАКАРИШКІН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	95313	896	23527 (25%)	291 (32%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
158534	Назва: МКР Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі Додано в БД: 2024-12-13 Автора: Микола ГОРОШКО Керівники: Денис МАКАРИШКІН Консультанти: Опоненти:	23398 (25.0%)	300 (33.0%)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Модель керування мобільним роботом у динамічному середовищі

Автор: Горошко Микола Ігорович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Макаришкін Денис Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	<b>відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

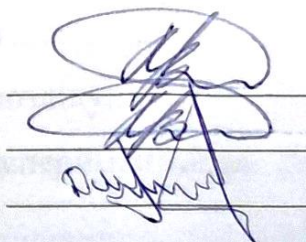
3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 17,4% і адресується до 5 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН