

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Чорноморський національний університет**  
**імені Петра Могили**  
**Факультет комп'ютерних наук**  
**Кафедра інтелектуальних інформаційних систем**

**ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ**

В.о. завідувача кафедри інтелектуальних  
інформаційних систем, канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Є. В. Сіденко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**«ЕВОЛЮЦІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ БАГАТОЦІЛЬОВИМИ МОБІЛЬНИМИ  
РОБОТАМИ»**

Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

**122 – МКР – 601.21710813**

*Виконав студент 6-го курсу, групи 601*

\_\_\_\_\_ *В.О. Коваленко*

«16» лютого 2023 р.

*Керівник: канд. техн. наук, доцент*

\_\_\_\_\_ *О.В. Козлов*

«16» лютого 2023 р.

**Миколаїв – 2023**

**Чорноморський національний університет ім. Петра Могили  
Факультет комп'ютерних наук  
Кафедра інтелектуальних інформаційних систем**

Освітньо-кваліфікаційний рівень **магістр**

Галузь знань **12 «Інформаційні технології»**  
*(цифра і назва)*

Спеціальність **122 «Комп'ютерні науки»**  
*(цифра і назва)*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри інтелектуальних  
інформаційних систем, канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ **Є. В. Сіденко**

**«    »    20 р.**

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську кваліфікаційну роботу**

**Коваленко Владиславу Олеговичу**

*(прізвище, ім'я, по батькові)*

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багаточільовими мобільними роботами».

Керівник роботи Козлов Олексій Валерійович, канд.техн.наук, доцент.

Затв. наказом Ректора ЧНУ ім. Петра Могили від «03» листопада 2022 р. № 199

2. Строк подання студентом роботи 16 лютого 2023 р.

3. Вхідні (початкові) дані до роботи: синтез нечіткої системи керування; вектор консеквентів, початкова база правил. Очікуваний результат: розробка системи автоматичного керування мобільним роботом з оптимізованою базою правил.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розглянути):

- аналіз особливостей та характеристик сучасних систем автоматичного керування мобільними роботами різного призначення;
- аналіз та узагальнення сучасних методів синтезу та оптимізації нечітких систем керування;

- розробка методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами різного призначення;
- розробка програмних засобів реалізації методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами різного призначення;
- розробка нечіткого регулятора Мамдані-типу для системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення із застосуванням методики синтезу та оптимізації бази правил;
- дослідження ефективності та аналіз показників якості системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація.

6. Завдання до спеціальної частини: Безпека робочого місця та середовища праці.

7. Консультанти:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис
Спеціальна частина з охорони праці	докт.,біол.наук, професор Григор'єва Л.І.	
Методична частина	канд.техн.наук, доцент Козлов О.В	

Керівник роботи канд.техн.наук, доцент Козлов О.В.  
(наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завдання прийнято до виконання Коваленко В.О  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Дата видачі завдання « 07 » листопада 2022 р.

# КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

## Виконання магістерської кваліфікаційної роботи

Тема: Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1	Визначення керівника і теми МКР. Подання заяви на затвердження теми МКР	01.09.2022	20.10.2022	Виконано
2	Отримання завдання на виконання МКР	21.10.2022	10.11.2022	Виконано
3	Складання календарного плану на період виконання МКР	11.11.2022	15.11.2022	Виконано
4	Огляд літератури за темою дослідження	16.11.2022	27.11.2022	Виконано
5	Проходження переддипломної практики, збір та аналіз матеріалів до МКР	28.11.2022	18.12.2022	Виконано
6	Аналіз предметної області та розробка технічного завдання. Моделювання результатів	19.12.2022	12.01.2023	Виконано
7	Опис фахової частини МКР, зокрема дослідження існуючих роботів багатоцільового призначення, огляд методів синтезу та оптимізації нечітких систем автоматичного керування, реалізація обраних технологій з аналізом результатів.	13.01.2023	25.01.2023	Виконано
8	Розробка спеціальної частини з охорони праці та методичної частини	26.01.2023	02.02.2023	Виконано
9	Попередній захист МКР на засіданні комісії кафедри	03.02.2023	03.02.2023	Виконано
10	Коригування роботи за результатами попереднього захисту	04.02.2023	06.02.2023	Виконано
11	Остаточне оформлення пояснювальної записки та слайдів доповіді для захисту	07.02.2023	09.02.2023	Виконано
12	Подання МКР рецензенту	09.02.2023	10.02.2023	Виконано
13	Рецензування МКР	11.02.2023	12.02.2023	Виконано
14	Подання МКР, її електронної копії та інших документів (відгуку, рецензії) до захисту	15.02.2023	16.02.2023	Виконано
15	Захист МКР перед екзаменаційною комісією (ЕК)	22.02.2023	22.02.2023	Виконано

Розробив студент Коваленко В.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник роботи канд. техн.наук, доцент Козлов О.В.

(наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

«14» листопада 2022 р.

## АНОТАЦІЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи  
студента групи 601 ЧНУ ім. Петра Могили

**Коваленка Владислава Олеговича**

на тему: **“ЕВОЛЮЦІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ БАГАТОЦІЛЬОВИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ ”**

**Актуальність** запровадженої методики і засобиів синтезу та оптимізації баз правил можуть бути покладені в основу розробки ефективних нечітких систем керування різнотипними мобільними роботами багатоцільового призначення, що здатні переміщуватися по феромагнітним вертикальним та похилим поверхням, та іншими складними технічними об’єктами такого типу.

**Об’єктом** дослідження є процеси оптимізації нечітких систем управління мобільними роботами багатоцільового призначення.

**Предметом** дослідження є методи, моделі та програмні засоби для оптимізації нечітких систем управління мобільними роботами багатоцільового призначення.

**Метою** дослідження є підвищення ефективності процесів управління мобільними роботами багатоцільового призначення шляхом оптимізації консеквентів баз правил нечітких систем.

У магістерській атестаційній роботі проведений аналіз особливостей та характеристик сучасних систем автоматичного керування мобільними роботами різного призначення; розроблена покрокова методика синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами багатоцільового призначення на основі генетичних алгоритмів; розроблено програмне забезпечення для реалізації методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем; для дослідження ефективності запропонованої методики розроблено базу правил нечіткої системи керування швидкістю переміщення мобільного роботу на основі даної

методики та знань експертів; проведені дослідження процесів синтезу бази правил на основі різних популяцій генетичного алгоритму, а також проаналізовані показники якості системи автоматичного керування швидкістю переміщення мобільного роботу.

В роботі розглянуті питання з охорони праці та охорони навколишнього середовища.

Загальний обсяг роботи – 136 сторінок. Магістерська кваліфікаційна робота, 38 рисунків, 5 таблицю і посилання на 79 літературних джерел.

**Ключові слова:** система автоматичного керування, генетичний алгоритм, мобільний робот багатоцільового призначення, об'єкт керування.

## **ABSTRACT**

to the master's qualification work by the student of the group 601 of Petro Mohyla Black Sea National University

**Kovalenko Vladyslav**

### **“EVOLUTIONARY OPTIMIZATION OF FUZZY CONTROL SYSTEMS FOR MULTI-PURPOSE MOBILE ROBOTS”**

The relevance of the introduced methodology and tools for synthesizing and optimizing rule bases can be used as a foundation for the development of effective fuzzy control systems for various types of mobile multi-purpose robots capable of moving on ferromagnetic vertical and inclined surfaces, and other complex technical objects of this type.

The object of research is fuzzy control systems for mobile robots for multi-purpose applications.

The subject of the research is methods, algorithms and software tools for synthesizing and optimizing fuzzy control systems for mobile robots for multi-purpose applications.

The aim of the research is to develop and study methods and software tools for synthesizing and optimizing rule bases of fuzzy control systems for mobile robots for multi-purpose applications.

The master's thesis analyzes the features and characteristics of modern automatic control systems for mobile robots for various purposes; develops a step-by-step methodology for synthesizing and optimizing rule bases of fuzzy control systems for mobile robots for multi-purpose purposes based on genetic algorithms; develops software for implementing the methodology for synthesizing and optimizing rule bases of fuzzy systems; develops a fuzzy control system rule base to study the effectiveness of the proposed methodology.

The paper addresses issues of labor and environmental protection. The overall scope of the work is 139 pages. Thesis contains, 38 figures, 5 tables and 79 sources in it.

**Key words:** automatic control system, genetic algorithm, mobile robot for multi-purpose use, control object.



**ЗМІСТ**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП .....	7
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОБОТІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЇХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	10
1.1. Комплекс задач сучасних робототехнічних об'єктів та систем.....	10
1.2. Класифікація роботів та робототехнічних комплексів за основними властивостями та ознаками .....	11
1.3. Особливості застосування мобільних роботів вертикального переміщення .....	21
1.4. Мобільні роботи для переміщення по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.....	29
Висновки до розділу 1 .....	31
2 МЕТОДИ СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ .....	33
2.1. Розвиток та перспективи застосування нечітких систем керування .....	33
2.2. Існуючі методи синтезу та оптимізації нечітких систем керування .....	38
2.3. Особливості застосування пристроїв нечіткого логічного виводу для керування складними технічними об'єктами.....	44
2.4. Основні властивості нечітких регуляторів типу Мамдані.....	46
Висновки до розділу 2 .....	51
3 МЕТОДИКА ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ БАЗ ПРАВИЛ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	53

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

3.1. Постановка задачі синтезу бази правил нечітких систем керування мобільними роботами багатоцільового призначення.....	53
3.2. Опис генетичних алгоритмів .....	55
3.3. Застосування генетичних алгоритмів для оптимізації бази правил нечіткої систем керування мобільним роботом багатоцільового призначення .....	64
3.4. Розробка програмного забезпечення для оптимізації бази правил нечіткої систем керування мобільним роботом багатоцільового призначення .....	66
Висновки до розділу 3 .....	72
4 СИНТЕЗ БАЗИ ПРАВИЛ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	73
4.1. Основні технічні характеристики та математична модель мобільного робота багатоцільового призначення.....	73
4.2. Розробка бази правил нечіткої системи керування швидкістю мобільним роботом на основі знань експертів та отриманої методики .....	82
Висновки до розділу 4 .....	91
ВИСНОВКИ.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

МРБП – мобільний робот багатоцільового призначення;

САК – система автоматичного керування;

МР – мобільний робот;

ГА – генетичний алгоритм;

НР – нечіткий регулятор;

ЛТ – лінгвістичний терм;

ФН – функція належності;

БП – база правил;

ОК – об'єкт керування;

ПЕ – притискний електромагніт;

ПЗ – притискне зусилля;

ПП – притискний пристрій;

ФП – феромагнітна поверхня;

МРС – магніторушійна сила;

ЕРС – електрорушійна сила;

ККД - коефіцієнт корисної дії;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машин

# **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

## **«ЕВОЛЮЦІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ БАГАТОЦІЛЬОВИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ»**

Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

**122 – МКР – 601.21710813**

*Виконав студент 6-го курсу, групи 601*

***В.О. Коваленко***

«16» лютого 2023 р.

*Керівник: канд. техн. наук, доцент*

***О.В. Козлов***

«16» лютого 2023 р.

**Миколаїв – 2023**

## ВСТУП

Одним з сучасних та перспективних напрямів робототехніки є створення мобільних роботів багатоцільового призначення, які спроектовані для автономного переміщення по відкритій пересіченій місцевості та, в тому числі, по похилих та вертикальних поверхнях. Мобільні роботи такого типу дозволяють уникнути небезпеку для здоров'я людей та порівняно дешево вирішувати комплекс завдань, пов'язаних із розвідкою місцевості, захистом і охороною навколишнього середовища, виконанням різнотипних технологічних операцій тощо. В суднобудівній та судноремонтній промисловості застосування роботів багатоцільового призначення значно спрощує виконання заданих технологічних операцій, а також дозволяє автоматизувати складні виробничі процеси.

При цьому, основні труднощі полягають у виборі вдалих конструкцій, створенні математичних моделей, ефективних керуючих пристроїв та програмно-алгоритмічного забезпечення, що дозволяє керувати просторовим рухом роботів в автоматичному режимі, використовуючи інформацію про їх стан щодо інерціальної системи координат і перешкод або рельєфу та невизначеностей робочої поверхні. Здатність автономно цілеспрямовано переміщуватися в складних умовах нерозривно пов'язана зі здатністю швидко виконувати поставлені завдання, для вирішення яких потрібна наявність інтелектуальних керуючих пристроїв.

Мобільний робот багатоцільового призначення із притискними магнітними пристроями здатний забезпечити високу надійність при переміщенні по вертикальних та похилих феромагнітних поверхнях, а також виконувати задані технологічні операції. Зважаючи на характер робочих поверхонь та особливості виконуваних технологічних операцій, доцільно розробити високоефективну систему

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами автоматичного керування переміщенням мобільного роботу для підвищення його енергоефективності, надійності та економічних показників переміщення при відпрацюванні складних просторових траєкторій.

Сучасні дослідження, що проводяться в різних країнах світу, показують, що для багатьох нелінійних та нестационарних об'єктів керування, до яких відноситься і наведений мобільний робот, доцільно використовувати нечіткі системи автоматичного керування. Крім того, структурно-параметрична оптимізація нечітких систем керування складними технічними об'єктами дозволяє значно розширити перспективу їх ефективного застосування. Таким чином, дослідження, що направлені на розробку та оптимізацію нечітких систем керування мобільними роботами багатоцільового призначення, здатними переміщуватися по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях, безпосередньо є актуальними.

**Метою** дослідження є підвищення ефективності процесів управління мобільними роботами багатоцільового призначення шляхом оптимізації консеквентів баз правил нечітких систем.

Для досягнення заданої мети в магістерській атестаційній роботі поставлено наступні задачі:

- аналіз особливостей та характеристик сучасних систем автоматичного керування мобільними роботами різного призначення;
- аналіз та узагальнення сучасних методів синтезу та оптимізації нечітких систем керування;
- розробка методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами різного призначення;
- розробка програмних засобів реалізації методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами різного призначення;

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

– розробка нечіткого регулятора Мамдані-типу для системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення із застосуванням методики синтезу та оптимізації бази правил;

– дослідження ефективності та аналіз показників якості системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення.

**Об’єктом** дослідження є процеси оптимізації нечітких систем управління мобільними роботами багатоцільового призначення.

**Предметом** дослідження є методи, моделі та програмні засоби для оптимізації нечітких систем управління мобільними роботами багатоцільового призначення.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач в магістерській атестаційній роботі використовуються методи теорії автоматичного керування, теорії нечітких множин та нечіткої логіки, теорії еволюційної оптимізації та теорії математичного аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Отримала подальший розвиток методика та програмно-алгоритмічні засоби для синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами багатоцільового призначення, яка базується на застосуванні генетичних алгоритмів та враховує бажані перехідні процеси системи керування, що забезпечує підвищення ефективності процесу оптимізації та показників якості керування.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані методика і засоби синтезу та оптимізації баз правил можуть бути покладені в основу розробки ефективних нечітких систем керування різнотипними мобільними роботами багатоцільового призначення, що здатні переміщуватися по феромагнітним вертикальним та похилим поверхням, та іншими складними технічними об’єктами такого типу.

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОБОТІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЇХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

## 1.1 Комплекс задач сучасних робототехнічних об'єктів та систем

Останнім часом впровадження роботів та робототехнічних систем проводиться в багатьох сферах людської діяльності, зокрема, в промисловості, транспорті сільському господарстві тощо [1]. В свою чергу, роботи та робототехнічні комплекси застосовуються:

- в різних сферах виробництва;
- в дослідженнях морських глибин та космічного простору;
- в медицині для проведення складних хірургічних операцій, зокрема операцій на мозку та на серці;
- при розробленні та застосуванні військової техніки;
- в області громадської безпеки.

Роботи та різноманітні робототехнічні комплекси дозволяють замінювати людську працю у випадках, коли виконання завдань є дуже складним або пов'язане з загрозою для життя та здоров'я людей. Крім того, роботи можуть бути застосовані при відсутності професійно підготовленого персоналу для виконання циклічно повторюваних трудомістких завдань.

Спеціалізовані робототехнічні комплекси також застосовуються для переміщення по різноманітним складним та довільним поверхням для виконання технологічних операцій. Останнім часом розробляються, серійно виготовляються та впроваджуються мобільні роботи та робототехнічні системи з дистанційним ручним та автоматичним керування для виконання наступних операцій:

- контроль витоків газу та рідин з резервуарів великої місткості;



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

- ультразвуковий контроль зварювальних швів резервуарів для зберігання нафти та газу, а також корпусів суден;
- очищення корпусів плавзасобів та стінок суднових танків;
- діагностика стану поверхонь висотних будівель, миття скла і стін;
- контроль поверхонь стін ємностей та будівель для зберігання рідких ядерних відходів;
- очищення стін шахт ядерних реакторів.

Для створення та вдосконалення різнотипних мобільних роботів та робототехнічних систем доцільно здійснювати проектування їх високоефективних систем автоматичного керування для забезпечення досягнення високих економічних, енергетичних та експлуатаційних показників. Далі розглянемо класифікацію основних типів роботів та робототехнічних комплексів.

## **1.2 Класифікація роботів та робототехнічних комплексів за основними властивостями та ознаками**

За призначенням роботи можуть бути класифіковані наступним чином.

*Промислові роботи.* Головним призначенням цих роботів є автоматизація різнотипних технологічних операцій на виробництві будь-якої продукції, наприклад, зварювання, штампування, металообробка, складання готових виробів тощо. Промислові роботи застосовуються практично у всіх галузях промисловості: машинобудування, приладобудування, нафтохімічна, металургійна, атомна, автомобільна, авіаційна та ін. [2].

*Будівельні роботи.* Будівельні роботи дозволяють здійснювати автоматизацію великої кількості різнотипних операцій, що виконуються під час будівництва та ремонту об'єктів та приміщень. Враховуючи постійно зростаючі обсяги будівництва в

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами світі через постійне збільшення населення планети роботизація будівництва в останні роки є досить актуальною.

*Транспортні роботи.* Транспортні роботи використовуються переважно для автоматичного транспортування та переміщення вантажів або для автономного керування транспортними засобами різного призначення.

*Сільськогосподарські роботи.* Сільськогосподарські роботи призначені для виконання монотонних і трудомістких процесів в сільському господарстві, зокрема, обробка та зрошення ґрунту, збір врожаю, боротьба з шкідниками. На теперішній час ведеться інтенсивна розробка роботів такого типу, наприклад, в Японії [2].

*Побутові роботи.* Даний тип роботів застосовується в побуті людини. Яскравим прикладом побутової автоматизованої машини є робот-пилосос, який останнім часом набирає широку розповсюдженість. До побутових роботів також можна віднести комунікативних роботів, які забезпечують ефект присутності віддалених один від одного людей, або здатних самостійно вести діалог з людиною, і, звичайно, численні роботоіграшки, призначені для розваг і освітніх цілей. У перспективі очікується поява і більш функціональних систем, які матимуть можливість виконувати більш складні домашні обов'язки такі як: миття посуду, прання брудної білизни, приготування їжі і т. п.

*Бойові роботи.* Бойові (військові) роботи покликані вивести збройні конфлікти на якісно інший рівень і призначені для мінімізації безпосередньої участі людини в бойових діях з метою скорочення або виключення зовсім людських втрат, а також для роботи в умовах, несумісних з можливостями людини при проведенні бойових дій. Різновидів бойових роботів стільки ж, скільки і бойових завдань для військових підрозділів: безпілотні з дистанційним управлінням літаки (вертольоти) - розвідники, підводні апарати та надводні кораблі, роботи-сапери, роботи-мінери, роботи-патрульні, роботи для перенесення та транспортування військової амуніції. З огляду

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

на складності поставлених перед ними завдань сучасні бойові роботи керуються оператором, але ведуться розробки повністю автономних бойових роботів із штучним інтелектом, що здатний самостійно приймати рішення.

Перед охоронними роботами ставляться завдання щодо захисту ввірених територій або приміщень. У найпростішому випадку зазначені роботи виконують патрулювання охоронюваних периметрів і в разі фіксації проникнення зловмисників сигналізують про це черговим операторам. Останнім часом перспективною є тенденція до оснащення робо-охоронців нелетальними видами зброї.

*Дослідницькі роботи.* Дослідницькі роботи використовуються для збору, передачі та обробки різних видів інформації про досліджувані об'єкти. Об'єктами можуть бути: поверхні планет, підводний простір, підземні шахти, печери, порожнини експлуатованих трубопроводів, заражена місцевість і інші важкодоступні для людини області.

Роботизовані маніпулятори є найбільш поширеними видами роботів (рис. 1.1). Звичайний маніпулятор зазвичай може складатися з семи сегментів, які з'єднані між собою за допомогою шести суглобів. Керування роботом здійснюється за допомогою комп'ютера, який надсилає керуючі сигнали на крокові двигуни, які заходяться окремо та підключені до суглобів (окремі маніпулятори великої маси та потужності можуть використовувати пневматичні та гідравлічні приводи). В порівнянні зі стандартними обертовими електричними двигунами, крокові двигуни є синхронними машинами, та пересуваються точними кроками. Тому ці роботи переміщують маніпулятори дуже точно, при цьому повторюючи один тип руху багато разів. Крім того, роботи використовуює датчики руху, для реалізації каналів зворотного зв'язку [2].

У нього шість суглобів, тому він нагадує руку людини. Також у нього є частини, що подібні плечу, ліктю та зап'ястю. Як правило, плече встановлюється на нерухомій

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами базовій структурі. Робот такого типу має шість ступенів свободи, отже має змогу повертатися в шести напрямках.

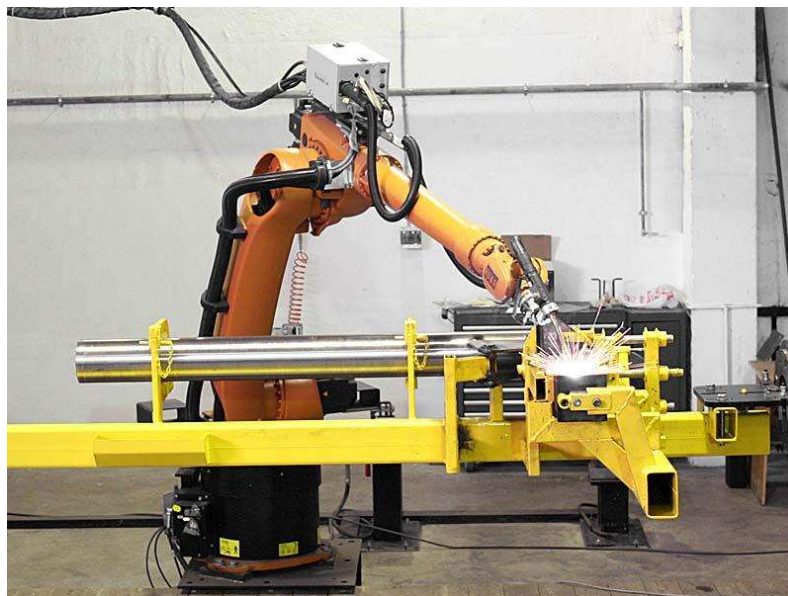


Рисунок 1.1 – Роботизований маніпулятор з кінцевим ефектором типу «паяльна лампа»

Завдання людської руки полягає в переміщенні предметів з точки А в точку Б. Завдання маніпулятора – переміщувати кінцевий ефектор з однієї позиції в іншу. Маніпулятор може бути оснащений різними типами ефекторів, що призначені для різних потреб. Один з найбільш поширених ефекторів – це спрощена версія руки, або захват, який може визначати і переносити об'єкти. Зазвичай маніпулятори мають вбудовані датчики тиску, які дозволяють контролювати силу захоплення об'єктів. Таким чином робот не ламає крихкі об'єкти, які йому необхідно захоплювати. Інші кінцеві ефектори можуть мати паяльні лампи, розпилювачі пудри або фарби, дрилі та ін.

В багатьох випадках, промислові роботи виконують циклічні операції в контрольованому середовищі. Наприклад, робот може закривати коробки, які йдуть

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

по конвеєру. Щоб запрограмувати робота виконувати цю операцію, програміст повинен описати точний порядок усіх дій. Робот записує послідовність рухів в пам'ять свого контролера та виконує цю процедуру багато разів, коли нові продукти надходять на конвеєр.

Достатньо велика кількість типів роботів працює на конвеєрах в технологічному процесі зборки автомобілей. Роботи виконуються процедури зборки більш ефективно, ніж люди, оскільки мають більшу точність. Вони завжди з достатньо високою точністю роблять отвори в одному й тому ж місці, або затягують гайки з однією і тією ж силою, незалежно від кількості попередньо відпрацьованих годин. Складальні та пакувальні роботи також мають важливе значення в різних сферах промисловості.

Збірка і програмування маніпуляторів дуже проста річ, так як вони працюють в обмеженому просторі. Але якщо ви відправите робота у світ, усе стане складніше.

Першою перешкодою є забезпечення ефективної системи мобільності. Якщо робот може пересуватися лише по слизькій землі, найкращим вибором будуть колеса або гусениці. Вони також можуть працювати на нерівній землі, якщо колеса або гусениці достатньо великі. Але здебільшого робототехніки розглядають ноги, тому що їх легше адаптувати. Створення роботів на ногах також допомагає вченим зрозуміти природне пересування. Як правило, гідравлічні або пневматичні поршні рухають ноги робота вперед і назад. Поршні кріпляться до різних частин ноги так само, як м'язи кріпляться до різних кісток. Аналогічним чином, конструктор робота має визначити правильну комбінацію поршневих рухів, що беруть участь в ходьбі і запрограмувати цю інформацію в комп'ютер робота. Багато мобільних роботів оснащено вбудованою системою балансу, яка підказує системі, коли потрібно виправити рух.

Прямоходіння – досить нестабільний спосіб переміщення, тому складно зробити так, щоб роботи оволоділи ним. Розробники часто стежать за світом тварин,

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

щоб створити стабільного крокуючого робот, особливо це стосується комах. В природі шестиногі комахи добре тримають рівновагу і адаптуються до будь-яких поверхонь.

Деякі мобільні роботи можуть мати дистанційне керування – людина говорить їм, що робити і коли. Дистанційне керування може здійснюватися за допомогою дроту, радіо або інфрачервоного сигналу. Роботи з дистанційним керуванням, яких часто називають роботами-маріонетками, підходять для роботи в небезпечних або важкодоступних середовищах, таких як глибока вода або вулканічні джерела. Деякими роботами можна лише частково керувати дистанційно. Наприклад, оператор може відправити кудись робота, а робот сам знайде дорогу назад. Мобільний робот на гусеничній платформі. Конструкція гусеничного робота показана на рис. 1.2.

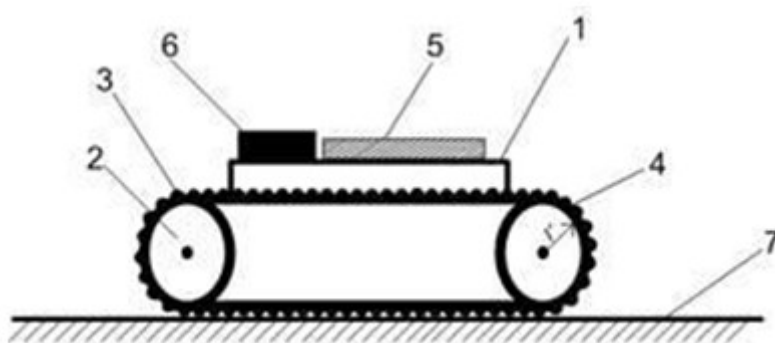


Рисунок 1.2 – Схема гусеничного робота

Гусеничний робот складається з наступних основних частин: 1 – корпус, 2 – ведучий каток, 3 – гусениця, 4 – ведений каток, 5 – система автоматичного управління електроприводами пристрою, 6 – батареї живлення, 7 – поверхня, по якій переміщується робот.

Робот переміщується за рахунок сил тертя, що виникають між опорною поверхнею (грунтом) і гусеничним рушієм робота. Ведучий каток з'єднаний за

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

допомогою редуктора з двигуном постійного струму, керованим системою автоматичного регулювання. Прослизання між провідними катками і гусеницею відсутнє, тому кутові швидкості обертання катків (ведучих і ведених) рівні [3].

Крокуючі робототехнічні системи пересування та транспортні комплекси складають окремий розділ робототехніки. Механічні ноги – педіпулятори є найбільш близькими до основних об'єктів робототехніки – маніпуляторів. Проте сфера застосування, значення, а також потенційні можливості крокуючих робототехнічних систем виходять за межі традиційної робототехніки. Спосіб пересування за допомогою ніг (ходьба, біг, стрибання), як відомо, є найбільш поширеними в живій природі. Однак в техніці він досі не отримав широкого розповсюдження через складність керування [4].

Стрімкий розвиток робототехніки обумовлює створення необхідної науково-технічної бази для реалізації цього принципово нового для техніки способу пересування, а також для розробки нового типу крокуючих транспортних засобів та машин.

Крокуючий спосіб пересування представляє великий інтерес для руху по задалегідь непідготовленій місцевості, зокрема, з перешкодами. Традиційні колісні та гусеничні транспортні засоби залишають за собою неперервну колію, витрачаючи при цьому на це значно більшу енергію, ніж у випадку пересування за допомогою кроків, коли взаємодія з ґрунтом відбувається тільки в місцях упору стопи. Крім цього, крокуючий спосіб пересування володіє дещо більшою прохідністю на пересіченій місцевості аж до можливості пересуватися стрибками з метою подолання складних перешкод тощо. В процесі крокування менше здійснюється руйнування ґрунту, що, може бути досить важливих в деяких випадках. Проте при русі по досить гладким і підготовленим поверхням цей спосіб поступається колісному або гусеничному в економічності, швидкості пересування та простоті керування.

До основних завдань систем керування крокуванням транспортних машин входять наступні:

- 1) забезпечення сталого руху по заданому маршруту з обминанням перешкод;
- 2) стабілізація положення корпусу машини в просторі на певній висоті від ґрунту незалежно від рельєфу місцевості в процесі складного руху;
- 3) сумісне керування ногами, що реалізує ходу певного типу з адаптацією до складного рельєфу місцевості.

Оскільки основним призначенням крокуючих роботів є пересування по складній пересіченій місцевості, то керування ними обов'язково має здійснюватися з певною адаптацією. В системі автоматичного керування в даному випадку виділяють три рівні керування:

- 1) перший, нижній рівень – рівень керування виконавчими приводами рухом ніг;
- 2) другий, середній рівень – рівень формування ходи, зокрема, координації складного руху ніг зі стабілізацією положення корпусу роботу в просторі;
- 3) третій, верхній рівень – рівень керування ходою, напрямком і швидкістю руху, в залежності від заданого маршруту.

Перший і другий рівні керування реалізуються в автоматичному режимі, в той час як третій рівень здійснюється автоматизовано за участю людини-оператора.

Більша кількість чотириногих тварин в процесі руху зберігає рівновагу виключно за рахунок динамічної стійкості. Проте, у випадку штучних крокуючих роботів та апаратів їх хода може бути визначена таким чином, щоб центр ваги машини постійно знаходився всередині трикутника, вершинами якого є кінцівки, які знаходяться на даний момент часу в опорному положенні. Так, авторами роботи [5]



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами розроблений крокуючий робот (рис. 1.3) з чотирма кінцівками, у яких швидкість руху в фазі відновлення підібрана таким чином, щоб тривалість цієї фази була втричі менше тривалості кожної робочої фази. В результаті в кожний момент часу в процесі руху лише одна нога робота знаходиться в повітрі, а його корпус спирається на три інші, зберігаючи тим самим статичну стійкість.

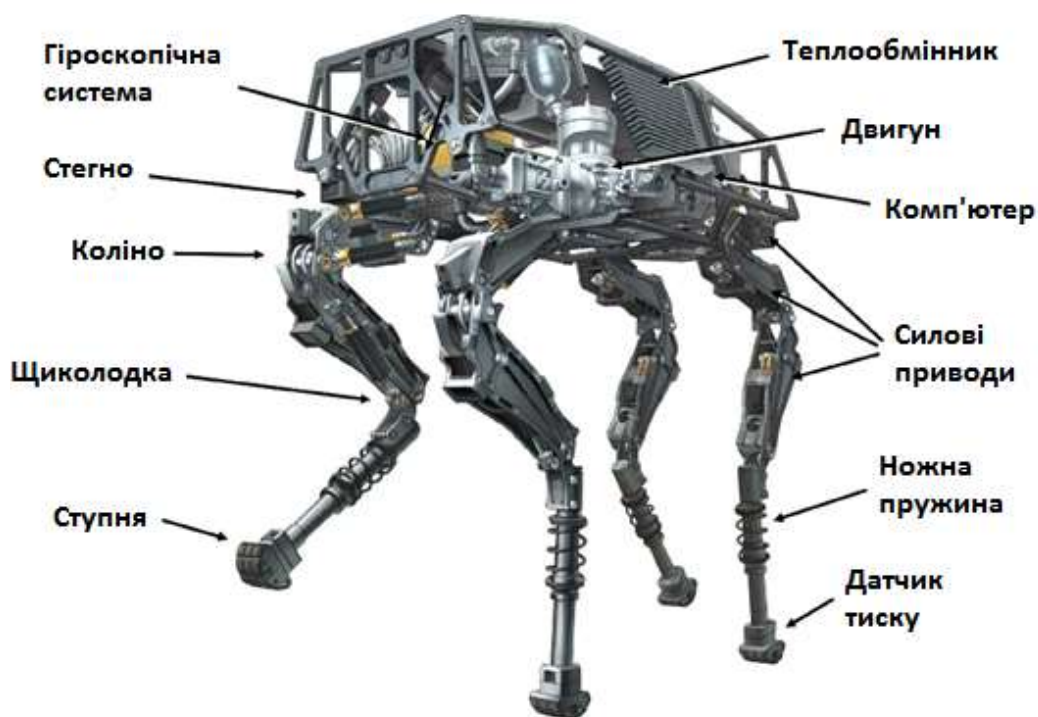


Рисунок 1.3 – Крокуючий робот з чотирма кінцівками

Шестиногі крокуючі роботи та апарати є найчисленнішою з усіх розроблених категорій механізмів, які здатні переміщуватися за допомогою штучних ніг (рис. 1.4). Популярність роботів такого типу в значній мірі обумовлена тим, що проблеми забезпечення статичної стійкості рухомих шестиногих апаратів вирішуються відносно просто в порівнянні з іншими існуючими конструкціями.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Однією з найбільш важливих проблем, якій приділяється значна увага при проектуванні мобільних крокуючих роботів та апаратів, є зменшення необхідної потужності джерел живлення, а також скорочення витрат енергії. Іншими словами, для вирішення цієї проблеми необхідно підвищувати коефіцієнт корисної дії (ККД) шестиногих механізмів, тобто зменшувати споживану потужність і підвищувати корисну потужність. При цьому, якщо врахувати, що в загальному випадку кожна з  $n$  кінцівок має дві – три ступені рухливості, та керування кожного зі ступенів пов'язане з певними витратами енергії, то очевидно, що порівняння крокуючих та колісних транспортних засобів за ККД буде далеко не на користь перших. У зв'язку з цим, головна мета, яку переслідують дослідники на сьогодні, полягає в створенні експериментальних крокуючих роботів, які здатні на практиці демонструвати поєднання високих функціональних можливостей з досить великою потужністю, що може бути досягнута при достатньо низьких витратах енергії.

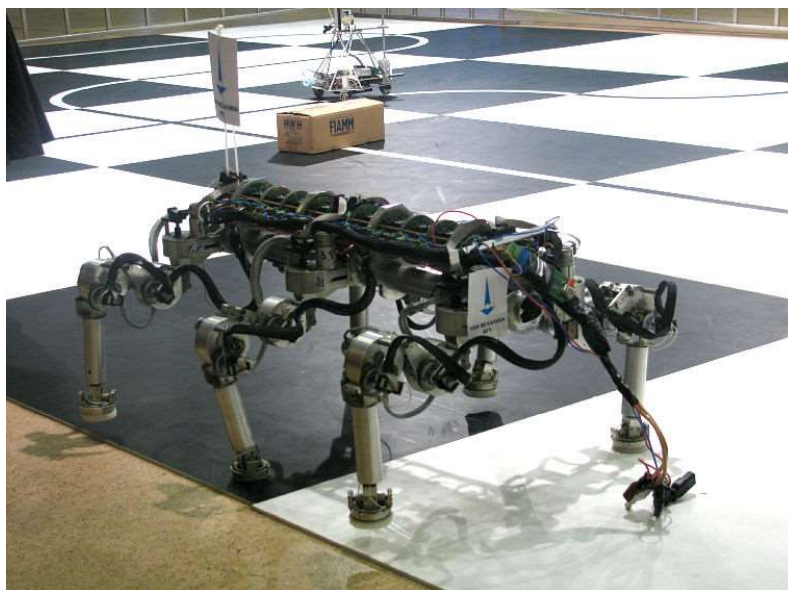


Рисунок 1.4 – Шестиногий крокуючий робот

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Система керування крокуванням шестиногого робота, кожна з кінцівок якого приводиться в рух за допомогою трьох електродвигунів (загальна кількість 18 електродвигунів), дозволяє задавати довільний зсув фаз в роботі двигунів і, таким чином, забезпечувати реалізацію ходи будь-якого типу. Очевидно, керування переміщенням крокуючого роботу повинно бути організовано таким чином, щоб при ходьбі жодна з кінцівок не створювала будь яких перешкод для інших. Найпростішим рішенням проблеми запобігання зіткнень рухомих кінцівок є принципове усунення безпосередньої можливості зіткнень шляхом встановлення меж зон досяжності кожної з ніг таким чином, щоб сусідні зони не перетиналися.

### **1.3 Особливості застосування мобільних роботів вертикального переміщення**

Мобільний робот *Abigaille*, розроблений та представлений в роботі [6], здатен переміщуватися по вертикальним і похилим поверхням за рахунок використання принципів зчеплення. Цей зразок робота-гекона є попередником апаратів, які через деякий час будуть повзати по поверхнях космічних станцій, виконуючи їх очистку, а також різні ремонтні операції (рис. 1.5).

Поверхня кінцівок даного робота покрита мільйонами сухих крихітних волокон, що на кінці мають плоскі майданчики, які є моделлю реальних волосків, що рясно покривають пальці кінцівок гекона – ящірки, що здатна пересуватися по вертикальних та абсолютно гладких поверхнях, не залишаючи при цьому ні найменшого сліду. Плоскі кінцівки мільйонів волосків вступають у взаємодію з майже будь яким матеріалом робочої поверхні і дозволяють утримати досить великий вантаж за рахунок сил молекулярного тяжіння, відомих як сили Ван-дер-Ваальса.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

В першу чергу дослідники з університету Саймона Фрезера зробили невеликого робота-гекона, вага якого складала приблизно 240 грамів. Кінцівки цього робота були покриті ворсинками зі скловолокна, що дозволяло даному роботу утримуватися та переміщуватися по вертикальних та похилих поверхнях.

«Сухий пластир», за рахунок якого робот *Abigaille* здатний переміщуватися по вертикальних поверхнях, був розроблений вченими лабораторії Центру космічних технологій ЄКА в Нідерландах. Випробування контактного матеріалу проводилися в різних умовах, де було виявлено повну придатність даного матеріалу для застосування в вакуумі, температурних змін, а також інших умовах, що можуть бути присутні у відкритому космічному просторі.

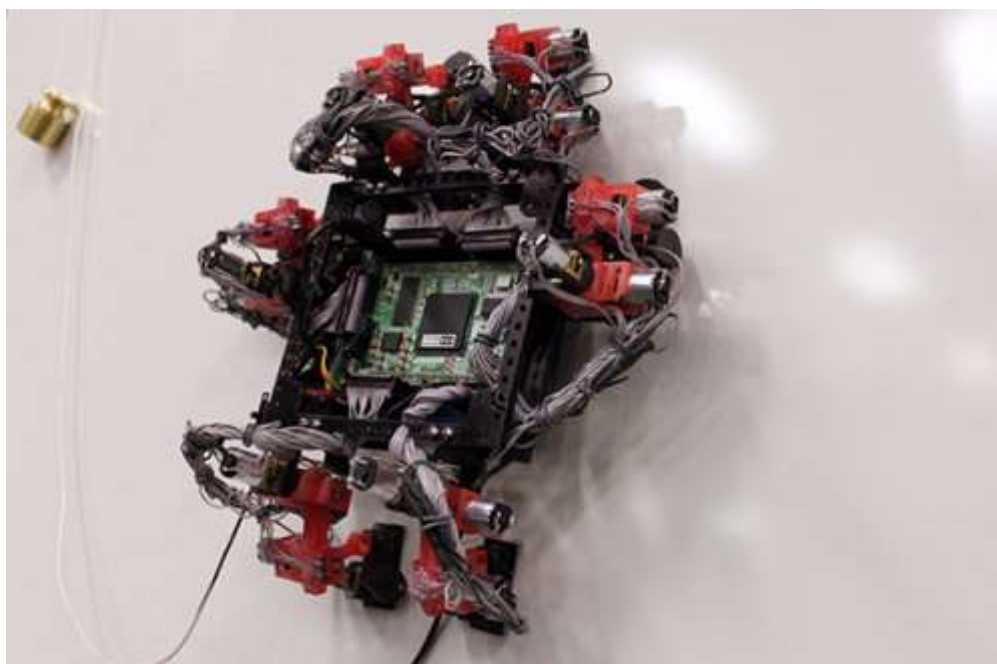


Рисунок 1.5 – Робот-гекон *Abigaille*

Відсутність у складі притискного сухого пластиру липких речовин і магнітів говорить на переваги використання цієї технології в космосі. Клейкі речовини в вакуумі досить швидко випаровуються, в той час як магніти погано утримують об'єкти

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами на поверхнях складної форми і не працюють на поверхнях з немагнітних матеріалів. Крім того, магнітне поле може негативно впливати на роботу високочутливих наукових приладів.

Застосування шести кінцівок робота *Abigaille*, кожна з яких має по чотири ступені свободи, дозволяє даному роботу не тільки підніматися та опускатися по вертикальним поверхням. Рухома система такого типу дозволяє без особливих труднощів переміщуватися з вертикальної на горизонтальну поверхню і з однієї вертикальної поверхні на іншу вертикальну, яка розташовану під кутом  $90^\circ$  до першої (рис. 1.6).

При створенні ефекту «сухого пластиру» для наведеного робота-гекона використовуються існуючі технології, що застосовані у виробництві напівпровідникових приладів та мікроелектроніки.

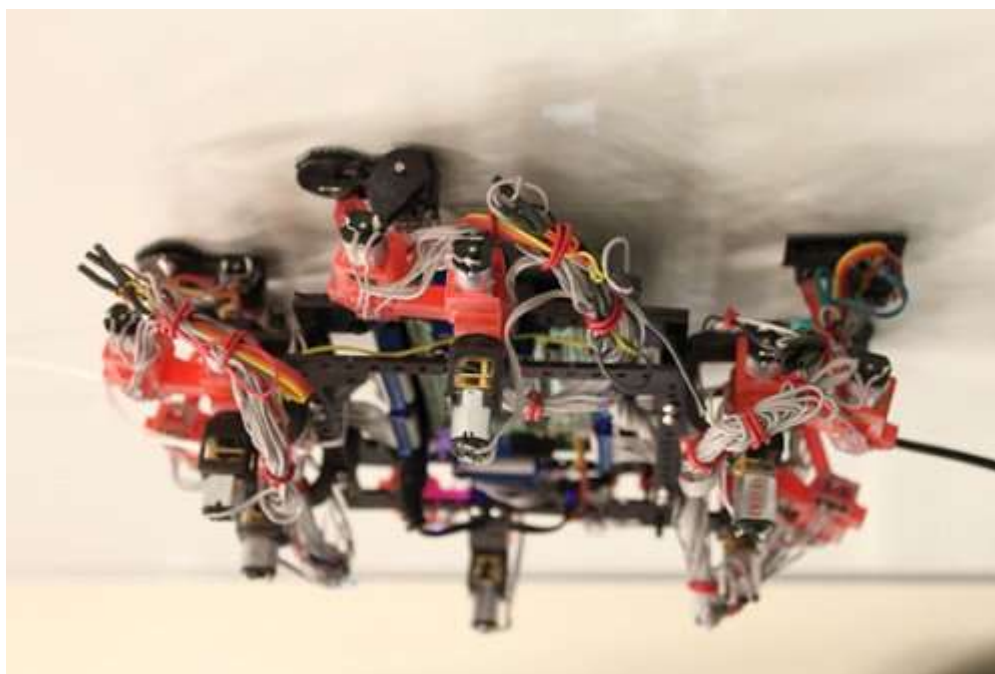


Рисунок 1.6 – Переміщення *Abigaille* по стелі

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

*VertiGo* – робот, який долає стіни та інші перешкоди [7]. Останнім часом нам вже доводилося бачити роботів, конструкція яких дозволяє їм переміщуватися, піднімаючись по вертикальним поверхням. У більшості випадків це досягається за допомогою використання вакууму, спеціальних «липких» матеріалів, структура яких скопійована з будови кінцівок гекона, або інших хитромудрих прийомів, які не дозволяють таким роботам пересуватися по поверхні землі. Однак, для можливості переміщення по горизонтальних і вертикальних поверхнях не обов'язково використовувати щось екстраординарне, для цього достатньо поєднати пару досить традиційних речей. Така ідея лягла в основу конструкції невеликого робота *VertiGo*, який здатний пересуватися як по землі, так і по вертикальним поверхням (рис. 1.7). При цьому, йому не потрібно спеціально підготовлена поверхня, він може «спритно» переміщуватися по необробленому каменю, цеглі, бетону та інших матеріалів, поверхня яких покрита горбами і тріщинами.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд робота *VertiGo*

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Робот *VertiGo* є спільною розробкою фахівців компанії *Disney Research Zurich* і Швейцарського федерального технологічного інституту (*Swiss Federal Institute of Technology, ETH*). Його основу складає рама, виготовлена з легкого вуглецевого волокна. У робота є чотири колеса, виготовлені за допомогою технологій тривимірному друку, передні два з яких можуть повертатися, подібно переднім колесам автомобілів. Здатність переміщуватися по вертикальним поверхням роботу *VertiGo* дають два пропелера, що приводяться в дію електродвигунами, встановленими на рухомий підвісці (рис. 1.8).

Після того, як робот *VertiGo* приймає вертикальне положення, його пропелери приймають розраховане процесором положення і створюваний ними потік повітря надійно притискає робота до стіни. Далі робот може кататися по цій стіні, як звичайна іграшкова машинка, і пропелери постійно змінюють свої кути нахилу для того, щоб забезпечити максимальну силу зчеплення коліс робота з вертикальною поверхнею.



Рисунок 1.8 – Переміщення по вертикальній поверхні робота *VertiGo*

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Роботи такої конструкції та з такими можливостями можуть знайти застосування в різних областях. За їх допомогою можна проводити огляд цілісності конструкцій у важкодоступних місцях будівель і споруд. Вони можуть бути використані для проведення операцій по розвідці і спостереженню, а використання більш ємних акумуляторних батарей і більш високооборотних двигунів дозволить роботам типу *VertiGo* пересуватися не тільки по вертикальним поверхням, але і по стелям «догори ногами».

На сьогодні існує багато роботів, які здатні кріпитися і пересуватися по вертикальним поверхням. Деякі з таких використовують магніти, інші – плоскі поверхні, які покриті жорсткими ворсинками, а треті – липкі склади, подібні до тих складок, які використовують гекони. Але всі подібні роботи мають єдиний спільний недолік, пов'язаний з тим, що при деяких положеннях їх корпусу або притискного пристрою і при деяких кутах нахилу поверхні, зчеплення з поверхнею стає слабким, внаслідок чого робот може просто впасти.

Дослідники з Швейцарського федерального технологічного інституту розробили нового робота з «липкими» кінцівками (рис. 1.9). Він здатен добре закріплюватися на вертикальних поверхнях, несучи вантаж, що перевищує його власну вагу в сім разів [8]. Таких роботів можна використовуватися для допомоги передовим розвідникам, для гірничо-рятувальних служб або допомагати будівельникам при зведенні висотних будівель.





Рисунок 1.9 – Робот з «липкими» кінцівками

На кінцівках робота знаходяться нагрівальні елементи, які встановлені в майданчиках його кінцівок. при нагріванні ці елементи розплавляють спеціальну полімерну композицію, яка затікає навіть у найменші тріщини та нерівності поверхні для лазіння робота (рис. 1.10). Завдяки цьому він міцно чіпляється та надійно тримається практично на будь-якій поверхні, якою б слизькою вона не здавалася. Швидке охолодження призводить до зменшення загального розміру полімерного матеріалу, що дозволяє кінцівкам робота від'єднатися від поверхні для наступного кроку.

Ця технологія використовує термопластичні «пластирі», які мають набагато сильніші адгезійні властивості, ніж інші подібні технології. Пластиковий матеріал стає м'яким і пружним при температурі 70 градусів за шкалою Цельсія. При температурі трохи вище матеріал стає майже рідким, набуваючи при цьому високу «липкість». Кожен цикл, крок робота, являє собою послідовність, що включає в себе розігрів матеріалу, прикріплення кінцівки до поверхні, невелике охолодження матеріалу, пересування і сильне охолодження, що дозволяє кінцівці відокремитися від поверхні (рис. 1.11).

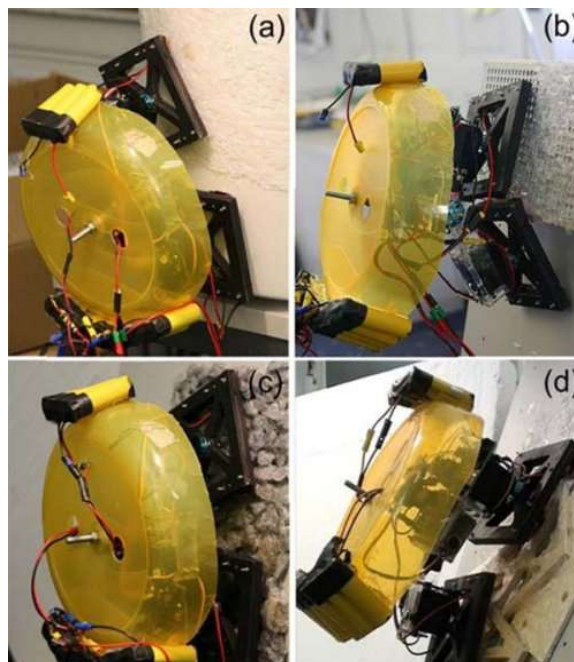


Рисунок 1.10 – Зчеплення робота з різними поверхнями

Завдяки інноваційній системі закріплення на будь-якій вертикальній поверхні, цей робот здатний пересуватися по кам'яних скелях і іншим складним поверхням, по яким не зможе піднятися жоден з роботів, які використовують інші подібні технології, такі можливості робота відкривають величезні перспективи для його використання.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

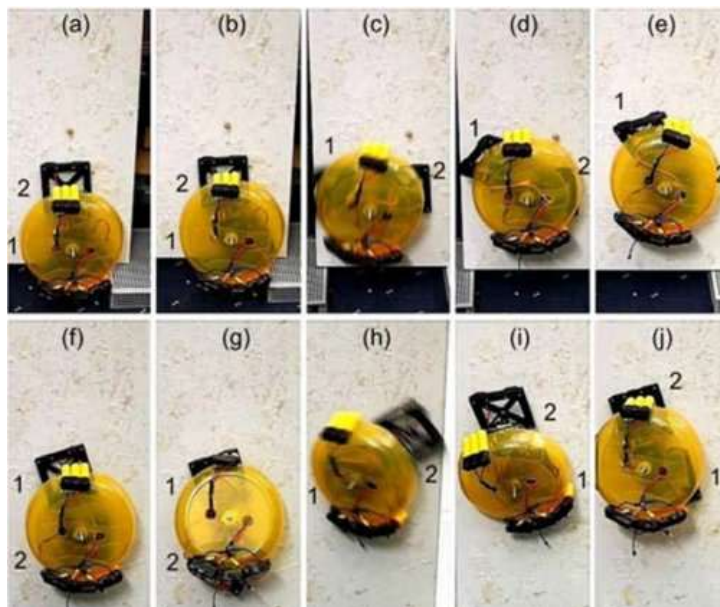


Рисунок 1.11 – Цикл переміщення робота

#### 1.4 Мобільні роботи для переміщення по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях

Робот HR-MP для структурної діагностики вітрових турбін [9]. Останнім часом популярність вітряних електростанцій продовжує зростати, у всьому світі вводяться в експлуатацію нові електростанції, включаючи сотні вітрових турбін. Різке збільшення кількості вітрових турбін, деякі з яких мають висоту приблизно 150 метрів, призвело до відповідного збільшення витрат на діагностику структурних пошкоджень, поточне технічне обслуговування та ремонт. Донедавна діагностику стану рам і лопатей вітрогенераторів проводили переважно двома методами.

Перший метод передбачає поверхневий огляд елементів конструкції турбіни за допомогою потужних високоякісних телескопів, а другий метод передбачає огляд конструкції крупним планом за допомогою промислового альпіністського обладнання. Тепер з'явився ще один метод діагностики конструкції опор і лопатей

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами турбін, компанія Helical Robotics пропонує для цього використовувати випускається ними роботів-верхолазів серії HR-MP, обладнаних камерою, іншими датчиками і працюють за допомогою дистанційного керування (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Робот-верхолаз *HR-MP* для діагностики конструкцій турбін вітрогенераторів

Робот серії *HR-MP* виконаний на конструкції чотириколісного візка. Але за рахунок потужних неодимових магнітів, встановлених в колесах цих роботів, вони безперешкодно можуть пересуватися по вертикальним поверхням опор турбін і по складним кривим поверхням лопатей (рис. 1.13). У деяких випадках для проведення огляду конструкції не потрібно повної зупинки вітрогенератора, сила магнітів і потужність електричних приводів робота дозволяють йому утримуватися навіть на поверхні обертових лопатей, долаючи вплив відцентрових сил.

До складу серії *HR-MP* входить безліч роботів різних розмірів, що володіють, відповідно, різними можливостями. Найбільш типовим представником цієї серії, які знаходяться в середині ряду, є робот *HR-MP20*. Цей робот важить 19 кілограм, може переносити на собі до 10 кілограм корисного вантажу в якості якого можуть виступати

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами додаткові камери, магнітні, ультразвукові та інші типи датчиків для діагностики прихованих дефектів і тріщин в металі конструкцій турбін. П'ять неодимових магнітів дозволяють роботів утримуватися на плоских і кривих поверхнях, що мають радіус кривизни до 1.2 метра. За допомогою дистанційного керування робот може рухатися в будь-якому напрямку, обраному оператором з максимальною швидкістю 13.3 метри за хвилину, а незалежні приводи для кожного колеса забезпечують роботу високу маневреність.



Рисунок 1.13 – Робот-верхолаз *HR-MP* при виконанні роботи

## Висновки до розділу 1

В даному розділі розглянуто області застосування різнотипних мобільних та промислових роботів. Визначено основні принципи їх дії, відмінності конструкції та сфери експлуатації.

Крім того, детально проаналізовані принципи реалізації систем керування та конструкцій різнотипних багатоцільових роботів вертикального переміщення, а саме: твариноподібних; оснащених пропелерами, липкими кінцівками та неодимовими магнітами. Зазначено основні недоліки та переваги кожного методу реалізації

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами наведених роботів. В результаті аналізу магнітні та магнітокеровані притискні пристрої визначені як найбільш ефективні для реалізації переміщень по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

Зважаючи на характер робочих поверхонь та особливості виконуваних технологічних операцій, доцільно розробити високоефективну систему автоматичного керування переміщенням мобільного роботу багатоцільового призначення для підвищення його енергоефективності, надійності та економічних показників переміщення при відпрацюванні складних просторових траєкторій.

Сучасні дослідження, що проводяться в різних країнах світу, показують, що для багатьох нелінійних та нестационарних об'єктів керування, до яких відноситься і наведений мобільний робот, доцільно використовувати нечіткі системи автоматичного керування. Крім того, структурно-параметрична оптимізація нечітких систем керування складними технічними об'єктами дозволяє значно розширити перспективу їх ефективного застосування. Особливої уваги при цьому заслуговує розробка належних баз правил.

Таким чином, для досягнення поставленої мети в даній магістерській атестаційній роботі потрібно розв'язати наступні задачі:

- аналіз особливостей та характеристик сучасних систем автоматичного керування мобільними роботами різного призначення;
- аналіз та узагальнення сучасних методів синтезу та оптимізації нечітких систем керування;
- розробка методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами різного призначення;
- розробка програмних засобів реалізації методики синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами різного призначення;

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

- розробка нечіткого регулятора Мамдані-типу для системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення із застосуванням методики синтезу та оптимізації бази правил;
- дослідження ефективності та аналіз показників якості системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення.

## 2 МЕТОДИ СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

### 2.1 Розвиток та перспективи застосування нечітких систем керування

У 1965 р з моменту публікації роботи L.A. Zadeh стартувала фази теорія, завдяки якій з'явилася можливість спілкування людини з комп'ютером природною мовою і одночасно, відкрилися перспективи користування якісною інформацією в управлінні технічними об'єктами [10]. Ця ж теорія послужила інструментом для розвитку більшості сфер людських знань. Знаменно, що перші практичні результати були отримані в теплоенергетиці. Це трапилося в 1974, коли доктор Mamdani E.H. з Лондонського Університету застосував фази теорію при автоматизації парового котла та турбіни [11].

В 1980 році Smidth F.L. з Данії використовував фази алгоритм при автоматизації цементної печі. В даний час відзначено більш 600 випадків застосування фази-управління в промисловості, які в основному сконцентровані в Японії [12]. У цій країні до кінця 1985р фази-технологія увійшла в побут. На основі фази-мікропроцесорів і спеціальних фази-датчиків налагоджено виробництво повністю автоматизованих пральних машин і пилососів. Рекордним став 1988 рік, коли було продано більше 4.5 млн. пральних машин і більш ніж 5.5 млн. пилососів [12]. Зовсім недавно вийшов збірник праць присвячених застосуванню фази-управління на електричних станціях [13]. Всі ці факти є гарною прикметою для більш уважного вивчення і застосування фази-технології на практиці. У світовій практиці існує велика різноманітність нечітких контролерів. Число способів їх реалізації давно перевищила цифру 100, але розробка нових методів і нових типів фази-контролерів триває.

Властивості нечіткої логіки обробляти неповну інформацію, моделювати людські знання і видавати обґрунтовані рішення припускають її інтенсивне



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

використання для спостереження в реальному часі за технологічними процесами, а також вирішення проблем, пов'язаних з практичною реалізацією систем управління технологічними процесами [14].

Застосування теорії нечіткої логіки в системах управління дозволяє зменшити втручання оператора в процес управління і, отже, дозволяє розробити нові методики управління, більш адаптовані до промислового середовища. Регулятори, які синтезовані на базі нечіткої логіки, в багатьох випадках мають більш високі показники якості керування у порівнянні з класичними лінійними регуляторами. Крім того, при застосуванні методів синтезу нечітких керуючих пристроїв, можна виконувати оптимізацію складних контурів управління без здійснення детальних математичних досліджень.

Поняття “fuzzy-logic” (у перекладі з англійської – нечітка логіка) введено американським математиком Л.А. Заді (L.A.Zadeh), що запропонував теорію нечіткої логіки та нечітких множин, на основі якої можна побудувати нечіткі аналоги всіх математичних понять і створити необхідний формальний апарат для моделювання людських міркувань і людського способу рішення задач.

Теорія нечітких множин має справу з «людськими знаннями», що прийнято називати експертною інформацією. Нечітке керування безпосередньо застосовує знання експертів для генерування керувальних впливів на об'єкт керування. Інформація про взаємодію нечіткого регулятора з об'єктом (процесом) керування представляються у виді правил типу: ЯКЩО (антецедент), ТО (консеквент). Правила такого виду характеризують найпростіші форми людських взаємодій. При цьому аналізовані параметри розглядаються в якості лінгвістичних перемінних, котрі оцінюються якісними термами.

У теорії нечітких множин центральну роль грають поняття лінгвістична змінна, лінгвістична величина і функція приналежності (ФП)  $\mu_T(x)$ . Функція  $\mu_T(x)$  визначає

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

ступінь приналежності елемента  $x$  (лінгвістичної змінної) до нечіткої множини (терму)  $T$  в формі чисельного значення в діапазоні  $\{0,1\}$ . Нечітка множина цілком описується своєю функцією приналежності. Наприклад, представляючи лінгвістичні величини «від'ємна», «додатна», «велика», «мала» лінгвістичної змінної «похибка» за допомогою їхніх функцій належності, окреслюють діапазони зміни фізичної величини – помилки керування системи автоматичного керування. Функції приналежності лінгвістичних величин, як правило, перекривають одна одну, тому для однієї і тієї ж лінгвістичної змінної дані функції можуть повідомляти різні "ступені істинності" лінгвістичних величин, що відрізняються від нуля [15].

Переклад поточних значень вхідних змінних нечіткого регулятора в лінгвістичні величини істинності називають процедурою фазифікації. У нечіткому регуляторі на основі сформованих правил (бази правил) типу ЯКЩО-ТО, здійснюється генерація логічного рішення. Одержання керуючого впливу на виході нечіткого регулятора у виді нечіткої множини у формі результуючої функції приналежності і процедуру генерування вихідної величини нечіткого регулятора (керуючого впливу на об'єкт керування) називають дефазифікацією.

В наш час спостерігається інтенсивний розвиток і практичне застосування нечітких систем для керування та автоматичного регулювання багатьох технічних об'єктів.

Достоїнства нечіткої логіки, що явно виявляються в нечіткому керуванні, полягають насамперед у тому, що нечітка логіка дозволяє адекватно представити мислення людини, а саме способи її прийняття рішень та моделювання складних об'єктів засобами природної мови.

У ході ухвалення рішення людина легко опановує ситуацію, розділяючи її на події, знаходить рішення в складних ситуаціях шляхом застосування для окремих подій відповідних правил ухвалення рішення, на підставі минулого досвіду наділяє

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

об'єкт певними ознаками і приходять до загального рішення. Рішення приймається не на основі уніфікованих кількісних критеріїв, а з використанням великого числа критеріїв, що нерідко суперечать один одному [10]. У випадку неповної інформації можлива допомога в ухваленні рішення з використанням висновків. У нечіткє керування вводяться подібні методи прийняття рішень, властиві людині, у формі розподілених по окремих станам і цілям правил керування і нечітких висновків. Отримана модель не є уніфікованою: вона або описує властивості фрагментів об'єкта, або є набором декількох локальних моделей, поставлених у визначені умови. Самі локальні моделі не використовують числових значень. Володіючи деякою спільністю, вони прості для розуміння на якісному рівні. При нечіткому керуванні за цим зразком створюють модель дій оператора за допомогою висловлень типу ЯКЩО-ТО, використовуючи звичайні слова і слова ці нечіткі. Замість того щоб вибудовувати ланцюжок числових значень, проводять нечіткі границі типу «малий», «середній», «великий» тощо. Завдяки застосуванню нечітких слів можна легко представити випадки з неповними даними.

Можна виявити три особливості нечіткого керування [16]. Перша полягає в тім, що правила нечіткого керування, будучи умовними висловленнями типу ЯКЩО-ТО є логічними. Використання правил здійснюється через механізм логічних висновків. Логічне керування означає, що логіку керування експерта легко представити, і різноманітним передумовам можна поставити у відповідність деяку дію. Для реального устаткування це не тільки використання при керуванні повної інформації на відміну від класичної теорії керування, але і зміна режимів керування в залежності від умов, наприклад, часу і значень параметрів. У багатьох видах реального обладнання необхідно уділяти особу увагу різним режимам роботи, наприклад процедурі запуску. В цьому випадку для автоматизації зручно використовувати

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

нечітке управління, оскільки можна описувати правила в формі ЯКЩО-ТО однаковим способом і для режиму запуску, і для режиму нормальної роботи.

Друга особливість – паралельне керування. Самі нечіткі методи управління різні. Традиційні методи керування – це або класичні, або сучасні методи, в яких узагальнене правило керування представляється за допомогою однієї формули, у той час як при нечіткому керуванні використовується велике число часток правил. Кожне правило діє у визначеній області інформаційного простору, використовуваного при керуванні. Для кожної локальної області розподіленого інформаційного простору доцільно створювати окремі правила керування. Крім того, якщо є багато регульованих величин, для кожної з них можна створити окремі правила керування. Аналогічно, якщо є багато цілей керування, для кожної з них бажано створювати правила керування. Класичне керування істотно обмежувало теоретично можливі різновиди цілей у зв'язку з необхідністю представляти цілі узагальненою функцією. При нечіткому керуванні необхідність у цільових функціях і в рішенні задач оптимального керування відпадає, тому можна успішно справлятися з усім різноманіттям цілей і навіть із взаємно суперечливими цілями.

Третя особливість нечіткого керування полягає в тому, що з'являється можливість організувати керування у формі діалогу з оператором, оскільки правила керування записуються словами у виді виразів ЯКЩО-ТО.

Вихідною передумовою до формування системи керування на базі теорії нечітких множин є те, що стан складної системи керування та її керуючі впливи розглядаються як лінгвістичні змінні, що оцінюються якісними термами (засобами природної мови). Кожен терм при цьому представлений у вигляді нечіткої множини і формалізується за допомогою певної функції належності. Формування керуючого впливу здійснюється за допомогою певного набору правил, що встановлюють зв'язок між станом динамічної системи і керуючим впливом засобами природної мови.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Визначення конкретного значення керуючого впливу здійснюється шляхом реалізації процедури переходу від результуючої функції приналежності, що описує лінгвістичну змінну керуючого впливу, до конкретного числового значення [10]. У результаті неточність (нечіткість) опису динамічного поведіння об'єкта компенсується більш високим за рівнем алгоритмом керування з урахуванням, у тому числі, і якісних ознак динаміки об'єкта керування [17].

Очевидно, що для реалізації керування на базі теорії нечітких множин і нечіткої логіки необхідний пристрій, що формує керуючі впливи на об'єкт керування - нечіткий регулятор.

## **2.2 Існуючі методи синтезу та оптимізації нечітких систем керування**

Аналіз проблем структурно-параметричної оптимізації керуючих пристроїв нечітких систем керування доцільно здійснювати, насамперед, на основі визначення класу систем керування, основними елементами яких виступають нечіткі керуючі пристрої.

Встановлення адекватності математичних моделей реальним об'єктам управління в більшості випадків носить умовний характер [18]. Ступінь адекватності моделей залежить від природи об'єктів управління, складності процесів, що в них протікають, наявності взаємовпливу між каналами, схильності до збурюючих впливів, кількісна оцінка яких ускладнена або неможлива та ін. [19]. Відсутність адекватної математичної моделі об'єктів управління, що функціонують в умовах невизначеності, не дозволяє забезпечити достатньо високу ефективність систем управління на базі традиційних регуляторів (наприклад, з реалізацією П-, ПІ-, або ПІД- законів управління) [20]. Аналогічні проблеми виникають при розробці систем управління нестационарними об'єктами зі змінними параметрами або структурою.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Результати наукових досліджень, що проводяться в різних країнах, показують, що для багатьох об'єктів з невизначеностями доцільним є застосування нечітких систем автоматичного управління або систем управління з нечіткими керуючими пристроями (фазі-контролерами) [21, 22].

На даний момент зусиллями українських та іноземних вчених вже вирішено ряд завдань, пов'язаних з теоретичним обґрунтуванням застосування нечіткої логіки для завдань управління, методами аналізу та синтезу нечітких керувальних пристроїв і систем управління на їх основі, апаратною реалізацією нечітких контролерів для систем реального часу. Водночас, відсутня узагальнена методика вибору методів обчислення нечітких логічних операцій, форм і параметрів функцій приналежності, методів дефазифікації, формування та оптимізації баз лінгвістичних правил і т.д. при проектуванні нечітких керувальних пристроїв.

Запропонована професором Лотфі Заде [10] теорія нечітких множин і нечіткої логіки відкрила ряд нових шляхів і можливостей для розробки систем управління нестационарними об'єктами і об'єктами з невизначеностями [23]. Спочатку використання теорії нечіткої логіки та нечітких множин обмежувалося завданнями формалізації міркувань і лінгвістичних тверджень для побудови експертних систем та інтелектуальних інформаційних систем, моделюючих прийняття рішень людиною-оператором [24]. Наступним кроком у розвитку теорії нечіткої логіки стало її застосування для синтезу різних елементів і пристроїв систем автоматичного управління, в тому числі, керуючих пристроїв, ідентифікаторів, спостерігачів і т.п. [25, 26]. Важливими етапами на цьому шляху є роботи М. Мамдані [11, 27], в яких запропонована концепція нечіткого логічного висновку на основі продукційної бази лінгвістичних правил, і спільна робота японських учених Т. Такагі та М. Сугено [28], в якій ідея М. Мамдані була модифікована шляхом використання імпульсних функцій приналежності для формування керуючого сигналу.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Як у нечітких керуючих пристроях Мамдані-, так і Такагі-Сугено-типу, формування керуючого сигналу здійснюється шляхом послідовної обробки нечіткої інформації відповідно до етапів фазифікації, агрегації, акумуляції, активації і дефазифікації [29].

Етап фазифікації полягає у відображенні миттєвих значень якісних (лінгвістичних) і кількісних вхідних сигналів на нечіткі терм-множини, сформовані шляхом формалізації знань людини-оператора, що становлять характеристичні доданки для оцінювання вхідної чи вихідної координати регулятора [10]. При цьому основним завданням цифрових пристроїв, що забезпечують обробку нечіткої інформації на етапі фазифікації, є формування функціональних залежностей  $\mu(x)$ , відповідно до обраної на етапі проектування нечітких контролерів формою функцій приналежності нечітких множин вхідних сигналів. Так, наприклад, трикутна форма функцій приналежності описується таким аналітичним виразом:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < x_1; \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & \text{при } x_1 \leq x < x_2; \\ \frac{x - x_3}{x_2 - x_1}, & \text{при } x_2 \leq x < x_3; \\ 0, & \text{при } x > x_3, \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $x$  – вхідний сигнал нечіткого керуючого пристрою;  $x_1, x_2, x_3$  – параметри функції приналежності. При цьому відповідний цифровий пристрій повинен містити блоки для реалізації операцій віднімання, ділення та порівняння.

На етапі агрегації для кожного з правил лінгвістичної бази обчислюється істинність нечіткого предиката в антецеденті правила і формується поточне значення відповідної складової керуючого сигналу. Обчислювальні алгоритми етапу агрегації

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

базуються на реалізації операцій перетину нечітких множин, що подаються залежно від обраного методу (Заде [10], Вернерс [30], ймовірнісного [31] та ін.) виразами виду:

$$\begin{aligned}\mu_A \cap \mu_B &= \min(\mu_A, \mu_B); \\ \mu_A \cap \mu_B &= \mu_A \cdot \mu_B; \\ \mu_A \cap \mu_B &= \gamma \cdot \min(\mu_A, \mu_B) + \frac{(1-\gamma)}{2}(\mu_A + \mu_B),\end{aligned}\tag{2.2}$$

де  $\gamma$  – ваговий коефіцієнт,  $\gamma \in [0;1]$ .

Аналізуючи перераховані вирази з погляду апаратної реалізації відповідних цифрових пристроїв із застосуванням мікропроцесорних засобів слід відзначити, що включення деяких додаткових інструкцій у систему команд мікропроцесорів (наприклад, вибір мінімального з двох чисел, що зберігаються в регістрах процесора, або пошук найбільшого елемента серед чисел, розташованих послідовно в безперервній області оперативної пам'яті процесора, тощо) могло б значно спростити розробку відповідних програм і зменшити число тактів процесора, що витрачаються на реалізацію алгоритму функціонування нечіткого керуючого пристрою.

Етап активації полягає в об'єднанні поточних нечітких логічних значень тих правил, консеквент яких ґрунтується на одному і тому ж термі керуючого сигналу. Для об'єднання часткових висновків використовується нечітка логічна операція «АБО», яка також може бути обчислена з використанням різних алгоритмів [10, 31, 32], наприклад:

$$\begin{aligned}\mu_A \cup \mu_B &= \max(\mu_A, \mu_B); \\ \mu_A \cup \mu_B &= \mu_A + \mu_B - \mu_A \cdot \mu_B; \\ \mu_A \cup \mu_B &= \gamma \cdot \max(\mu_A, \mu_B) + \frac{(1-\gamma)}{2}(\mu_A + \mu_B).\end{aligned}\tag{2.3}$$



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

На етапі акумуляції проводиться формування консолідованого нечіткого логічного виводу шляхом об'єднання нечітких множин, сформованих на етапі активації [31].

Останнім етапом нечіткого логічного висновку є етап дефазифікації, що полягає у відображенні результатів акумуляції на універсум чітких значень вихідного сигналу і забезпечує перетворення консолідованого нечіткого логічного висновку в чіткий керуючий сигнал [31].

При цьому відмінність між методами нечіткого логічного висновку Мамдані і Такагі-Сугено типів складається у формі функцій приналежності консеквентів правил, тобто лінгвістичних термів, що характеризують вихідні координати нечітких керуючих пристроїв. У випадку регуляторів Мамдані-типу лінгвістичні терми задаються незмінними в часі функціями приналежності трикутної [10], гауссової [31] або іншої форми [32]. Для визначення керуючих сигналів у разі нечіткого логічного виводу Такагі-Сугено-типу використовуються імпульсні функції приналежності, причому абсциси їх пікових значень являють собою функції миттєвих значень всіх вхідних сигналів нечіткого керуючого пристрою [28].

Керуючі пристрої на базі нечіткого логічного виводу Мамдані-типу отримали широке розповсюдження при управлінні технологічними процесами [33-35] і складними важкоформалізуємими системами [38-40], зокрема, в системах управління установками очистки води [41], промисловими робототехнічними комплексами [42], захватними механізмами [43], морськими рухомими об'єктами [44], теплоенергетичними об'єктами і комплексами [45], електроенергетичними системами [34], у системах автоматичної корекції курсу судна з урахуванням поведінки зустрічних суден [46].

У роботі [47] пропонується використання нечітких керуючих пристроїв Мамдані-типу для компенсації збурюючого впливу (морського хвилювання) при

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

розробці авторульового. Нечіткий керуючий пристрій встановлюється у місцевому зворотному зв'язку, що створює додатковий контур управління і забезпечує корекцію керуючого сигналу відповідно до збурюючого впливу.

Особливістю нечіткої системи управління біохімічними процесами у реакторі [44] є використання нечіткого адаптивного регулятора з проорокуванням керованої величини на базі вбудованої математичної моделі.

Підстроювання параметрів математичної моделі у реальному часі забезпечується пристроєм адаптивної ідентифікації параметрів, алгоритм функціонування якого заснований на методі нечіткого логічного виводу Такагі-Сугено-типу.

Процес проектування містить обов'язковий етап структурно-параметричної оптимізації нечітких управляючих пристроїв, який може здійснюватися на базі градієнтних методів [39]. У якості цільової функції при цьому використовують, наприклад, квадратичний інтегральний критерій якості управління, відхилення від заданої перехідної характеристики.

### **2.3 Особливості застосування пристроїв нечіткого логічного виводу для керування складними технічними об'єктами**

Синтез систем управління на основі нечітких керуючих пристроїв можливий на базі різних підходів, в тому числі, заснованих на реалізації принципів управління за відхиленням [47-49], за збуренням [50], принципів комбінованого [51] і адаптивного [52, 53] управління.

Структура системи при реалізації нечіткого управління по відхиленню зображена на рис. 2.1. У даному випадку нечіткий керуючий пристрій виконує функції регулятора в охопленій головним зворотним зв'язком частині системи. Завдання

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами нечіткого керуючого пристрою полягає у формуванні керуючого впливу  $u(t)$  в залежності від значення помилки системи  $\varepsilon(t) = x_{ex}(t) - x_{enx}(t)$

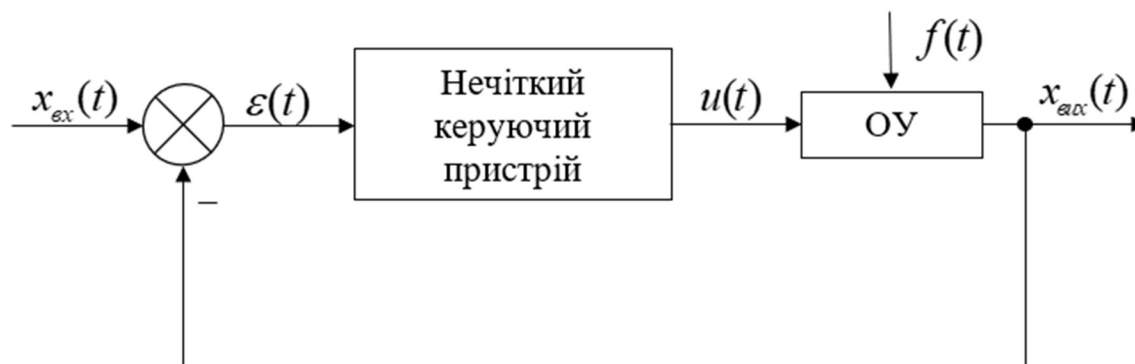


Рисунок 2.1 – Нечіткі керуючі пристрої у системах управління за відхиленням

Так як нечіткі керуючі пристрої не містять запам'ятовуючих елементів, то вони відносяться до статичних елементів систем автоматичного управління. Додання нечітким керуючим пристроям динамічних властивостей можливо за рахунок введення у множину їх вхідних сигналів  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , крім сигналу помилки системи  $\varepsilon(t)$ , також її першу похідну  $\dot{\varepsilon}(t)$ , інтеграл  $\int_0^t \varepsilon(t) dt$  та/або другу похідну  $\ddot{\varepsilon}(t)$  [20, 49].

У залежності від структури множини вхідних сигналів  $\mathbf{X}$  нечіткі керуючі пристрої класифікуються як нечіткі П-регулятори ( $\mathbf{X} = \{\varepsilon(t)\}$ ), нечіткі ІІ-регулятори  $\left( \mathbf{X} = \left\{ \varepsilon(t), \int_0^t \varepsilon(t) dt \right\} \right)$  [47], нечіткі ПД-регулятори ( $\mathbf{X} = \{\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t)\}$ ) [49] і нечіткі ПІД-регулятори  $\left( \mathbf{X} = \left\{ \varepsilon(t), \int_0^t \varepsilon(t) dt, \dot{\varepsilon}(t) \right\} \right)$  або  $\mathbf{X} = \{\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t), \ddot{\varepsilon}(t)\}$  [20].

Як і у випадку традиційних регуляторів, диференціальну складову у нечіткі закони управління вводять для збільшення швидкодії системи, а інтегральну – для збільшення точності. Комбінована нечітка система управління, що поєднує використання принципів управління за відхиленням і за збуренням, наводиться на рис. 2.2.

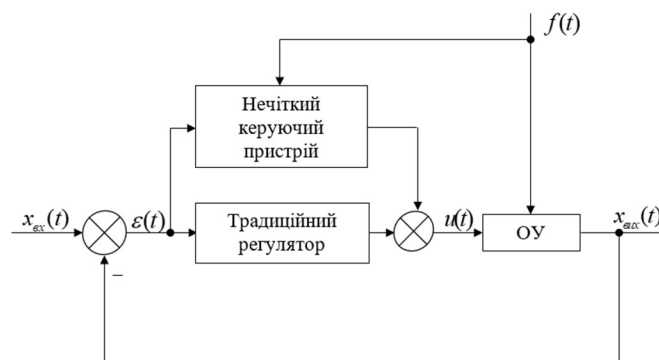


Рисунок 2.2 – Нечіткі керуючі пристрої у системах управління з компенсацією збурювального впливу

Компенсація збурювального впливу  $f(t)$  традиційними методами вимагає наявності моделей як об'єкта управління, так і фізичних процесів, що протікають у зовнішньому середовищі, які характеризуються високим ступенем адекватності. Так як отримання математичних моделей необхідної якості у багатьох випадках викликає ускладнення або неможливе, то доцільним є комбіноване використання нечітких керуючих пристроїв для компенсації збурювальних впливів і традиційних регуляторів для компенсації відхилення керованої координати. За аналогічним принципом може бути побудований керуючий пристрій, що враховує не лінійності в об'єкті управління, шляхом комбінування лінійного та нелінійного управління. Традиційний регулятор при цьому проектується для лінеаризованої моделі об'єкта управління, а нечіткий керуючий пристрій виконує роль додаткового нелінійного керуючого пристрою [54] і здійснює корекцію керуючого сигналу  $u(t)$ .

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Безумовно, на ефективність систем управління з нечіткими керуючими пристроями істотний вплив робить вибір елементної бази, алгоритмів і схемотехнічних рішень пристроїв і блоків, композиція яких становить суть нечітких регуляторів, апроксиматорів, спостерігачів та інших елементів на нечіткій логіці. При цьому особливо важливе значення має вибір алгоритмів обробки нечіткої інформації і формування сигналів у реальному часі. Використовуючи нечітку логіку можна будувати регулятори, аналогічні традиційним П-, ПІ-, ПД- і ПІД-регуляторам.

## 2.4 Основні властивості нечітких регуляторів типу Мамдані

Як вже зазначалося, основна відмінність між методами нечіткого логічного виводу Такагі-Сугено [28] і Мамдані-типу [55] полягає у структурі поточних значень кожного з правил, а також у способах дефазифікації, тобто у способах відображення консолідованого нечіткого логічного виходу на множину дійсних чисел з метою формування чіткого значення керуючого сигналу [56].

У разі нечіткого логічного виходу Мамдані-типу кожне з правил лінгвістичної бази для багатовимірною об'єкта управління має вигляд:

$$\begin{aligned}
 & IF \left( x_1^*(t) \in \mu_{i,1} \right) \cap \left( x_2^*(t) \in \mu_{i,2} \right) \cap \dots \cap \left( x_j^*(t) \in \mu_{i,j} \right) \dots \cap \left( x_n^*(t) \in \mu_{i,n} \right) \\
 & THEN \left\{ \left( y_1^*(t) \in \mu_{i,n+1} \right), \dots, \left( y_s^*(t) \in \mu_{i,n+s} \right), \dots, \left( y_q^*(t) \in \mu_{i,n+q} \right) \right\},
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

де  $\{x_1^*(t), x_2^*(t), \dots, x_n^*(t)\}$  – миттєві значення вхідних сигналів нечіткого керуючого пристрою, отримані у момент часу  $t$ ;

$i$  – номер правила,  $i \in \{1..m\}$ ;

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

$j$  – номер вхідного сигналу нечіткого керуючого пристрою,  $j \in \{1..n\}$ ;

$S$  – номер вихідного сигналу нечіткого керуючого пристрою,  $s \in \{1..q\}$ ;

$\{y_1^*(t), y_2^*(t), \dots, y_q^*(t)\}$  – значення вихідних сигналів нечіткого керуючого пристрою, що встановлюються на його виході у момент часу  $t$ ;

$\mu_{i,j}$  – лінгвістична терм-множина  $i$ -го правила для  $j$ -го вхідного сигналу;

$\mu_{i,n+s}$  – лінгвістична терм-множина  $i$ -го правила для  $s$ -го вихідного сигналу.

Виходячи з того, що для обраного методу обробки нечіткої інформації формування всіх  $q$  вихідних сигналів нечітких керуючих пристроїв проводиться за аналогічною процедурою, то надалі алгоритм обробки нечіткої інформації буде розглядатися тільки для випадку одного вихідного сигналу нечіткого керуючого пристрою, тобто для  $q = 1$ .

Формування консолідованого нечіткого логічного виводу здійснюється на етапі акумуляції шляхом об'єднання нечітких множин, сформованих на виходах кожного з правил.

Консолідований висновок бази правил, що представляє собою нечітку множину з функцією приналежності  $\mu_c(y)$  і обчислюється як продукція поточних значень кожного з правил, не може безпосередньо використовуватися як керуючий вплив. Консолідований висновок  $\mu_c(y)$  повинен бути відображений на області допустимих значень вихідного сигналу  $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$  з використанням одного з методів дефазифікації [56]. Типовий вигляд функції приналежності консолідованого нечіткого виводу  $\mu_c(y)$  і результати його дефазифікації різноманітними методами представлено на рис. 2.3.

Проведемо аналіз найбільш поширених методів дефазифікації які можуть істотно впливати на ефективність роботи нечітких керуючих пристроїв.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Метод центру ваги [31] передбачає обчислення абсциси центру мас плоскої фігури, що відсікається графіком консолідованої функції приналежності  $\mu_c(y)$  і віссю абсцис. Аналітичний вираз для дискретного випадку дефазифікації методом центру ваги має вигляд:

$$y^*(t) = \frac{\sum_{k=1}^w \mu_c(y_k) y_k}{\sum_{k=1}^w \mu_c(y_k)}, \quad (2.5)$$

де  $y_k$  – середина  $k$ -го інтервалу дискретизації функції приналежності  $\mu_c(y)$  консолідованого вихідного сигналу нечіткого керуючого пристрою,  $k \in \{1..w\}$ .

Бісекторний метод дефазифікації [31] передбачає використання в якості чіткого значення керуючого сигналу  $y^*$  абсциси вертикальної лінії, що ділить описувану функцією приналежності  $\mu_c(y)$  фігуру на дві рівні по площам частини.

$$y^* = \left\{ y \left| \int_{y_{\min}}^y \mu_c(y) dy = \int_y^{y_{\max}} \mu_c(y) dy \right. \right\}. \quad (2.6)$$

Відповідно до методу лівого максимуму серед значень  $y \in [y_0; y_1]$ , для яких ФП  $\mu_c(y)$  має максимальне значення, в якості результату дефазифікації  $y^*$  обирається ліва межа діапазону  $y^* = y_0$ . Метод правого максимуму формує вихідний сигнал як  $y^* = y_1$ , а метод середнього максимуму – у вигляді  $y^* = \frac{y_1 + y_0}{2}$ .

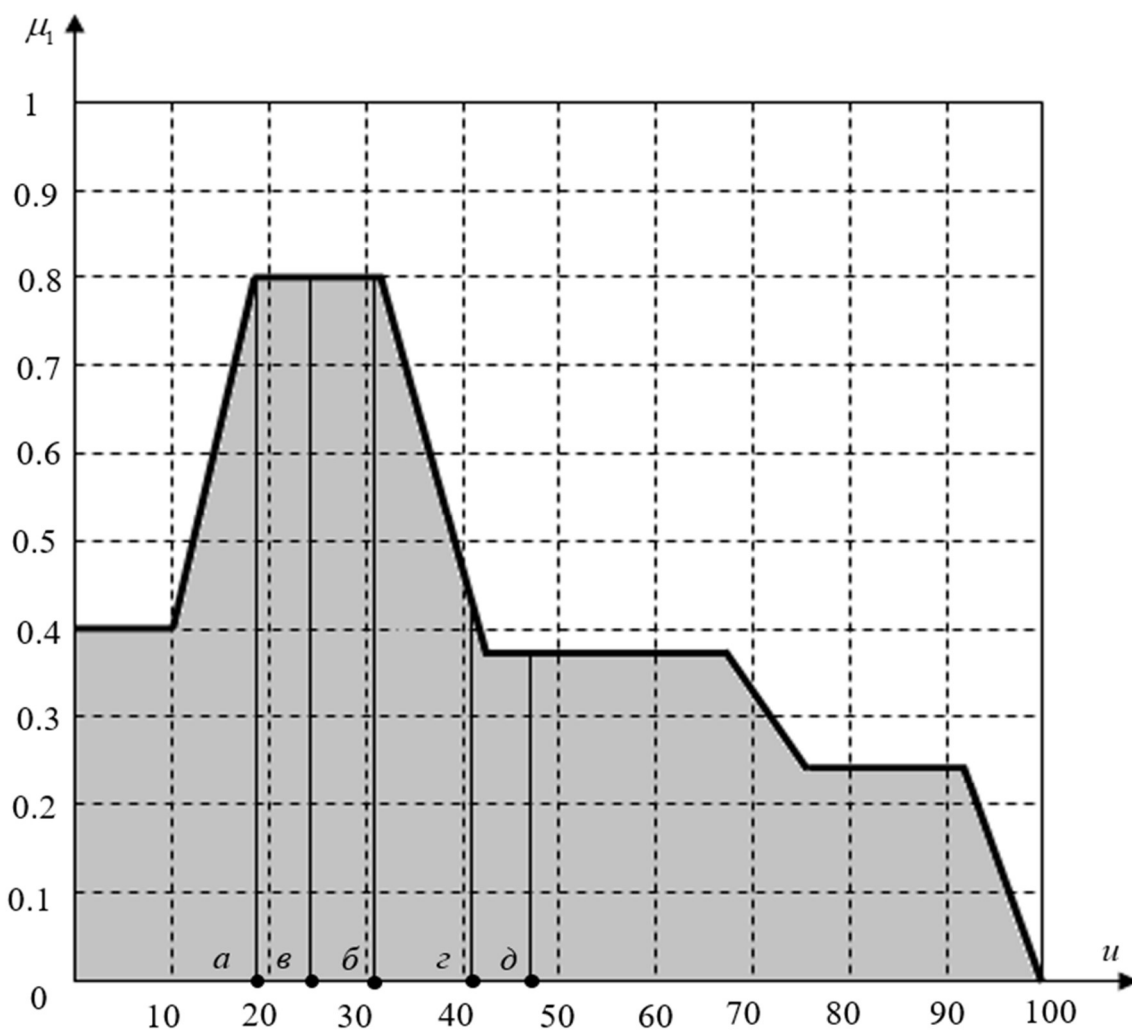


Рисунок 2.3 – Формування керуючого сигналу у нечітких пристроях на основі обробки консолідованого виводу з використанням різних методів дефазифікації:

- а) лівого максимуму; б) правого максимуму; в) середнього максимуму;
- г) бісекторний метод; д) центру ваги

Областю найбільш ефективного застосування нечітких керуючих пристроїв з логічним виводом Мамдані-типу є розробка лінгвістичних регуляторів систем управління важкоформалізуємими об'єктами або процесами, для яких у той же час накопичений значний досвід ручного або автоматизованого управління і для яких при



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

проектуванні керуючих пристроїв доступні знання і навички експерта або кваліфікованої людини-оператора.

Таким чином, при проектуванні пристроїв даного класу ефективність розроблених схемотехнічних рішень і елементів в першу чергу залежить від кваліфікації розробника і оператора (фахівця-експерта). Безумовно актуальною залишається проблема зменшення впливу суб'єктивного фактора на якість проектування елементів та пристроїв систем управління на нечіткій логіці. Обмеженням для її швидкого вирішення для об'єктів управління різного класу є складність і багатозадачність математичної формалізації окремих етапів обробки нечіткої інформації та формування сигналів, що є значним резервом для вирішення завдань структурно-параметричної оптимізації нечітких регуляторів. Такі важливі аспекти розробки як тимчасові працезатрати також залежать від ступеня структурування етапів проектування нечітких керуючих пристроїв. Отже розробка формалізованих структурно-покрокових оптимізаційних методів проектування нечітких керуючих пристроїв Мамдані-типу дозволить зменшити вплив суб'єктивних оцінок, підвищити в цілому ефективність нечітких керуючих пристроїв і розширити клас задач управління з їх ефективним застосуванням.

## **Висновки до розділу 2**

Аналіз існуючих методів синтезу та оптимізації нечітких систем автоматичного керування показав, що їх застосування дозволяє досить ефективно здійснювати розробку та проектування даних систем з метою покращення показників якості керування нестационарними та нелінійними об'єктами, в яких здобуття математичної моделі є важким процесом або неможливим.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Нечіткі керувальні пристрої з логічним висновком Мамдані-типу є досить ефективними для керування об'єктами, для яких є досвід керування досвідченими операторами, що може бути використаний для синтезу лінгвістичних термів та бази правил нечіткого регулятора.

### **3 МЕТОДИКА ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ БАЗ ПРАВИЛ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

#### **3.1 Постановка задачі синтезу бази правил нечітких систем керування мобільними роботами багатоцільового призначення**

Для успішної структурно-параметричної оптимізації нечітких систем керування та прийняття рішень необхідно мати належну базу правил, складання якої в деяких випадках за відсутності достатнього досвіду експертів та за наявності значної невизначеності може бути досить складною задачею.

Таким чином, доцільним є розробка та дослідження методики та відповідних програмних засобів синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування типу Мамдані для підвищення показників якості керування мобільними роботами багатоцільового призначення, що можуть пересуватися по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

При синтезі нечіткої системи Мамдані типу на початковому етапі обирається вектор вхідних змінних  $X$  та вихідна змінна  $Y$  [57]. При цьому вектор  $X$  в загальному вигляді можна представити наступним чином

$$X = \{X_i\}, i = \{1, \dots, n\}, \quad (3.1)$$

де  $i$  – номер вхідної змінної НС;  $n$  – загальна кількість вхідних змінних НС.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Далі проходить вибір кількості лінгвістичних термів  $m_i$  для кожної  $i$ -тої вхідної змінної вектору  $\mathbf{X}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) та лінгвістичних термів  $k$  для вихідної змінної  $Y$  нечіткої системи [58].

Крім того, заздалегідь обирають типи та параметри функцій належності лінгвістичних термінів для кожної вхідної та вихідної змінних НР. Загальна кількість правил  $s$  бази правил НС обумовлюється числом усіх імовірних комбінацій лінгвістичних термів вхідних змінних НС  $\mathbf{X}$  і розраховується як добуток кількості лінгвістичних термів усіх вхідних змінних.

В свою чергу, кожне  $r$ -те правило бази правил є лінгвістичне твердження виду

$$\begin{aligned} \text{IF } "X_1 = a" \text{ AND } "X_2 = b" \text{ AND } \dots \text{ AND } "X_i = d" \dots \\ \dots \text{ AND} \dots \text{ AND } "X_n = e" \text{ THEN } "Y = z", \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $a, b, d, e, z$  – відповідні значення лінгвістичних термів.

Консеквенти для кожного  $r$ -ого правила БП ( $r = 1, \dots, s$ ) обираються з набору можливих консеквентів правил, що складається з усіх  $k$  лінгвістичних термів вихідної змінної  $Y$  нечіткої системи.

Задача синтезу та оптимізації БП НС зводиться до знаходження такого вектору консеквентів БП  $\mathbf{R}_X$ , де значення цільової функції НС  $I$  буде оптимальним [59]. В свою чергу, вектор консеквентів БП  $\mathbf{R}_X$  в загальному вигляді можна представити наступним чином

$$\mathbf{R}_X = \{\mathbf{R}_{Xr}\}, r = \{1, \dots, s\}. \quad (3.3)$$

В багатьох випадках при синтезі БП вектор консеквентів  $\mathbf{R}_X$  встановлюється на підставі знань експертів [57, 60]. Водночас, якщо для певного вектора консеквентів БП цільова функція  $J$  не є оптимальною, то для отримання оптимального значення  $J$  виконують подальшу параметричну оптимізацію НС.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Другим способом синтезу БП НС є автоматичне формування БП, що використовується в пакеті програми “Fuzzy TECH” [58]. У цьому пакеті майстер формування правил “Rule Block Wizard” дає можливість сформувати базу правил на підставі вивчення впливу кожної вхідної змінної з вектора  $\mathbf{X}$  на вихідну змінну  $\mathbf{Y}$ . При цьому, перед експертом стоїть задача в оцінці міри впливу кожної вхідної змінної на вихідну, який може бути: «Дуже негативний», «негативний», «Зовсім ні», «Позитивний» або «Дуже позитивний» [57]. У результаті використання цієї інформації майстер формування правил програми “Fuzzy TECH” генерує БП і вектор її консеквентів  $\mathbf{R}_X$  в автоматичному режимі. Якщо значення цільової функції  $I$  не є оптимальним для згенерованої БП, то вектор її консеквентів  $\mathbf{R}_X$  може бути пізніше відкоригований експертом в ручному режимі. Крім того, для досягнення оптимального значення  $J$  у цьому випадку можна застосувати подальшу оптимізацію параметрів NS.

Дана задача являється складною задачею дискретної оптимізації, для рішення якої необхідна наявність ефективного методу. При рішенні даної задачі за допомогою повного перебору всіх можливих векторів  $\mathbf{R}_X$ , значення цільової функції  $I$  необхідно буде розрахувати  $\nu^s$  разів, що в свою чергу при невеликій розмірності БП потребує вже значних обчислювальних і тимчасових витрат [16]. В свою чергу, еволюційні методи, основані на генетичних алгоритмах являються ефективними методами глобальної оптимізації [18, 19], на основі яких доцільно вирішувати дану задачу.

### 3.2 Опис генетичних алгоритмів

Теорія генетичного пошуку включає в себе групу багатовимірних, стохастичних, метаевристичних методів оптимізації, ґрунтуються на теорії еволюції за рахунок природного відбору, запропонованої Ч. Дарвіном в [61]. Методи

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

генетичного пошуку розроблені в результаті узагальнення та моделювання в технічних системах таких характеристик живої природи, як природний відбір, адаптованість до зміни середовищних умов, спадковість нащадками життєво необхідних властивостей від батьків і т. д.

Формально методи генетичного пошуку можуть бути описані у вигляді наступної функції [61]:

$$GM = GM(P_0, N, L, f, \Omega, \Psi, \Theta, T), \quad (3.4)$$

де  $P_0 = \{H_1^0, H_2^0, \dots, H_N^0\}$  – початкова популяція – множина рішень розглянутої задачі, які представлені у вигляді особин (хромосом);  $H_j^0 = \{h_{1j}^0, h_{2j}^0, \dots, h_{Lj}^0\}$  –  $j$ -та хромосома популяції  $P_0$  – набір значень незалежних змінних, репрезентованих у вигляді генів;  $h_{ij}^0$  –  $i$ -ий ген  $j$ -ої хромосоми популяції  $P_0$  – значення  $i$ -го оптимізованого параметру вирішуваної задачі, що входить в  $j$ -те рішення;  $N$  – кількість особин (хромосом) в популяції;  $L$  – довжина хромосом (кількість генів);  $f$  – цільова функція (фітнес-функція, функція пристосованості);  $\Omega$  – оператор відбору;  $\Psi$  – оператор схрещування;  $\Theta$  – оператор мутації;  $T$  – критерії зупинення.

З погляду систем обробки інформації генетичні методи пошуку є методами знаходження рішення задачі оптимізації [61]. В даному випадку такі методи ітераційного пошуку адаптуються до особливостей цільової функції: нові хромосоми, що з'являються в процесі схрещування, відбору та мутації, досліджують все більш широкі області простору пошуку і переважно рухаються до точки оптимуму. Відносно рідкісні процедури мутації перешкоджають виродженню генофонду популяції, що відповідає безперервному пошуку оптимуму у решті інших областей пошукового простору.

Таким чином, на кожній ітерації генетичні методи працюють не з єдиним рішенням, а із множиною рішень, що представлена сукупністю особин, за рахунок чого здійснюється паралельний пошук екстремуму. При цьому кожна отримана множина рішень на наступній ітерації залежить лише від попередньої множини  $i$ , в багатьох випадках, повинна бути кращою за попередню [61].

Оскільки генетичні методи оптимізації в процесі пошуку використовують певне кодування шуканих властивостей, то їх можна досить ефективно використовувати для розв'язання задач дискретної оптимізації, що визначаються на числових множинах і на скінченних множинах довільної природи.

Для ефективного функціонування генетичних методів в якості інформації про досліджувану функцію, що піддається оптимізації, використовуються певні значення даної функції в точках простору пошуку без додаткових обчислень похідних та інших її характеристик. Тому ці методи можна застосувати до досить широкого кола функцій, особливо до таких, які не мають точного аналітичного опису. Методи генетичної оптимізації є достатньо гнучкими та можуть бути застосовані до широкого класу задач [61].

Генетичні методи мають такі переваги проти класичних методів локального пошуку:

- відсутність необхідності в специфічних знаннях про задачу, що оптимізується. У випадках, коли присутня додаткова інформація про систему, об'єкт або процес, що досліджується, то вона може бути досить ефективно використана в процесі оптимізації;

- проста реалізація;

- можливість розпаралелювання обчислень та їх здійснення на декількох ЕОМ;

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

- не критичність до виду властивостей досліджуваних систем, можливість застосування експертної інформації про об'єкт (яка може бути подана різними типами даних);
- застосування генетичних методів до широкого класу задач без серйозних змін у структуру даних методів;
- можливість адаптивності регульованих параметрів генетичних алгоритмів до певних особливостей розглянутої задачі;
- досить малий шанс попадання і зациклення в локальних екстремумах простору пошуку, що може бути досягнуто за допомогою популяційного підходу;
- можливість застосування в генетичних алгоритмах додаткових процедур пошуку.

Також генетичні методи мають певні недоліки:

- висока ітеративність обчислень;
- суттєва залежність швидкості збіжності генетичного пошуку від його налагоджуваних параметрів
- епістазис, що є внутрішньою залежністю між генами хромосом. Якщо гени слабо пов'язані між собою, тоді епістазис незначний або зовсім не існує. В інших випадках епістазис може створювати значні проблеми для пошуку, які спричинені тим, що при схрещуванні ланцюги взаємозалежних генів руйнуються. Це призводить до появи досить низько пристосованих нащадків у поколінні. Вирішення проблеми епістазису полягає в зберіганні взаємозалежних генів в хромосомі, коли розташовує їх один до одного. Також, при групуванні взаємозалежних генів суттєво знижується вірогідність їх руйнування при схрещуванні;
- передчасна збіжність, яка пов'язана з низькою різноманітністю особин в популяції. Однією з поширених причин такої дострокової подібності є недостатній



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

(малий) розмір популяції. Отже для вирішення такої проблеми хромосоми в популяції можуть бути збільшені.

Враховуючи вищенаведені властивості, переваги та недоліки генетичних методів оптимізації, можна сформулювати наступні рекомендації з вибору параметрів методу при розв'язанні певних задач:

- якщо пошуковий простір є досить малим та дискретним, то доцільно застосувати метод повного перебору, який безумовно впорається із завданням краще. На відміну від повного перебору, генетичний алгоритм може з вищою вірогідністю знайти певний локальний екстремум, а не глобальний. Проте, метод генетичного пошуку раніше відшукає субоптимальне рішення, яке, як правило знаходиться недалеко від глобального оптимуму;

- якщо цільова функція є гладкою та унімодальною, то в багатьох випадках будь-який градієнтний метод буде більш ефективним, ніж генетичний метод;

- за умови, що про простір пошуку є в наявності певна додаткова інформація, то методи пошуку, які застосовують апріорні відомості про пошуковий простір, в багатьох випадках будуть більш ефективними ніж будь-який універсальний метод;

- при достатньо складній формі цільової функції методи оптимізації, що оперують із єдиним рішенням на кожній ітерації (наприклад, класичні методи), можуть зациклюватися в локальних екстремумах. При цьому, генетичні алгоритми оперують набором із багатьох рішень, отже вони мають значно менше шансів збігатися до локального рішення і досить надійно можуть функціонувати на мультимодальних поверхнях пошуку.

Сутність генетичного метода полягає в циклічній заміні попередньої популяції наступною, що є в більшості випадках більш пристосованою. Отже, популяція особин в генетичних алгоритмах існує і в просторі і в часі. Водночас доволі нерідко

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

вважається, що вся популяція складається як і в просторі, так і в часі з певних дискретних поколінь  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_T$  [61].

Покоління  $P_{t+1}$  – це сукупність хромосом, батьки яких належать поколінню  $P_t$ . В свою чергу, покоління  $P_0$  є початковою популяцією. Процес формування початкового покоління  $P_0$  зветься ініціалізацією. Всяке наступне покоління популяції є наслідком циклу роботи генетичного алгоритму.

Кожна хромосома, що представлена певною точкою в просторі пошуку оцінюється певною мірою її пристосованості у відповідності до того, наскільки є ефективним знайдене відповідне їй рішення розв’язуваної задачі. Пристосованість для кожної з хромосом визначається як обчислене значення цільової функції (фітнес-функції). Встановлені правила відбору працюють таким чином, щоб залишити лише ті прийнятні точки-рішення, де досягається оптимум фітнес-функції. Найбільш пристосовані особини мають змогу відтворювати нащадків за рахунок операцій перехресного схрещування. В результаті з’являються нові особини, які поєднують в собі певні характеристики, що успадковуються ними від їх батьків. Найменш адаптовані особини з достатньо малою вірогідністю мають можливість відтворити нащадків, після чого їх властивості поступово зникають з особин в популяції в процесі так званої еволюції популяції.

Таким чином, від покоління до покоління, властивості поширюються по всій популяції. Комбінація таких властивостей від різних хромосом-батьків інколи призводить до появи супер пристосованої хромосоми-нащадка (особини-мутанта), пристосованість якої значно перевищує пристосованість будь-якого з його батьків. Схрещування особин з найвищою пристосованістю призводить до того, що виконуються дослідження найбільш перспективних з точки зору ефективності ділянок пошукового простору. В решті решт, досліджувана популяція буде збігатися до оптимального рішення розглянутої задачі [61].

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Після проведення процедури схрещування інколи можуть здійснюватися мутації, що є спонтанними змінами в генах, які випадковим чином знаходять випадкові точки у всій множині пошуку.

Процес збіжності методу до оптимального розв'язання задачі за допомогою підбору має бути вираженішим, порівнюючи з розподілом точок завдяки мутації та інвертування, в протилежному випадку збіжність до екстремумів не бути мати місця. Збіжність за рахунок селекції не повинна бути занадто стрімкою, адже всі точки-рішення можуть зібратися біля одного локального екстремуму, а другий, який може бути глобальним, так і не вдасться знайти.

Коли рішення-нащадки будет отримано за допомогою операцій схрещування та мутації розмір популяції відповідно збільшується. Для здійснення подальших перетворень кількість хромосом поточної популяції доцільно зменшувати до первинного заданого розміру.

Подальше функціонування генетичного алгоритму є ітераційним процесом почергового застосування генетичних операторів до хромосом наступного покоління. Генетичні оператори потрібні для того, щоб використовувати принципи спадковості та мінливості до нинішньої популяції. Такі оператори мають властивість вірогідності, тобто їх не обов'язково застосовувати до всіх особин популяції, що додає елемент невизначеності в процедуру пошуку оптимального рішення. Невизначеність в даному випадку допомагає боротися з зацикленням у локальних екстремумах в процесі роботи генетичного алгоритму [61].

Структурну схему роботи узагальненого генетичного алгоритму представлено на рис. 3.1.

Таким чином, в процесі реалізації генетичних алгоритмів необхідно:

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

- визначити параметри, що піддаються оптимізації, залежно від розв’язуваної задачі оптимізації, обрати певний спосіб кодування (подання параметрів у хромосомі) оптимізованих параметрів;
- задати фітнес-функцію;
- визначити правила ініціалізації початкової популяції;
- обрати оператори селекції, кросоверу та мутації, а також задати їх параметри;
- розрахувати значення фітнес-функції;
- здійснити відбір найкращих хромосом популяції за допомогою оператора селекції;
- здійснити схрещування відібраних хромосом за допомогою оператора схрещування;
- провести мутацію випадково відібраних хромосом, застосовуючи оператор мутації;
- визначити критерії зупинення.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

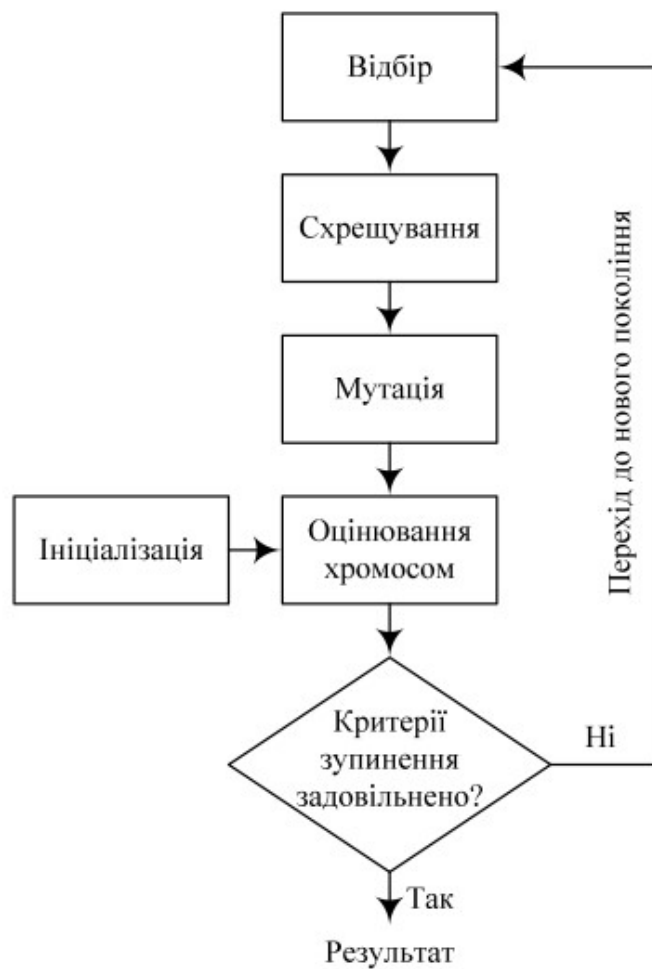


Рисунок 3.1 – Схема роботи узагальненого генетичного алгоритму

### **3.3 Застосування генетичних алгоритмів для оптимізації бази правил нечіткої систем керування мобільним роботом багатоцільового призначення**

На початку пошуку оптимальної бази правил необхідно задати кількість особин у популяції, оператор селекції, оператор схрещування, оператор мутації та умову закінчення генетичного пошуку.

Оператор селекції – це процес, в якому хромосоми з найкращими значеннями фітнес функції мають більшу вірогідність створення потомків, ніж гірші хромосоми.

Оператор селекції може бути наступного вигляду:

1) Селекція на основі фіксованої шкали – проводиться сортування значень фітнес функції від найгіршої до найкращої.

2) Рулетчатий відбір – випадковим чином обираються сектори рулетки, плаща кожної з яких відповідає пропорційному значенню фітнес функції.

3) Елітний відбір – в цьому випадку обираються найкращі елементи на основі порівнянь значень фітнес функції.

4) Турнірна селекція – в цьому випадку особини діляться на групи, та обираються найкращі елементи в групі, при чому кількість груп обирається випадково або в залежності від розміру популяції.

Оператор схрещування – це процес, який дозволяє на основі перетворень батьків або їх частин створювати хромосоми нащадків.

Оператор схрещування може бути виду:

1) Одно-точковий – між двома особинами популяції відмічається випадкова розрізаюча точка (зазвичай визначається випадково) та створюються двоє нових потомків.

2) Двох-точковий – в кожній хромосомі відмічаються дві випадкові розрізаючі точки та хромосоми обмінюються частинами, які знаходяться між точками розрізу.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

3) Багато-точковий – аналогічний двох-точковому та містить в собі багато точок розрізу, при чому велика кількість точок розрізу може привести до втрати хороших батьківських властивостей.

Оператор мутації – це процес, який дозволяє на основі перетворень із батьківської хромосоми отримувати хромосоми нащадки.

Оператор мутації може бути:

1) Одно-точковий - випадково обраний ген в батьківській хромосомі та проводиться його заміна з найближчим геном.

2) Двох-точковий – випадковим або направленим чином обираються дві точки розрізу, при цьому правий ген замінюється на місце першого.

Після застосування операторів селекції, схрещування та мутації розраховуються значення фітнес функцій та перевіряються критерії зупинення генетичного алгоритму.

Оптимізація бази правил нечіткої системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення за допомогою генетичного алгоритму складається з наступних кроків.

1) Встановити лічильник ітерацій (часу):  $t = 0$ . Виконати ініціалізацію (initialization) початкової популяції особин:  $P_t = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ , які представляють собою випадково сгенерований масив бази правил.

2) Промодельовати нечітку систему та розрахувати значення фітнес функції  $f(H_j), j = 1, 2, \dots, N$ .

3) Перевірити умови закінчення пошуку (termination criteria). Як такі умови можуть бути використані: досягнення мінімальної похибки або числа ітерацій. Якщо критерії закінчення пошуку задовільнено, тоді виконати перехід до кроку 12.

4) Збільшити лічильник ітерацій (часу):  $t = t + 1$ .

5) Вибрати частину баз правил для схрещування (selection of parents)  $P'$ .

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

6) Сформувані батьківські пари (mating) з баз правил, що відібрані на попередньому кроці.

7) Схрестити (crossover) вибрані бази правил.

8) Застосувати оператор мутації (mutation) до вибраних баз правил  $P'$ .

9) Промодельовати систему та обчислити похибку  $f(H_j)$  для кожної із баз правил, отриманих в результаті схрещування та мутації.

10) Сформувані нове покоління баз правил, що вижили, виходячи з рівня їх пристосованості (replacing, selection of survivors).

11) Повернутись до кроку 3.

12) Завершення.

### **3.4 Розробка програмного забезпечення для оптимізації бази правил нечіткої систем керування мобільним роботом багатоцільового призначення**

В середовищі *Matlab GUI* було розроблене спеціалізоване програмне забезпечення (рис. 3.2), яке дозволяє проводити оптимізацію бази правил за допомогою генетичного алгоритму. Програмне забезпечення дозволяє обирати різні оператори селекції, схрещування та мутації.



## Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

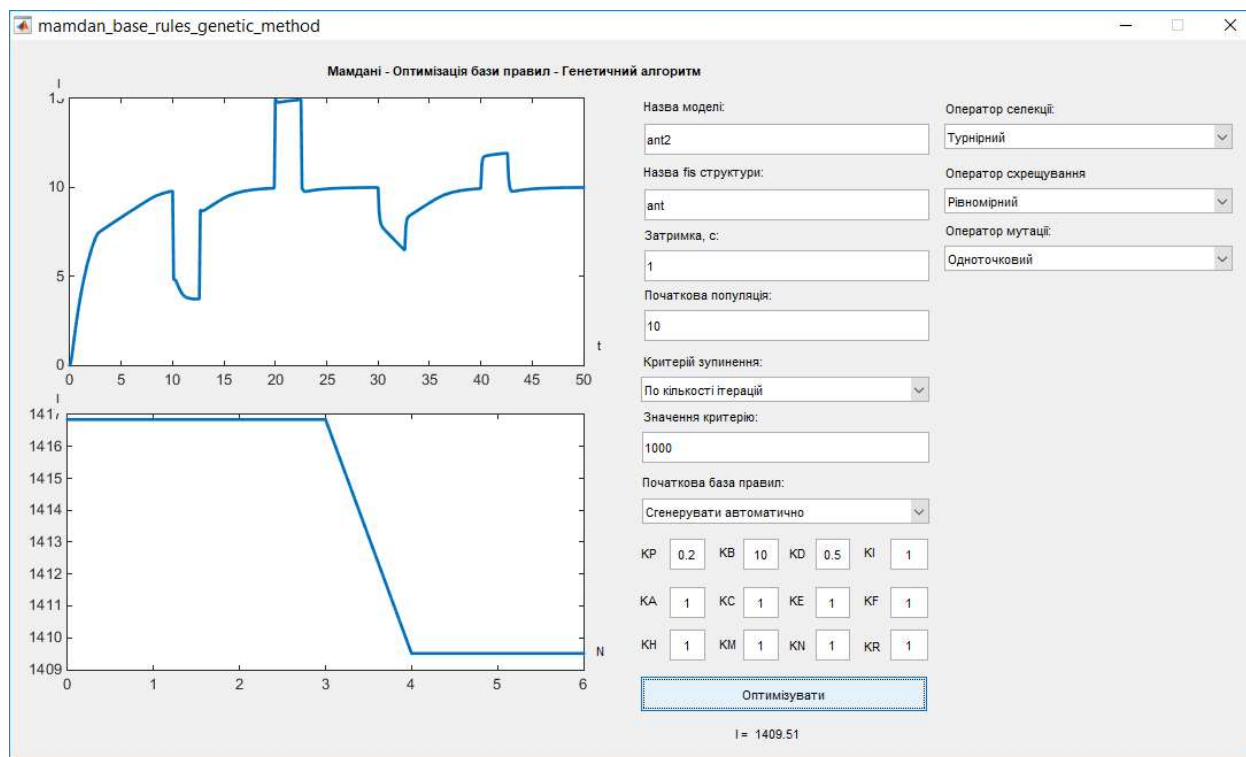


Рисунок 3.2 – Графічний інтерфейс програми для оптимізації бази правил нечіткої системи керування МР за допомогою генетичного алгоритму

Перед початком розрахунку бази правил генетичним алгоритмом необхідно синтезувати початкову популяцію баз правил, шляхом випадкового генерування консеквентів для кожного правила БП системи керування мобільним роботом.

Генетичні методи є більш ефективними в порівнянні з класичними методами локальної оптимізації при наступних умовах:

- досліджуваний простір пошуку є дуже великим, негладким та мультимодальним (існує декілька оптимумів);
- досліджувана задача не вимагає знаходження надточного глобального екстремуму.
- Необхідно досить швидко знайти прийнятне рішення, що досить часто має місце в реальних задачах оптимізації.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Таким чином, генетичний пошук може бути досить успішно застосований для розв'язання комбінаторних задач, а також для пошуку екстремумів мультимодальних функцій.

Генетичні методи мають такі переваги:

- відсутність потреби в специфічних знаннях про задачу, що розв'язується.
- До недоліків генетичного пошуку можна віднести:
- досить високу ітеративність;
- значну залежність ефективності генетичного пошуку від його регульованих параметрів (початкова точка пошуку, розмір популяції, типи генетичних операторів тощо);

Структурно-параметричний синтез БП нечіткої системи керування мобільним роботом можна представити наступним чином.

1) Визначення структури БП та розрахунок кількості БП в залежності від заданої кількості входів і термів.

2) Створення початкової популяції  $P_t = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ , в залежності від заданої кількості особин  $t$  з початкових умов.

2.1) Генерування випадковим чином всіх консеквентів для кожного правила (гену) створюваної БП, яка являє собою хромосому.

2.2) Зберігання згенерованих хромосом в масиві даних, який являє собою БП, тобто популяцію.

3) Розрахунок фітнес функції  $J$  для кожної популяції  $P_t$ .

4) Вибір оператора селекції  $\Omega$  для відбору найкращих популяцій.

4.1) Якщо обрано турнірну селекцію, то популяції діляться на групи з яких обираються найкращі популяції.

4.2) Якщо обрано рулетчасту селекцію, то розраховуються ймовірності сектору рулетки:

$$P_t = \frac{f_t}{\sum_{i=1}^n f_i}, \quad (3.5)$$

де  $P_t$  – вірогідність вибору популяції рулетчатим методом;  $f_t$  – розрахована фітнес-функція для кожної популяції БП.

В свою чергу цільова функція розраховується як середнє інтегральне квадратичне відхилення  $J(t, \mathbf{R}_X)$  реальної перехідної характеристики САК  $Y_P(t, \mathbf{R}_X)$  від бажаної  $Y_B(t)$  наступним чином:

$$J = J(t, \mathbf{R}_X) = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} (Y_B(t) - Y_P(t, \mathbf{R}_X))^2 dt, \quad (3.6)$$

де  $t_{\max}$  – загальний час перехідного процесу САК.

Крім того, фітнес-функція методу розраховується як обернена цільова функція системи автоматичного керування мобільним роботом  $f = 1/J$ .

5) Застосування оператора схрещування, для отримання нових нащадків.

5.1) Якщо обрано рівномірний оператор схрещування, то гени першого батька передаються другому батьку згідно випадково сформованого еталону і створюється їх нащадок.

5.2) Якщо обрано одно-точковий оператор схрещування, то між двома особами ставиться точка розрізу, яка формує нове покоління нащадків.

6) Застосування оператора мутації  $\Psi$  для протидії зацикленню ГА в локальному мінімумі.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

6.1) Якщо обрано одно-точковий оператор мутації, то випадково обирається один ген з особи, та проводиться його заміна найближчим геном.

6.2) Якщо обрано двох-точковий оператор мутації, то випадково ставляться дві точки розрізу та правий ген замінюється першим геном.

7) Перевірка критерію зупинення ГА, якщо він виконується, то перехід на наступний крок, якщо не виконується, то перехід на крок 3.

8) Зупинення.

Схематично роботу генетичного пошуку наведено на рис. 3.3.

Головними перевагами розробленого програмного забезпечення є те, що воно дозволяє знаходити оптимальні правила БП нечіткої системи автоматичного керування мобільним роботом багатоцільового призначення без експертних знань та оптимізувати вже існуючі БП.

Використання розробленого програмного забезпечення дозволяє успішно синтезувати бази правил нечітких систем автоматичного керування мобільними роботами багатоцільового призначення різних типів та розмірів. Запропонована методика оптимізації бази правил на основі генетичного алгоритму використовується для оптимізації керуючого пристрою типу Мамдані в системі керування швидкістю лінійного переміщення мобільного робота багатоцільового призначення по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

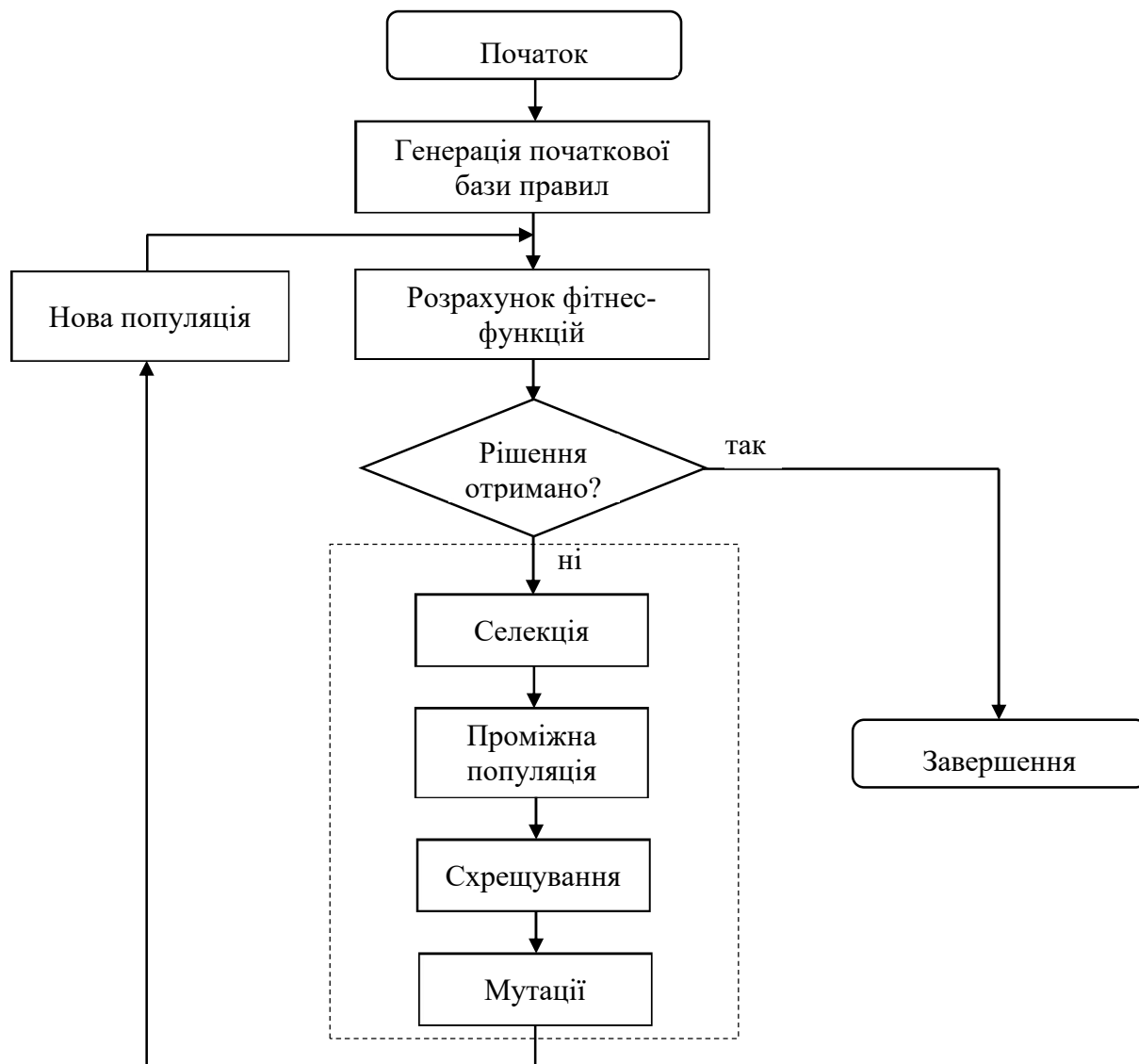


Рисунок 3.3 – Алгоритм генетичного пошуку бази правил нечіткої системи керування мобільним роботом багатоцільового призначення

### **Висновки до розділу 3**

Встановлено, що використання генетичного алгоритму у порівнянні з іншими методами параметричної оптимізації дозволяє покращити показники якості керування, а також підвищити ефективність функціонування нечітких систем.

Розглянуто різні методи параметричної оптимізації баз правил нечітких систем керування та їх переваги і недоліки у порівнянні один з одним.

Розроблена покрокова методика синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем автоматичного керування мобільними роботами багатоцільового призначення, що здатні переміщуватися по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

Також докладно розглянуто розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє синтезувати та оптимізувати бази правил нечітких систем керування мобільними роботами різних конфігурацій та розмірів.

Розроблена методика на базі генетичного алгоритму дозволяє здійснювати ефективний синтез та оптимізацію бази правил нечітких керуючих пристроїв Мамдані-типу для нечітких систем керування МР з метою підвищення їх ефективності функціонування.

## **4 СИНТЕЗ БАЗИ ПРАВИЛ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

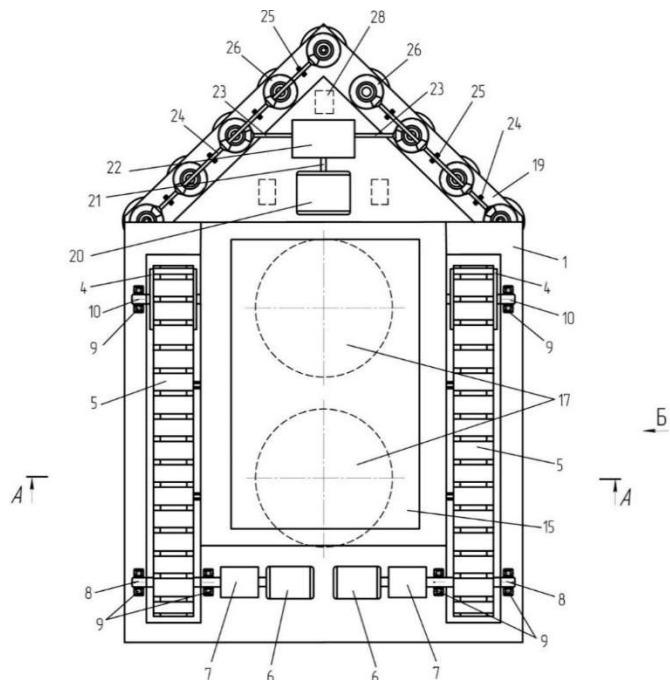
### **4.1 Основні технічні характеристики та математична модель мобільного робота багатоцільового призначення**

Мобільний роботом багатоцільового призначення, призначений для очищення корпусу судна, а також для виконання інших технологічних операцій, з постійними притискними магнітами на гусеницях розглянутий в роботах [62, 63]. Основними суттєвими недоліками МР такого типу є такі. Невисока надійність та досить малий термін експлуатації гусениць та ходової частини через ударні механічні зіткнення притискних магнітів з феромагнітною робочою поверхнею. Це призводить до зменшення магнітної сили та поступового механічного руйнування магнітів. В процесі переміщення такого МР вгору по різних типів феромагнітних поверхнях з тупим кутом нахилу існує загроза відриву всіх притискних магнітів, починаючи з крайніх верхніх, під дією сили тяжіння важкого корпуса робота. Невисока енергоефективність та досить мала швидкодія переміщення робота у просторі, так як при кожному наступному переміщенні МР, яке еквівалентне розміру одного постійного магніту, прикріпленого до гусеничної стрічки, виникає відрив останнього магніту в напрямку, що протилежний руху постійного магніту. Це спричиняє появу додаткового опору руху, а також втрат додаткової електричної енергії і потребує використання потужних електродвигунів, які є досить потужними, що мають високий обертовий електромагнітний момент. Обмеженість сфер застосування та досить невисока надійність процесів виконання технологічних операцій та переміщення при роботі на криволінійній робочій поверхні через можливий відрив однієї гусениці, що також може призвести до відриву її другої гусениці [64].

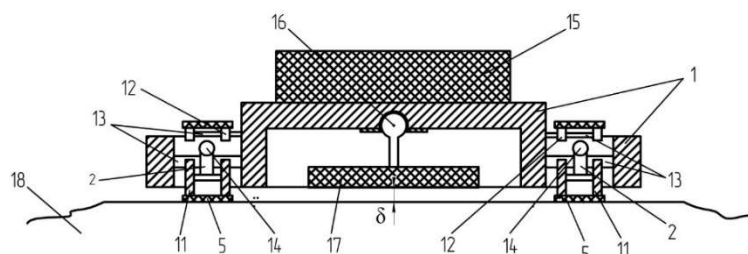
Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Розроблений та наведений в роботах [64, 65] мобільний робот, містить спеціальну силову двокомпонентну раму з плоскою конструкцією (рис. 4.1), прямокутна частина якої 1 має гусеничний механізм переміщення, що містить 2 гусениці 2, на кожній з яких встановлені ведучі 3 і ведені колеса в кількості 4 одиниць, між котрими натягується стрічка 5. На задній прямокутній ділянці рами 1 кожне ведуче колесо 3 (див. рис. 4.1, а) з'єднано з редуктором 7 та електродвигуном 6, причому електродвигун 6 спарений з редуктором 7 через вал 8, що розміщений в радіально-упорних шарикових підшипниках 9. Кожне з двох ведених коліс 4 сполучене з передньою частиною рами 1 за допомогою валу 10, що розміщений в аналогічних підшипниках 9. Також, в гусеницях 2, що застосовуються для переміщення (див. рис. 4.1, б) монтуються підтримуючі котки 11 та опорні котки 12, що контактують із внутрішньою поверхнею стрічки 5 і фіксуються на нерухомих осях 13, які міцно поєднуються до прямокутної частини рами 1. Крім того, котки 11 попарно з'єднані між собою, а кожна окрема пара таких опорних котків 11 містить пружинний амортизатор 14. Додатково на прямокутній ділянці рами 1 розташована закріплена ємність, яка має нульову плавучість 15. На нижній ділянці прямокутної частини рами 1 розміщені сферичні шарніри 16, які утримують головні притискні магніти 17 між лівою та правою гусеницями 2 із забезпеченням відповідного зазору  $\delta$  між корпусом роботу та робочої поверхні 18 (рис. 4.1, б).

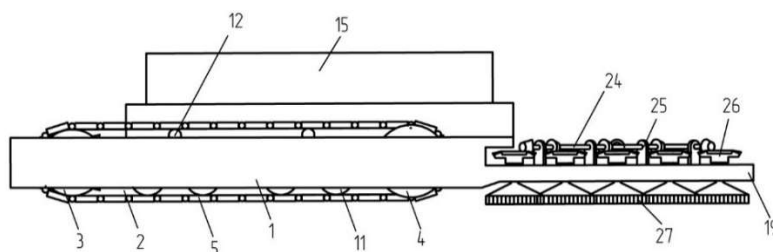




a)



б)



в)

Рисунок 4.1 – Схема робота з інструментом для механічного очищення:

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

а – на верхньому вигляді, штриховими лініями позначені елементи, які не помітні в цій проекції; б – фіксація головного магніту (переріз А-А на вигляді зверху); в – вигляд збоку (вигляд Б)

Друга частина двокомпонентної рами (рис. 4.1, а) має трикутну форму 19 та включає до свого складу електродвигун 20, котрий кінематично сполучений із валопроводами конічних зубчастих коліс 24 через вал 21, двосторонній редуктор 22 і розподільчий вал 23. В свою чергу, зубчаті колеса розташовані в радіальних шарикових підшипниках 25 по сторонам трикутної частини рами 19. Вони також оснащені зубчатою передачею з конічними зубчастими колесами 26, які, під'єднані до сталевих зачисних щіток 27 (рис. 4.1, в). Також, на нижній поверхні трикутної частини рами 19 встановлені додаткові постійні магніти 28 рівномірно по всій її площині.

В першу чергу налаштовуються всі фрези із сталевими зачисними щітками 27 на певну висоту (приблизно  $1,3 \div 2$  мм від робочої поверхні об'єкту, на якому працює робот) для збереження без пошкоджень шарів ґрунтовки та покриття робочої поверхні. Далі механізм встановлюється на поверхню 18 корпусу необхідного об'єкту, таким чином, щоб головні притискні магніти 17 зорієнтувалися по поверхні через зазор  $\delta$  для, того щоб забезпечити необхідне притискне зусилля. Потім на електродвигун 20 подається живлення, і він через двосторонній редуктор 22 призводить до руху валопроводи конічних зубчастих коліс 24, які обертають конічні зубчаті колеса 26, а також і сталеві фрези зі сталевими щітками 27. В свою чергу, фрези 27 обертаються в різні боки з лівої і правої сторін трикутної частини рами 19, що дає змогу врівноважити обертові моменти фрез 27 і уникнути перекосу МР під час переміщення по робочій поверхні. Далі, живлення подається на привідні електродвигуни 6, які через редуктори 7 обертають ведучі колеса 3, а також і секції гусеничних стрічок 5. Це призводить до руху кожної стрічки 5 в одній площині між ведучим 3 і веденим 4 колесами. В свою чергу, прямокутна частина рами внаслідок

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

взаємодії сил притискання головних магнітів 17 та пружних сил амортизаторів 14 притискається до гусеничних стрічок 5 через опорні котки 11. Це дає змогу забезпечувати надійне зчеплення гусениць 2 з робочою феромагнітною поверхнею 18. Крім того, для усунення провисання протилежної сторони гусеничної стрічки 5 від тієї, що рухається по поверхні 18, застосовуються спеціалізовані підтримуючі котки 12. Таким чином мобільний робот здійснює переміщення по робочій поверхні 18 об'єкту, на якому здійснюються технологічні операції, і виконує операції очистки за допомогою сталевих фрез зі сталевими зачисними щітками 27. Безпосередній процес очищення виконується як під водою, так і на поверхні. Для забезпечення високої ефективності проведення підводних очисних робіт вали редукторів 6 і електродвигунів 7 МР постачені композитними феромагнітними і сальниковими ущільненнями з метою забезпечення водонепроникності (на рис. 4.1 не показані). Також, сам мобільний робот має відповідну ємність нульової плавучості 15.

Мобільний робот переміщується в автоматичному режимі вздовж робочої поверхні корпусу судна, або іншого технологічного об'єкту 18 в напрямку, який заданий програмою руху, а також зі швидкістю, яка повинна забезпечувати виконання обраної технологічної операції (наприклад, очищення корпусу судна або елеватору). Швидкість зачистки може бути контрольована людиною-оператором або системою автоматичного керування швидкістю у відповідності з заданою якістю обробки робочої поверхні. Крім того, два спарені електродвигуни 6 з редукторами 7 можуть працювати автономно, що дозволяє роботу рухатися в довільному завданому напрямку та міняти кут обертання від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ), а також виконувати реверсний рух у зворотному напрямку.

Крім того, при здійсненні руху мобільного робота багатоцільового призначення по криволінійній похилій поверхні 18 закріплені на сферичних шарнірах 16 притискні магніти 17 можуть відхилятися ревном чином відносно вертикальної вісі шарніру 16

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

в межах зазору  $\delta$  і тим самим можуть орієнтувати вектор утримуючої сили перпендикулярно до поверхні робочої 18, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл максимального притискного зусилля між притискними магнітами 17 та поверхнею 18 по всій площині магнітів 17.

Застосування окремих притискних магнітів для створення притискного зусилля та встановлення сферичних шарнірних з'єднань, які закріплюють дані магніти між гусеницями на нижній поверхні рами МР, дозволяють суттєво підвищити надійність зчеплення всієї конструкції з робочою поверхнею за рахунок підвищення магнітної утримуючої сили даного робота. Розрахунок головного вектора ПЗ, яке в цілому діє на грань постійного магніту та його певних складових, представлений в роботі [63].

Наявність певного зазору між головними постійними магнітами та феромагнітною поверхнею дозволяє суттєво підвищити швидкість переміщення та прохідність мобільного робота [64], так як таким чином забезпечується можливість орієнтування зовнішньої площини головних притискних магнітів відносно площини поверхні притискання. Запропонований мобільний робот гусеничного типу більш ефективно використовує притискні пристрої та має менше енергоспоживання процесу переміщення через відсутність додаткового опору рухові (під час руху зовнішня поверхня всіх магнітів задіяна в процесі формування притискного зусилля та немає необхідності у циклічному відриві постійних магнітів від поверхні під час руху, на відміну від рішень в роботах [62, 63-67].

3D модель розглянутого мобільного робота багатоцільового призначення, що здатний рухатися по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях наведена на рис. 4.2.

В свою чергу, експериментальна фізична модель представленого робота має вигляд, наведений на рис. 4.3.

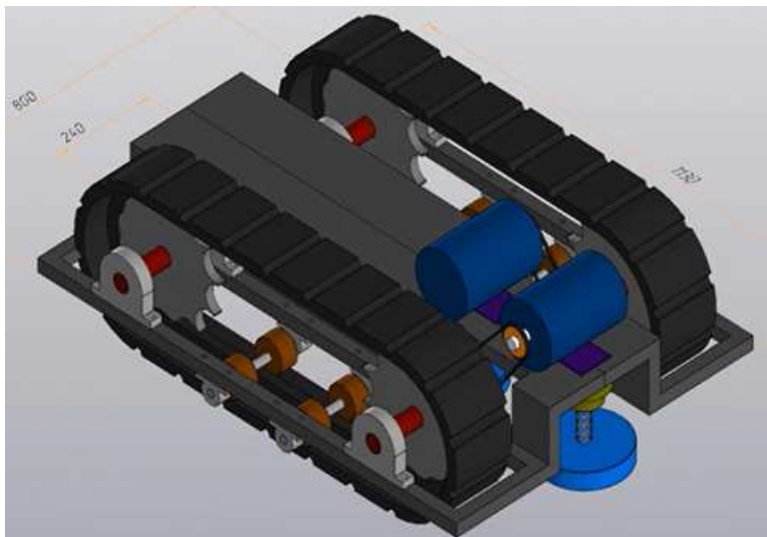


Рисунок 4.2 – 3D модель мобільного робота багатоцільового призначення

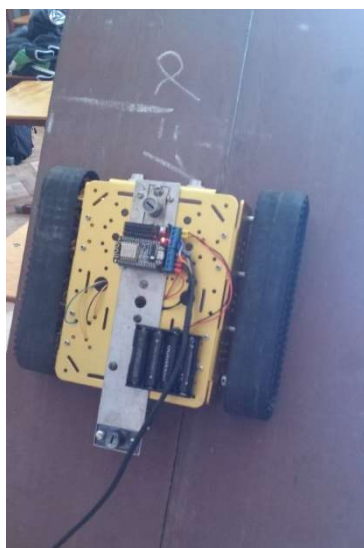


Рисунок 4.3 – Експериментальна фізична модель мобільного робота багатоцільового призначення

Для реалізації основних технологічних операцій багатоцільові гусеничні МР повинні мати можливість рухатися за заздалегідь заданими траєкторіями і працювати в умовах невизначеності робочої поверхні, спричиненої їх технологічними особливостями, наявністю перешкод, структурними пошкодженнями тощо. Таким чином,

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

автоматичне керування швидкості руху під дією різних збурень є одним з найважливіших і найскладніших завдань автоматизації МР такого типу. Система керування багатоцільовим МР на основі нечіткого контролера має структурну організацію, наведену на рис. 4.4. В якості керованої координати в даній САК виступає лінійна швидкість руху МР  $V$ .

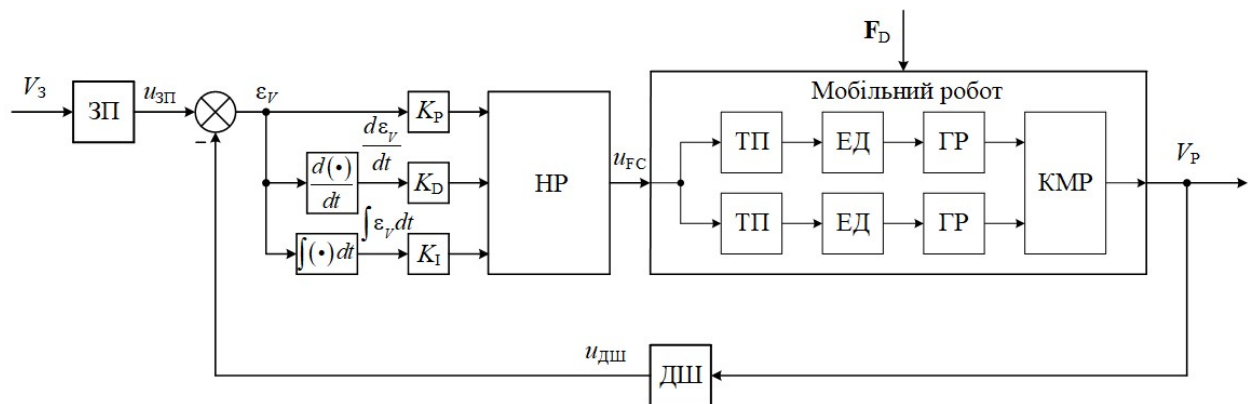


Рисунок 4.4 – Функціональна структура САК швидкістю МР

На рис. 4.4 прийнято наступні позначення: ЗП – задавальний пристрій; ТП – тиристорний перетворювач; ЕД – електродвигун; ГР – гусеничний рушій; КМР – корпус мобільного робота; ДШ – датчик швидкості;  $V_z$ ,  $V_p$  – задане та реальне значення швидкості переміщення МР;  $\epsilon_v$  – помилка керування;  $u_{фс}$  – сигнал керування нечіткого регулятора;  $u_{зп}$  – сигнал задавального пристрою;  $u_{дш}$  – сигнал датчика швидкості;  $F_D$  – збурювальний вплив;  $K_P$ ,  $K_D$ ,  $K_I$  – нормуючі коефіцієнти.

Розробка САК швидкістю проводилась для гусеничного робота з наступними основними параметрами: сумарна маса МР 160 кг, довжина 1,1 м, ширина 0,78 м, радіус ведучого колеса 0,16 м, лінійна швидкість руху 0,2 м/с, два привідних двигуна 2РВ132МН та передавальне число редуктора 105. Математична модель МР складається з наступних основних рівнянь:

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

$$F = \frac{F_{TO} + G(\zeta \cos \gamma + \sin \gamma - \xi \cos \gamma) + m_{MR} c \lambda}{\xi - \zeta}; \quad (4.1)$$

$$\omega_{MR} = V_{MR} / R_T = (V_{C2} - V_{C1}) / B; \quad (4.2)$$

$$V_{MR} = (V_{C2} + V_{C1}) / 2; \quad (4.3)$$

$$V_{C1} = \omega_{MR} (R_T - 0,5B) = \omega_{W1} R_W; \quad (4.4)$$

$$V_{C2} = \omega_{MR} (R_T + 0,5B) = \omega_{W2} R_W; \quad (4.5)$$

$$R_T = \frac{0,5B(V_{C2} + V_{C1})}{(V_{C2} - V_{C1})}; \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} M_{EM\alpha} = & \frac{D_M}{\eta_M} \frac{d\omega_M}{dt} + \frac{1}{k_R \eta_{MR}} \left[ D_{\Sigma W} \frac{d\omega_W}{dt} + R_W \left( \zeta \frac{G \cos \gamma + F}{2} + G \sin \gamma \left( \frac{\cos \varphi_{MR}}{2} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + b \frac{x_O}{B} \sin \varphi_{MR} + b \zeta \frac{h_C}{B} \sin \varphi_{MR} \right) - b \frac{\mu_T L (G \cos \gamma + F)}{4B} \left( 1 + \frac{4x_O^2}{L^2} \right) + \right. \\ & \left. + F_{TO} \left( \frac{1}{2} \cos \beta - \frac{(x_1 - x_O)}{B} \sin \beta \right) + \left( \frac{G \cos \gamma + F}{2g} + b G \sin \gamma \sin \varphi_{MR} \frac{h_C}{gB} \right) \frac{dV_{Ca}}{dt} + \right. \\ & \left. \left. + \left( m_{MR} + \frac{F}{g} \right) \frac{L^2 + B^2}{12B} \frac{d\omega_{MR}}{dt} \right) \right], \quad (4.7) \end{aligned}$$

де  $F_{TO}$  та  $F$  – значення питомих сил навантаження технологічної операції та притискних магнітів;  $G$  – сумарна вага робота та технологічного обладнання;  $\gamma$  – кут нахилу поверхні;  $\zeta$  – коефіцієнт тертя кочення;  $\xi$  – коефіцієнт адгезії;  $m_{MR}$  – маса робота;  $\lambda$  – коефіцієнт приєднаних мас,  $\lambda = 1,15 + 0,001 k_R^2$ ;  $k_R$  – передавальне число редуктора;  $c$  – прискорення робота;  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$  – поточні лінійні швидкості відстаючої та випереджуючої гусениць;  $R_T$  – радіус повороту робота;  $V_{MR}$ ,  $\varphi_{MR}$  – поточна лінійна швидкість і курс робота,  $\omega_{MR}$  – швидкість обертання робота,  $\omega_{MR} = d\varphi_{MR}/dt$ ;  $B$  –

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

відстань між центрами гусениць;  $\omega_{W1}$ ,  $\omega_{W2}$  – значення кутових швидкостей відстаючого та випереджуючого коліс;  $R_W$  – радіус ведучого колеса;  $a$  та  $b$  – коефіцієнти, що враховують напрямок обертання робота,  $a = 1$ ,  $b = 1$  – для відстаючої гусениці;  $a = 2$ ,  $b = -1$  – для випереджуючої гусениці;  $M_{EMa}$  – електромагнітні моменти приводних двигунів;  $\eta_M$ ,  $\eta_{MR}$  ККД двигунів та робота;  $D_M$  – момент інерції якоря двигуна;  $D_{\Sigma W}$  – сумарний момент інерції двох коліс і гусениці;  $L$ ,  $h_C$  – довжина робота та висота центру ваги;  $x_O$ ,  $x_1$  відстані від поперечної осі робота до поворотних центрів гусениць і до точки фіксації технологічного обладнання;  $\beta$  кут відхилення сили  $F_{TO}$  від поздовжньої осі робота;  $\mu_T$  – опір на поворотах, який залежить від радіуса повороту.

#### 4.2 Розробка бази правил нечіткої системи керування швидкістю мобільним роботом на основі знань експертів та отриманої методики

Розроблений нечіткий регулятор швидкості типу Мамдані реалізує закон керування, що заснований на залежності:

$$u_{FC} = f_{FC} \left( K_P \varepsilon_V, K_D \frac{d\varepsilon_V}{dt}, K_I \int \varepsilon_V dt \right). \quad (4.8)$$

Вектор вхідних сигналів регулятора в цьому випадку складається зі зважених сигналів помилки керування, її похідної та інтегралу по часу. Нормувальні коефіцієнти, які використовуються для перетворення вхідних сигналів регулятора у відносні одиниці від їх максимальних значень, мають такі значення:  $K_P = 5$ ;  $K_D = 0,33$ ;  $K_I = 60$ .

Для першого входу регулятора швидкості обрано п'ять лінгвістичних термів трикутного типу: BN – великий від'ємний; SN – малий від'ємний; Z – нульовий; SP – малий додатній; BP – великий додатній. В свою чергу, для другого та третього входів



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

регулятора обрано по три ЛТ трикутного типу: N – від’ємний; Z – нульовий; P – додатній. Також для вихідного сигналу регулятора  $u_{FC}$  вибрано сім термів: BN – великий від’ємний; N – від’ємний; SN – малий від’ємний; Z – нульовий; SP – малий додатній; P – додатній; BP – великий додатній. Зовнішній вигляд вибраних термів із заданими параметрами показано на рис. 4.5.

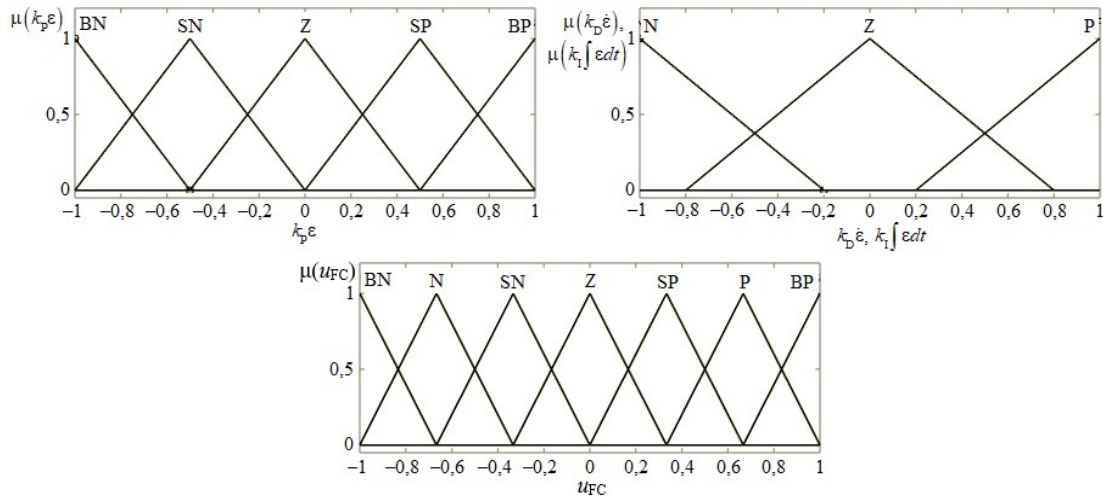


Рисунок 4.5 – Лінгвістичні терми нечіткого регулятора

Загальна кількість правил БП для нечіткого контролера визначається кількістю всіх можливих комбінацій ЛТ вхідних сигналів і дорівнює 45,  $s = 5 \times 3 \times 3 = 45$ . Кожне  $r$ -е правило, в свою чергу, ( $r = 1, \dots, 45$ ) визначається виразом (3.2).

Консеквенти кожного  $r$ -го правила, в даному випадку, обираються з набору всіх можливих консеквентів, що складається з 7 лінгвістичних термів (BN; N; SN; Z; SP; P; BP) вихідного сигналу регулятора  $u_{FC}$ . Вектор консеквентів  $\mathbf{R}_X$  в даному випадку має вигляд:

$$\mathbf{R}_X = \{LT_{X1}, LT_{X2}, \dots, LT_{Xr}, \dots, LT_{X45}\}, LT_{Xr} \in \{LT^1, LT^2, \dots, LT^7\}, X \in \{1, 2, \dots, 7^{45}\}.$$

Операція "min" вибирається як операція агрегування, операція "max" вибирається як для активації, так і для акумуляції. У свою чергу, метод центру тяжіння

обраний в якості методу дефазифікації даного регулятора.

Для порівняльного аналізу та дослідження ефективності запропонованої методики, розробка бази правил для системи нечіткого керування мобільним роботом здійснювалась на основі експертних знань та наведеної методики синтезу БП з формуванням оптимальних консеквентів на основі генетичних алгоритмів.

Фрагмент розробленої на основі знань експертів бази правил для нечіткого регулятора швидкості представлений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Фрагмент бази правил НР на основі знань експертів

Номер правила	Вхідні та вихідний сигнали			
	$K_P \varepsilon_V$	$K_D \frac{d\varepsilon_V}{dt}$	$K_I \int \varepsilon_V dt$	$u_{FC}$
1	BN	N	N	BN
5	BN	Z	Z	N
18	SN	P	P	Z
23	Z	Z	Z	Z
30	SP	N	P	Z
36	SP	P	P	SP
41	BP	Z	Z	P
45	BP	P	P	BP

При синтезі бази правил на основі запропонованої методики в якості цільової функції  $J$  обрано узагальнене інтегральне відхилення реальної перехідної характеристики САК швидкістю МР  $V_P(t, \mathbf{R}_X)$  від бажаної перехідної характеристики  $V_D(t)$  її еталонної моделі (ЕМ), яка представлена передаточною функцією

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

$$W_{EM}(p) = \frac{V_D(p)}{V_3(p)} = \frac{1}{(T_{EM}p + 1)^2}, \quad (4.9)$$

де  $T_{EM}$  – стала часу еталонної моделі.

У свою чергу, задана цільова функція обчислюється на основі виразу

$$J(t, \mathbf{R}_X) = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} [(E_V)^2 + k_{J1}(\dot{E}_V)^2 + k_{J2}(\ddot{E}_V)^2] dt, \quad (4.10)$$

де  $t_{\max}$  – загальний час перехідного процесу САК швидкістю МР;  $k_{J1}$ ,  $k_{J2}$  – вагові коефіцієнти;  $E_V$  – відхилення  $V_P(t, \mathbf{R}_X)$  від  $V_D(t)$ ,  $E_V = V_D(t) - V_P(t, \mathbf{R}_X)$ .

В свою чергу, в якості оптимального значення цільової функції  $J_{opt}$  обрано значення 0,1, при якому відхилення реальної характеристики  $V_P(t, \mathbf{R}_X)$  від бажаної  $V_D(t)$  лежить в допустимих межах.

Для дослідження ефективності запропонованої методики на стадії ініціалізації параметрів генетичного алгоритму було створено 4 окремі популяції з різною кількістю особин  $Z$ : 1)  $Z = 60$ ; 2)  $Z = 120$ ; 3)  $Z = 160$ ; 4)  $Z = 220$ . У свою чергу, синтез консеквентів бази правил НР здійснювався по черзі за допомогою кожної окремої популяції. Крім того, для кожної окремої популяції обрано однакові генетичні оператори, а також вірогідності схрещування  $P_C$  та мутації  $P_M$ , які мають значення:  $P_C = 0,25$ ;  $P_M = 0,12$ .

При розрахунку значень цільової функції (4.10) для кожної  $j$ -ї хромосоми на кожній ітерації алгоритму, моделювання САК швидкістю МР проводилось в усіх можливих режимах (при дії різних вхідних та збурювальних впливів) для ефективного синтезу консеквентів усіх правил БП. В свою чергу, перевірка критерію зупинення роботи алгоритму здійснювалась за умови досягнення оптимального значення цільової функції ( $J(n) \leq J_{opt}$ ).

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Усереднені експериментальні результати, отримані в процесу синтезу бази правил НР швидкості за допомогою кожної окремої популяції наведені в табл. 4.2, де прийнято наступні позначення:  $v_{J_{opt}}$  – сумарна кількість обчислень значень цільової функції  $J$ , що необхідна для досягнення її оптимального значення  $J_{opt}$ ;  $n_{J_{opt}}$  – сумарна кількість ітерацій алгоритму, що необхідна для досягнення її оптимального значення  $J_{opt}$ .

В свою чергу,  $v_{J_{opt}}$  є головним параметром, що визначає обчислювальні та часові витрати алгоритму та обчислюється наступним чином

$$v_{J_{opt}} = Z n_{J_{opt}}. \quad (4.11)$$

Таблиця 4.2 – Результати експериментів синтезу БП

Номер популяції	Результати експериментів		
	$Z$	$n_{J_{opt}}$	$v_{J_{opt}}$
1	60	98	5880
2	120	47	5640
3	160	29	4640
4	220	23	5060

На рис. 4.6 наведені криві зміни найкращих значень цільової функції (4.10) в процесі синтезу консеквентів бази правил НР за допомогою різних популяцій: 1)  $Z = 60$ ; 2)  $Z = 120$ ; 3)  $Z = 160$ ; 4)  $Z = 220$ .

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

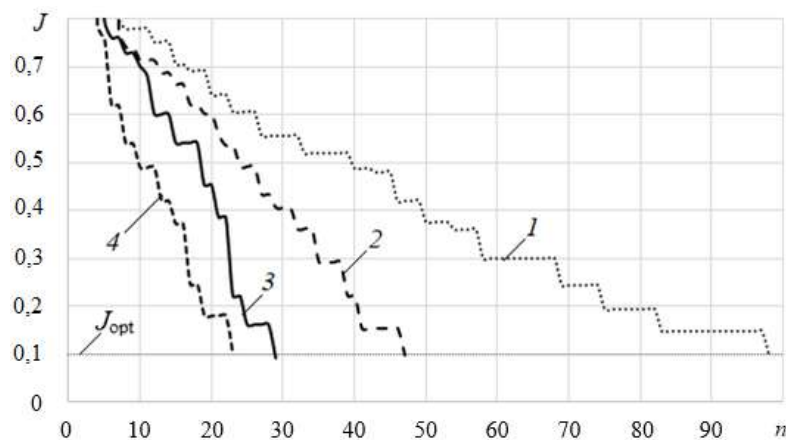


Рисунок 4.6 – Зміни найкращих значень цільової функції (4.10) в процесі синтезу консеквентів бази правил НР

Як видно з табл. 4.2 та рис. 4.6, чим більше кількість особин  $Z$  в популяції, тим менше ітерацій  $n$  необхідно для знаходження оптимального вектору консеквентів  $\mathbf{R}_{opt}$ . Так, для 4-ї популяції ( $Z = 220$ ) цільова функція досягла свого оптимального значення  $J_{opt}$  на 75 ітераціях раніше ніж для першої популяції ( $Z = 60$ ). Однак, сумарна кількість обчислень цільової функції  $v_{J_{opt}}$  для 4-ї популяції є дещо більшою ніж для третьої. Таким чином, аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що третя популяція ( $Z = 160$ ) є найбільш ефективною для синтезу консеквентів БП в даному випадку, так як вона має найменше значення параметру  $v_{J_{opt}}$  ( $v_{J_{opt}} = 4640$ ).

Фрагмент БП з консеквентами, що синтезовані за допомогою 3-ї популяції наведений в табл. 4.3, в свою чергу, як повний вектор консеквентів  $\mathbf{R}_{opt}$ , отриманий в результаті реалізації методики має вигляд:

$\mathbf{R}_{opt} = (\text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{N}, \text{N}, \text{N}, \text{SN}, \text{SN}, \text{SN}, \text{SN}, \text{N}, \text{N}, \text{SN}, \text{SN}, \text{Z}, \text{Z}, \text{SP}, \text{SP}, \text{P}, \text{SP}, \text{SP}, \text{SP}, \text{SP}, \text{P}, \text{P}, \text{SP}, \text{P}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP})$ .

Таблиця 4.3 – Фрагмент БП, синтезований за допомогою 3-ї популяції

Номер правила	Вхідні та вихідний сигнали			
	$K_P \varepsilon_V$	$K_D \frac{d\varepsilon_V}{dt}$	$K_I \int \varepsilon_V dt$	$u_{FC}$
1	BN	N	N	BN
5	BN	Z	Z	BN
18	SN	P	P	SN
23	Z	Z	Z	Z
30	SP	N	P	SP
36	SP	P	P	BP
41	BP	Z	Z	BP
45	BP	P	P	BP

На рис. 4.7 – наведені характеристичні поверхні  $u_{FC} = f_{FC}(K_P \varepsilon_V, K_D \frac{d\varepsilon_V}{dt})$  нечіткого регулятора швидкості при фіксованому значенні  $K_I \int \varepsilon_V dt = 0,5$  для розроблених баз правил: *a* – на основі знань експертів; *b* – на основі методики за допомогою 3-ї популяції.

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

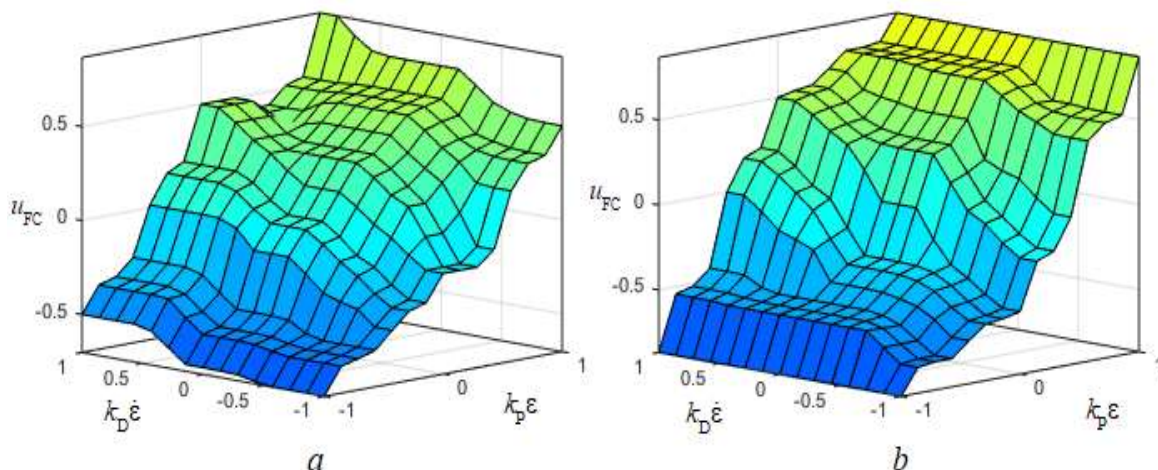


Рисунок 4.7 – Характеристичні поверхні  $u_{FC} = f_{FC}(K_P \varepsilon_V, K_D \frac{d\varepsilon_V}{dt})$  нечіткого контролеру швидкості при  $K_I \int \varepsilon_V dt = 0,5$

На рис. 4.8 наведені розгінні характеристики мобільного робота при русі вздовж похилої феромагнітної поверхні за наступними параметрами: кут нахилу робочої поверхні  $\gamma = 65^\circ$ ; задане значення швидкості  $V_3 = 0,2$  м/с; стале збурення у вигляді сили навантаження від технологічної операції  $F_{TO} = 850$  Н.

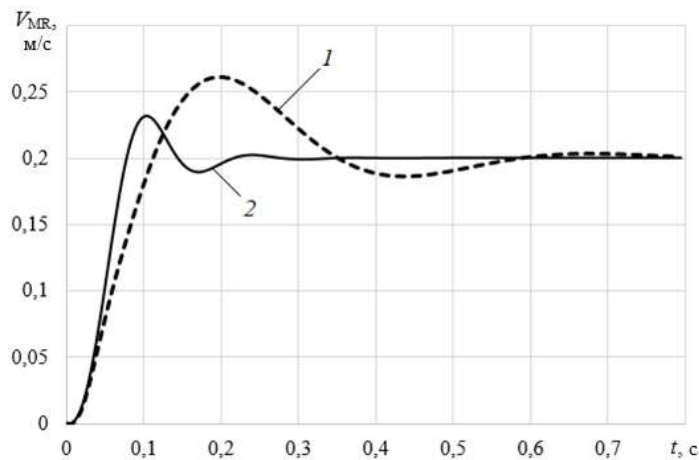


Рисунок 4.8 – Перехідні процеси САК МР за швидкістю

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами

Наведені графіки перехідних процесів отримані для САК швидкістю з розробленими БП нечіткого регулятора: 1 – на основі знань експертів; 2 – на основі методики за допомогою 3-ї популяції.

Також, в табл. 4.4. наведений порівняльний аналіз показників якості САК швидкістю МР з розробленими базами правил: на основі знань експертів та на основі запропонованої методики за допомогою 3-ї популяції.

Таблиця 4.4 – Показники якості САК швидкістю МР

Показники якості	Показники якості керування САК МР	
	БП на основі знань експертів	БП на основі методики
$\sigma$ , %	35,2	15,25
$t_r$ , s	0,124	0,079
$t_{max}$ , s	0,541	0,191
$J$	0,244	0,099

В свою чергу, в табл. 4.4 прийнято наступні позначення:  $\sigma$  – перерегулювання,

$$\sigma = \frac{V_{pmax} - V_p}{V_p} \cdot 100\%; t_r - \text{час наростання}; t_{max} - \text{сумарний час перехідного процесу.}$$

З табл. 4.4 та рис. 4.8 видно, що САК швидкістю мобільним роботом з розробленою базою правил на основі генетичного алгоритму має значно менше значення цільової функції та значно кращі показники якості керування у порівнянні з САК з базою правил, що розроблена на основі знань експертів. Крім того, для знаходження оптимального вектору консеквентів БП  $R_{opt}$  за допомогою наведеної методики не знадобилося суттєвих обчислювальних та часових витрат, що в цілому підтверджує високу ефективність запропонованої методики на основі генетичного



Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами алгоритму.

#### **Висновки до розділу 4**

В даному розділі наведено основні рівняння математичної моделі, а також основні технічні характеристики досліджуваного мобільного робота багатоцільового призначення, що здатний переміщуватися та виконувати технологічні операції на похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

Для системи автоматичного керування швидкістю лінійного переміщення даного мобільного роботу розроблено бази правил нечіткого регулятора на основі знань експертів та за допомогою запропонованої методики на основі генетичного алгоритму. Для дослідження ефективності запропонованої методики розробка бази правил здійснювалася за допомогою різних популяцій з різними кількостями особин. В результаті проведені дослідження показали, що для даного конкретного випадку найбільш ефективною є 3-я популяція ( $Z = 160$ ), яка дозволила синтезувати базу правил з оптимальними консеквентами з найменшими обчислювальними та часовими витратами ( $v_{Jopt} = 4640$ ).

Крім того, проведені дослідження перехідних процесів системи автоматичного керування швидкістю мобільним роботом показали, що САК з розробленою базою правил на основі запропонованої методики має значно кращі показники якості ніж САК з розробленою БП на основі знань експертів, що в цілому підтверджує високу ефективність запропонованої методики.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі розроблено методику та програмні засоби синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем керування мобільними роботами багатоцільового призначення. Розглянуто області застосування різнотипних мобільних та промислових роботів, а також визначено основні принципи їх дії, відмінності конструкції та сфери експлуатації. Детально проаналізовані принципи реалізації систем керування та конструкцій різнотипних багатоцільових роботів вертикального переміщення, а саме: твариноподібних; оснащених пропелерами, липкими кінцівками та неодимовими магнітами. Зазначено основні недоліки та переваги кожного методу реалізації наведених роботів. В результаті аналізу магнітні та магнітокеровані притискні пристрої визначені як найбільш ефективні для реалізації переміщень по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

Сучасні дослідження, що проводяться в різних країнах світу, показують, що для багатьох нелінійних та нестационарних об'єктів керування, до яких відноситься і наведений мобільний робот, доцільно використовувати нечіткі системи автоматичного керування. Крім того, структурно-параметрична оптимізація нечітких систем керування складними технічними об'єктами дозволяє значно розширити перспективу їх ефективного застосування. Особливої уваги при цьому заслуговує розробка належних баз правил.

Аналіз існуючих методів синтезу та оптимізації нечітких систем автоматичного керування показав, що їх застосування дозволяє досить ефективно здійснювати розробку та проектування даних систем з метою покращення показників якості керування нестационарними та нелійними об'єктами, в яких здобуття математичної моделі є важким процесом або неможливим. Нечіткі керувальні пристрої з логічним висновком Мамдані-типу є досить ефективними для керування об'єктами, для яких є

досвід керування досвідченими операторами, що може бути використаний для синтезу лінгвістичних термів та бази правил нечіткого регулятора.

Встановлено, що використання генетичного алгоритму у порівнянні з іншими методами параметричної оптимізації дозволяє покращити показники якості керування, а також підвищити ефективність функціонування нечітких систем. Розглянуто різні методи параметричної оптимізації баз правил нечітких систем керування та їх переваги і недоліки у порівнянні один з одним.

Розроблена покрокова методика синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем автоматичного керування мобільними роботами багатоцільового призначення, що здатні переміщуватися по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях. Також докладно розглянуто розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє синтезувати та оптимізувати бази правил нечітких систем керування мобільними роботами різних конфігурацій та розмірів.

Розроблена методика на базі генетичного алгоритму дозволяє здійснювати ефективний синтез та оптимізацію бази правил нечітких керуючих пристроїв Мамдані-типу для нечітких систем керування МР з метою підвищення їх ефективності функціонування.

Наведено основні рівняння математичної моделі, а також основні технічні характеристики досліджуваного мобільного робота багатоцільового призначення, що здатний переміщуватися та виконувати технологічні операції на похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях.

Для системи автоматичного керування швидкістю лінійного переміщення даного мобільного роботу розроблено бази правил нечіткого регулятора на основі знань експертів та за допомогою запропонованої методики на основі генетичного алгоритму. Для дослідження ефективності запропонованої методики розробка бази правил здійснювалася за допомогою різних популяцій з різними кількостями особин. В результаті проведені дослідження показали, що для даного конкретного випадку

Еволюційна оптимізація нечітких систем управління багатоцільовими мобільними роботами найбільш ефективною є 3-я популяція ( $Z = 160$ ), яка дозволила синтезувати базу правил з оптимальними консеквентами з найменшими обчислювальними та часовими витратами ( $v_{\text{Opt}} = 4640$ ).

Крім того, проведені дослідження перехідних процесів системи автоматичного керування швидкістю мобільним роботом показали, що САК з розробленою базою правил на основі запропонованої методики має значно кращі показники якості ніж САК з розробленою БП на основі знань експертів, що в цілому підтверджує високу ефективність запропонованої методики.

Також, розглянуті основні питання охорони праці та охорони навколишнього середовища.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Дищенко В. С. Дослідження динаміки мобільного робота для переміщення по вертикальним поверхням, 2006. 156 с.
2. Як влаштовані роботи. URL: <https://qps.ru/boXnd>.
3. Яцун С. Ф., Чжо Пью Вей, Мальчіков А. В., Тарасова Е. С. Математичне моделювання мобільного гусеничного робота. *Сучасні проблеми науки та освіти*. - 2013. № 6. С. 2.
4. Системи пересування мобільних роботів URL: <https://qps.ru/yOxvQ>.
5. Крокуючі роботи. URL: <https://qps.ru/ZJrXg>.
6. Abigaille - робот-гекон, прототип майбутніх космічних роботів-ремонтників. URL: <https://qps.ru/QFWwy>.
7. VertiGo - робот, якого не зупинять стіни і інші перешкоди. URL: <https://qps.ru/hG8oS>.
8. Робот, який може підніматися по будь-якій вертикальній поверхні, використовуючи розплавлений пластик. URL: <https://qps.ru/rgZSE>.
9. Робот-верхолаз HR-MP значно спростить процедуру діагностики конструкцій турбін вітрогенераторів. URL: <https://qps.ru/woKfh>.
10. Zadeh L.A., Fuzzy sets, Information and Control 8, 338-353, 1965.
11. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant. Proc. IEEE 121, No.12, 1585-1588, 1974.
12. Kaoru Hirota, Industrial Applications of Fuzzy Technology. Tokyo, 1992, 310.
13. Mielczarski W. (Editor). Fuzzy Logic Techniques in Power Systems. Physica-Verlag, 1998, 456.кy
14. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.

15. Hampel R., Wagenknecht M. and Chaker N. (Eds.). Fuzzy Control: Theory and Practice. Physika-Verlag, Heidelberg, New York, 2000.
16. Zimmermann H. J. Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1992.
17. Передовые технологии в управлении кондиционерами Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. [www.ivic.ua/info/interesting/index.html](http://www.ivic.ua/info/interesting/index.html)
18. Aliev R.A., Bonfig K.W., and Shirinova U.K. Genetic algorithm based fuzzy modeling// In Proc/ of Third International Conference on Application Fuzzy Systems and Soft Computing-ICAFS'98. – Wiesbaden, Germany, 1998. – pp. 118-123.
19. Aliev R.A., Fazlollahi B. Vahidov R.M. Genetic algorithm-based fuzzy regression analysis// Int. Jo. Soft Computing, Methodologies and Applications. – No. 3,2001. – 10pp.
20. Kim J.H., Oh S.J. A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain system // Int. Jo. Soft Computing. – No. 4, 2000. – pp. 123-129.
21. Silva C.W. Application of fuzzy logic in the control of robotic manipulators // Int. Jo. Fuzzy Sets and Systems. --№ 70, 1995.–pp.223 – 234.
22. Aliev R.A., Guirimov B.G., and Aliev F.T. Fuzzy control system for mobile robots based on Soft Computing // In Proc. Of the Symposium on Robotics and Cybernetics. – Lille, France, 1996. – pp. 800-802.
23. Кунцевич В.М. Решение одной оптимизационной задачи управления в условиях неопределенности. Проблеми управління і інформатики, 2002. – №3. – сс. 85-100.
24. Проблеми розробки людино-машинних систем для керування суднами в екстремальних умовах // Технічні вісті. – Львів: Вільна Україна, 1994. – N 1(2, 3). – с. 49-53.
25. Chen J.Q., Xi Y.G., Zhang Z.Y. A clustering algorithm for fuzzy model identification // Int. Jo. Fuzzy Sets and Systems. - № 98, 1998. – pp. 319-329.

26. Коссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Нечеткий эллипсоидальный наблюдатель состояния линейных динамических объектов с неизвестными возмущениями // Праці міжнародної конференції з управління автоматика – 2000. – Львов, вересень 11-15, Т.2. – с. 149-154.
27. Mamdani E.H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller // International Journal of Man-Machine Studies. – No. 7(1), 1975. – pp. 1-13.
28. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. System, Man & Cybernetics 15(1), 1985. – pp. 116-132.
29. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992. – 450.
30. Werners B.M. Aggregation models in mathematical programming, NATO ASI Series. – Vol. F48, Mathematical Models for Decision Support (Ed. G. Mirta). – Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, 1998. – p. 295-305.
31. Zimmerman H.J., Fuzzy Set Theory. – 2 edition. – Kluwer, Boston, 1991. – 315 p.
32. Dubois D., Prade H., Fuzzy sets and systems: Theory and applications. – Boston: Academic Press, Inc. – 393 p.
33. Tani T., Murakoshi S., Umano M. Neuro-fuzzy hybrid control system of tank level in petroleum plant // IEEE Transactionson fuzzy systems, Vol. 4, No. 3, August, 1996. – pp. 360-368.
34. Сетлак Г. Нечеткие нейросетевые модели в интеллектуальных управленческих системах // Праці міжнародної конференції з управління АВТОМАТИКА – 2000. – Львів, вересень 11-15, Т.7. Частина 2. – с. 224-229.
35. Кравец П.И., Беламур Лиес. Интеллектуальное управление многосвязными нелинейными объектами в условиях неполной и нечеткой

информации // Праці міжнародної конференції з управління АВТОМАТИКА – 2000.- Львів, вересень 11-15, Т.2. – с.134-139.

36. Макаркіна Г.В., Васильченко Я.В. Керування складною динамічною системою на підставі теорії нечітких множин. // Вестник Херсонского государственного технического университета. – Херсон – 2001.- Т.10. –с. 70-74.

37. Simoes-Marques M., Ribeiro R.A., Gameiro-Marques A. A fuzzy decision support system for equipment repair under battle conditions // Int. Jo. Fuzzy Sets and Systems. - № 115, 2000. – pp. 131-140.

38. Ying H. Constructing nolinear variable gain controllers via the Takagi-Sugeno fuzzy control // IEEE Transactionson fuzzy systems, Vol. 6, No. 2, May, 1998. – pp. 226-234.

39. Traorre A., Polit M., Angulo C., Catal'a A. Classification of Abnormal Situations in a Waste Water Treatment Plant // CCIA 2002, LNAI 2504. – Springer- Verlag Berlin Heidelberg. – 2002. – pp. 249-256.

40. Tanaka T., Ohwi J., Litvintseva L.V., Yamafuji K., Ulyanov S.V. Soft Use (Part 1: Direct Human-Robot Communications and Managing System for Cooperative Control) // Soft Computing 2 (1997) 88-98.

41. Tanaka T., Ohwi J., Litvintseva L.V., Yamafuji K., Ulanov S.V. Soft Computing Algorithms for Intelligent Control of a Mobile Robot for Service Use (Part 2: Path planning, navigation and technology operations) // Soft Computing 1 (1997) 99-106.

42. Gavish G., Zaslavsky R., Kandel A. Longitudinal fuzzy control of a submerged vehicle // Int. Jo. Fuzzy Sets and Systems. - № 115, 2000. – pp. 305-319.

43. Гостев В.И., Лесовой И.П., Вихров А.Э. Оптимизация параметров цифровых нечетких регуляторов // Материалы Международной конференции из управление «Автоматика 2001». – Т.1. – 10-14 сентября 2001, Одесса. – с.21-22.



44. Furukawa Y., Kijima K., Ibaragi H. Development of automatic course modification system using fuzzy inference // Proc. Of IFAC Conference on Control Application in Marine Systems. – Ancona, Italy, July 7-9, 2004. – pp. 77-82.
45. Nicolau V., Ceanga E. Fuzzy rudder-roll damping system based on analysis Marine Systems. - Ancona, Italy, July 7-9, 2004. – pp. 285-296.
46. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. Пер. с англ. Под ред. Быховского М.Л. – М.: «Мир». 1974. – 534 с.
47. Li W. Design of a Hibrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller // Int. Joint Conf. On Neural Networks, July 10-16, 1999, pp. 449-463.
48. Peters L., Guo S., Camposano R. A novel analog fuzzy controller for intelligent sensors // Int. Jo. Fuzzy Sets and Systems. - №70, 1995. – pp. 234-247.
49. Mizumoto M. Realization of PID controls by fuzzy control methods // Fuzzy Sets and Systems, 1995. – No. 70. – pp. 171-182.
50. Arghavani J., Derenne M., Marchand L. Prediction of Gasket Leakage Rate and Sealing Performance Though Fuzzy Logic // Int. Jo. Advanced Manufacturing Technologies. – no. 20, 2002. – pp. 612-620.
51. Кондратенко Ю.П., Подопригора Д.Н., Сидоренко С.А., Нечеткий подход к синтезу быстродействующих алгоритмов формирования грузового плана судна // труды международной практической конференции «Теория активных систем», Москва, Россия, Институт проблем управления РАН, 19-21 ноября, 2001. – с. 96-97.
52. Ангамалов О.Н. Оценка технического состояния электрооборудования в реальном масштабе времени методом нейро-нечеткой идентификации // Exponenta Pro. – 2003. – №2. – С. 36 -44.
53. Satishkumar B., Chidambaram M. Control of unstable bioreactor using fuzzy tuned PI controller // Int. Jo. Bioprocess Engineering. – No. 20, 1999. – pp.127-132.

54. Кондратенко Ю.П., Сидоренко С.А. Системи підтримки прийняття рішень на основі пристроїв з нечіткою логікою // Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв, УДМТУ, 1999. – Вип. 4., с. 125-134.
55. Mamdani E. H. Twenty Years of Fuzzy Control: Experiences Gained and Lessons Learnt // IEEE Intb. Conf. on Fuzzy Systems. – 1993. – pp. 339-334.
56. Runkler T.A. Selection of appropriate defazzyfication methods using application specific properties // IEEE Trans. On fuzzy systems. – Vol. 5, No. 1, February 1997. – pp. 72-79.
57. Kondratenko, Y.P., Kozlov, O.V. Generation of Rule Bases of Fuzzy Systems Based on Modified Ant Colony Algorithms // Journal of Automation and Information Sciences, Volume 51, Issue 3. – 2019. – P. 4-25.
58. Kondratenko, Y.P., Kozlov, O.V., Korobko O.V. Two Modifications of the Automatic Rule Base Synthesis for Fuzzy Control and Decision Making Systems // Chapter in a book: “Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Foundations”. – Medina, J., Ojeda-Aciego, M., Verdegay, J.L., Pelta, D.A., Cabrera, I.P., Bouchon-Meunier, B., Yager, R.R. (Eds.). Book Series: Communications in Computer and Information Science, Vol. 854. – Berlin. Heidelberg: Springer International Publishing, 2018. – P. 570-582. DOI 10.1007/978-3-319-91476-3
59. Козлов О.В. Синтез керуючих пристроїв для систем керування пластинчатими транспортерами спеціалізованих піролізних комплексів на основі генетичних алгоритмів / О. В. Козлов, О. С. Скакодуб // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2018. – С. 14-17.
60. Козлов, О. В. Синтез та оптимізація нечітких регуляторів у системах керування піролізними реакторами / О. В. Козлов, Г. В. Кондратенко, Ю. П. Кондратенко // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв, 2017. – № 4. – С. 25-36.

61. Субботін, С.О., Олійник, А.О., Олійник, О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей // Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.
62. Пристрій для механічного очищення корпусу судна: пат. 63172 Україна: МПК В63В 59/00. № u 2011 04125; заявл. 05.04.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. 3 с.
63. Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П., Жучинський Л. А. Розрахункова модель притискних зусиль мобільних роботів, що пересуваються по феромагнітних поверхнях. *Автоматика 2013* : матеріали XX Міжнар. конф. з автоматичного управління, 25-27 вересня 2013 р. Миколаїв, 2013. С. 167-168.
64. Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна: пат. 100341 Україна: МПК В25J 19/00. № u 2015 00063; заявл. 05.01.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 8 с.
65. Стефани Е. П. Основы построения АСУ ТП : Учеб. пособ. Москва : Энергоиздат, 1982. 352 с.
66. Kushnir, V. O., Gerasin O. S. Mobile robot for technological cleaning of ferromagnetic surfaces. *Автоматика 2015* : матеріали XXII міжнар. конф. з автоматичного управління (м. Одеса, 10-11 вересня 2015 р.) НАН України. ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова та ін., Одеськ. нац. політех. ун-т. Одеса : ТЕС, 2015. С. 95–96.
67. Fugro Subsea Services Limited. Case Study. Hull Cleaning and Inspection Robot. 2014. URL: <https://qps.ru/y5Int>.
68. Винокурова Л.Е., Васильчук М.В., Гаман М.В. Основы охраны праці: Підручник. К., 2001. 218 с.
69. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості і небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу Охорона праці. -1998. - № 6.

70. Державний реєстр міжгалузевих і галузевих нормативних актів про охорону праці (Реєстр ДНАОП). - К.: Держнаглядохоронпраці; Основа, 1995. - 223 с.
71. Єлисеєв А.Г. Охорона праці. – К., 1995.-234 с.
72. Законодавство України про охорону праці (збірник нормативних документів. У 4 т. - К.: Держнаглядохоронпраці; Основа, 1995.
73. Кодекс законів про працю України. - К.: Юрінком Інтер, 1998. -1040 с.
74. Кундієв Ю.І. Гігієна праці – пріоритетний напрямок діяльності Міжнародної організації праці // Укр. журн. з пробл. мед. праці. – 2009. – № 3 (19). – с. 3-4.
75. Літвак С. М., Михайлюк В. О. Безпека життєдіяльності. Навч. посібник. Миколаїв. - ТОВ “Компанія ВІД”. – 2001. – 230 с.
76. Нагорна А.М. Конвенції та рекомендації МОП з гігієни праці / А.М. Нагорна, П.М. Вітте, Л.О. Добровольський // Укр. журн. з пробл. мед. праці. – 2009. – № 3 (19). – С. 5-11.
77. Прокопенко В.І. Трудове право України: Підручник. - Х.: Фірма "Консум", 1998.-267 с.
78. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В., Зеркалов Д. В., Сабарно Р. В., Полукаров О. І., Коз'яков В. С., Мітюк Л. О. Основи охорони праці. Підручник для студентів вищих навчальних закладів освіти. – 2-ге видання, Київ, 2006. 436 с.
79. Богобоящий В. В., Курбанов К. Р., Палій П. Б., Шмандій В. М. Принципи моделювання та прогнозування в екології. Мін-во освіти і науки України, Ін-т економіки та нових технологій. – К. : Центр навчальної літератури, 2004.