

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Західноукраїнський національний університет**  
**Навчально-науковий інститут новітніх освітніх технологій**  
Кафедра комп'ютерної інженерії

**Лукачик Віталій Сергійович**

**«Алгоритми прогнозування руху мобільного робот /  
Algorithms for predicting the movement of a mobile  
robot»**

спеціальність: 123 - Комп'ютерна інженерія  
освітньо-професійна програма - Комп'ютерна інженерія  
Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи КІзм-21  
В.С. Лукачик

---

Науковий керівник:  
д.т.н., проф. В.М. Теслюк

---

Кваліфікаційну роботу допущено  
до захисту:

"\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Л. О. Дубчак

**Тернопіль – 2025**

## РЕЗЮМЕ

Кваліфікаційна робота на тему “Алгоритми прогнозування руху мобільного робота” зі спеціальності 123 «Комп’ютерна інженерія» освітнього ступеня «магістр» написана обсягом 97 сторінок і містить 17 ілюстрацій, 2 таблиць, 2 додатки та 38 джерел за переліком посилань.

Мета магістерської роботи полягає в підвищенні ефективності прогнозування руху мобільними роботами застосовуючи нечітку логіку, штучні нейронні мережі, що може покращити не тільки ефективність управління, але й зробити цей процес доступним для більш широкого кола користувачів.

В процесі розв’язання сформульованих задач у кваліфікаційній роботі використано такі методи: системного аналізу (для розроблення структури системи); теорії машинного навчання та штучних нейронних мереж (для побудови моделі); об’єктно-орієнтованого програмування (для розроблення програмного забезпечення системи).

Результати дослідження: структура та алгоритми функціонування прогнозування руху робота на основі нечіткої логіки, фізична модель системи, модель на основі машинного навчання, програмна реалізація системи прогнозування руху мобільного робота, результатів досліджень.

Результати магістерської роботи можуть бути використані в процесі дослідження та прогнозування руху мобільних роботів у закритих приміщеннях.

Орієнтовні напрямки розвитку досліджень: підвищення рівня автоматизації та точності прогнозування руху мобільних роботів, розширення функціональності систем управління мобільними платформами.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** прогнозування, мобільний робот, нечітка логіка, теорія штучних нейронних мереж.

## SUMMARY

The qualification work on the topic “Algorithms for predicting the movement of a mobile robot” in the specialty 123 “Computer Engineering” of the educational degree “Master” is written in 97 pages and contains 17 illustrations, 2 tables, 2 appendices and 38 sources according to the list of references.

The purpose of the work is to expand the possibilities of predicting the movement of mobile robots using fuzzy logic, machine learning, artificial neural networks, which can improve not only the efficiency of management, but also make this process accessible to a wider range of users.

To solve the tasks set in the qualification work, the following methods were used: systems analysis (for developing the system structure); the theory of machine learning and artificial neural networks (for building a model); object-oriented programming (for designing the system software).

Research results: structure and algorithms of functioning of robot motion prediction based on fuzzy logic, physical model of the system, model based on machine learning, software implementation of the mobile robot motion prediction system, research results.

The results of the work can be used in the process of research and prediction of the movement of mobile robots in closed spaces.

Approximate directions of research development: increasing the level of automation and accuracy of mobile robot motion prediction, expanding the functionality of mobile platform control systems.

**KEYWORDS:** prediction, mobile robot, fuzzy logic, theory of artificial neural networks.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....  | 8  |
| Вступ.....   | 9  |
| 1 Аналіз підходів, методів та програмного та технічного забезпечень.....                         | 11 |
| 1.1 Аналіз підходів управління мобільними роботами .....   | 11 |
| 1.2 Особливості керування рухом робота на основі нейромережових технологій .....                 | 15 |
| 1.3 Аналіз нейромереж для реалізації засобів відновлення втрачених навігаційних даних у МР ..... | 16 |
| 1.4 Формулювання вимог та вибір принципів реалізації блоків управління рухом МР .....            | 21 |
| 1.5 Висновки до розділу 1 .....  | 25 |
| 2 Математичне забезпечення системи для управління роботом з використання нечіткої логіки .....   | 26 |
| 2.1 Модель та алгоритм нечіткого управління рухом робота .....                                   | 26 |
| 2.2 Схема реалізації алгоритму формування сигналу управління роботом .....                       | 34 |
| 2.3 Розроблення структури системи управління рухом мобільного робота .....                       | 35 |
| 2.4 Розроблення програмних засобів для оцінки розробленої моделі .....                           | 38 |
| 2.5 Висновки до розділу 2 .....  | 41 |
| 3 Розроблення системи управління рухом мобільного робота та результати дослідження .....         | 42 |
| 3.1 Розроблення технічного забезпечення системи управління рухом мобільного робота .....         | 42 |
| 3.2 Блок дистанційного управління рухом МР та система команд .....                               | 56 |
| 3.3 Блок інтелектуального автономного управління рухом МР з використанням нечіткої логіки .....  | 56 |
| 3.4 Методи та алгоритми інтелектуального автономного управління МР .....                         | 59 |

|  |    |
|--|----|
| 3.5 Моделювання руху МР при об'їзді перешкоди .....    | 61 |
| 3.6 Висновки до розділу 3 .....                        | 63 |
| Висновки .....   | 65 |
| Список використаних джерел .....                       | 68 |
| Додаток А Фрагмент коду програмного забезпечення ..... | 73 |
| Додаток Б Світлокопії виданих публікацій .....         | 87 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

МР – Мобільні роботи;

МПП – Модель послідовних геометричних перетворень;

RNN – Recurrent Neural Networks;

CNN – Конволюційні Convolutional Neural Networks;

ReLU – Rectified Linear Unit;

МПП – Модель послідовних геометричних перетворень;

БФНВ – Блок формування нечітких висновків;

ЛРМ – Лінійна регресійна моделі;

ЛР – Лінійна регресія;

БЛР – Блок лінійної регресії;

БП – Бази правил;

ЛЗ – лінгвістичних змінних;

ВМ – Вузол множення;

НЛ – Нечітка логіка.

ФАА – фазифікація, агрегування та активізація.

## ВСТУП

Складність технічних систем з кожним роком лишень зростає. Жорстка конкуренція на світових ринках збуту продукції стає все жорсткішою. Тому, розроблення технічних систем з кращими параметрами є життєво необхідною умовою сучасного виробництва. Використання теорії штучних нейронних мереж та нечіткої логіки дає змогу суттєво покращити параметри функціонування. Відповідно, магістерська робота на тему “Алгоритми прогнозування руху мобільного робота”, яка використовує теорію штучних нейронних мереж та нечіткої логіки є актуальною.

Метою магістерської роботи є підвищення ефективності прогнозування руху мобільного робота з використанням розроблених моделей та програмно-апаратних засобів. Для досягнення зазначеної мети необхідно розв’язати такі завдання:

- провести аналіз існуючих моделей та підходів до прогнозування руху мобільного робота;
- розробити математичне, алгоритмічне забезпечення та структуру системи прогнозування руху мобільного робота з використанням нечіткої логіки;
- розробити фізичну модель системи прогнозування руху мобільного робота;
- розробити програмні засоби прогнозування руху мобільного робота.

Відповідно, об’єктом дослідження – є процес прогнозування руху мобільного робота з використанням розроблених методів та моделей, а предметом дослідження – моделі, алгоритми та засоби прогнозування руху мобільного робота.

В процесі виконання магістерської роботи використані такі методи досліджень, а саме: системного аналізу; теорії нечіткої логіки та штучних нейронних мереж; об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вдосконаленні моделі управління мобільним роботом з використанням нечіткої логіки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні: структури системи прогнозування руху мобільного робота; алгоритмічного забезпечення, яке включає алгоритм руху мобільного робота на основі нечіткої логіки, фізичної моделі мобільного робота та отриманих результатів.

Матеріали магістерської роботи доповідалися на III Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі», 26 листопада 2025 р.

# 1 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ, МЕТОДІВ ТА ПРОГРАМНОГО ТА ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕНЬ

## 1.1 Аналіз підходів управління мобільними роботами

Автономне управління рухом мобільних роботів (МР) може здійснюватися з використанням декількох підходів [1, 2, 3]:

- реактивного;
- деліберативного;
- гібридного управління рухом та управління на основі поведінкових реакцій.

Управління рухом при використанні реактивного підходу може здійснюватись при русі МР в динамічному і неструктурованому середовищі. При цьому, формування сигналів управління здійснюється на основі інформації, яка надходить з давачів МР. Основним недоліком даного підходу при використанні нечіткої логіки для його розробки є те, що при управлінні рухом кожного разу здійснюється опрацювання всієї бази правил.

Підхід деліберативного управління ґрунтується на таких основних компонентах, як: сприйняття інформації, планування та дія. В такому випадку інформація з зовнішнього середовища використовується для прийняття рішення про рух МР. Недоліком такого підходу є те, що забезпечується управління рухом МР тільки в статичному середовищі та не забезпечується можливість руху в реальному часі, оскільки для планування руху МР здійснюються затрати часу.

Гібридний підхід управління рухом МР полягає в поєднанні реактивного і деліберативного підходів. При цьому основна проблема виникає в тому, як здійснюється поєднання цих підходів. Також до недоліків розроблення системи управління рухом МР з використанням даного підходу можна віднести складність адаптації до розв'язання нових задач.

Основна ідея підходу на основі поведінкових реакцій при реалізації методів управління рухом МР полягає в тому, що здійснюється поділ системи управління на певні блоки (модулі), що реалізують режими руху та можуть опрацьовуватись одночасно. Отже, поєднання даних режимів руху призводить до підвищення швидкодії системи управління та забезпечує можливість опрацювання 16 більш складних задач. Крім того, забезпечується адаптація системи управління рухом МР до виконання інших задач, що досягається додаванням додаткових блоків, що реалізують певні режими руху в систему управління.

При використанні методів нечіткої логіки база правил суттєво збільшується при збільшенні кількості вхідних чи вихідних змінних [4-6]. На основі цього можна зробити висновок, що ефективним рішенням є використання підходу на основі поведінкових реакцій при здійсненні управління рухом колісної робота засобами нечіткої логіки, що забезпечує ефективну реалізацію автономного руху в середовищі з статичними чи динамічними перешкодами [7-9].

При використанні підходу на основі поведінкових реакцій основною задачею є розроблення системи координації режимів руху. Існує велика кількість можливих реалізацій такої системи. Зокрема, в [10, 11] запропоновано здійснювати організацію певних модулів поведінки за рівнями - модулі поведінки, що мають вищий рівень виконуються в першу чергу. Основним недоліком даного підходу є те, що на кожному етапі здійснюється вибір лише одного модуля поведінки і в певних випадках така реалізація не є ефективною. Тобто, у випадку наявності перешкоди перед МР, її об'їзд може здійснюватись як справа так і зліва. При цьому не враховується положення цілі і, відповідно, не забезпечується мінімізація шляху при русі до цілі.

В [12] в кожен момент часу здійснюється вибір результуючого значення тільки одного режиму руху МР на основі нечіткої логіки. Це забезпечує

можливість оминання перешкод на шляху МР, але при цьому не здійснюється мінімізація траєкторії руху МР при русі до цілі.

В [13, 14] для реалізації кожного модуля поведінки запропоновано використовувати реактивний підхід, а визначення результуючого значення здійснювати зваженим додаванням. Основним недоліком такого підходу є те, що коефіцієнти, які використовуються для визначення результуючого значення повинні бути наперед визначеними. Тобто при зміні зовнішнього середовища чи при появі динамічних перешкод запропонована реалізація не буде ефективною.

В [15, 16] наведена схема арбітражу при якій кожен модуль поведінки може «проголосувати» «за» чи «проти» певних дій руху МР. При цьому, в певних випадках, забезпечується не оптимальний шлях до цілі. Тобто у випадку наявності перешкоди перед МР модуль поведінки, що реалізує об'їзд перешкоди може прийняти рішення рухатись в певну сторону. При цьому модуль поведінки, що реалізує рух до цілі може прийняти рішення рухатись в протилежний бік (у випадку якщо ціль знаходиться з іншої сторони). В такому випадку з використанням координатії модулів поведінки може бути прийняте компромісне рішення рухатись прямо, що може призвести до зіткнення МР з перешкодою.

В [17, 19] здійснюється координація окремих модулів поведінки МР з використанням нечіткої логіки. При цьому забезпечується врахування всіх модулів поведінки та одержання ефективного результату. До основних недоліків такого підходу відноситься те, що координація модулів поведінки виконується ефективно тільки при певних умовах руху МР.

На основі аналізу сучасних концепцій управління рухом колісних МР можна зробити висновок, що більшість існуючих підходів до управління рухом колісних МР не забезпечують виконання вимог щодо реалізації МР, зокрема роботу в реальному часі та забезпечення руху як в статичному так і в динамічному середовищах. При цьому найбільш ефективним є підхід на основі

поведінкових реакцій, який забезпечує можливість руху як в статичному так і в динамічному середовищах, а також можливість адаптації МР до виконання різних поставлених задач, що досягається шляхом введення до системи управління відповідних додаткових модулів.

Основною задачею, що виникає при такій реалізації є визначення результуючого значення шляхом вибору або поєднання окремих модулів поведінки, що реалізують режими руху МР. Як було показано, ефективним рішенням є використання нечіткої логіки для одержання результуючого значення шляхом поєднання різних модулів поведінки МР.

В основному, для забезпечення автономного руху МР до цілі в середовищі з наявністю перешкод використовується два режими управління: режими руху до цілі та об'їзду перешкод [20, 21], але крім того можуть використовуватись певні додаткові режими руху, наприклад рух вздовж стін.

Для реалізації режиму об'їзду перешкод використовують різноманітні вхідні дані. Наприклад кут (або різницю між значеннями кута напрямку до перешкоди і кута повороту МР відносно певної системи координат) та відстань до перешкоди [22]; відстань до перешкоди з давачів відстані МР [23] тощо. Крім того, вихідними даними можуть бути один з дозволених напрямків повороту [24] або значення забороненого напрямку [25].

Забезпечення режиму руху до цілі передбачає насамперед визначення цілі. В залежності від поставленої задачі ціль може визначатись по-різному. Наприклад, в [26] ціль позначена у вигляді маяку, сигнал з якого у вигляді напрямку на маяк передається в приймач, що розміщений на МР.

Також часто в якості вхідних змінних задаються координати цілі і початкові координати МР, як в [27] та [28] (на основі даних отриманих з відеокамери). Крім того, рух до цілі може здійснюватись тільки за кутом різниці між цільовим значенням та розміщенням робота і віддаллю до цілі як в [29]. В [30] використовуються 2 контролери нечіткої логіки, один з яких обчислює значення кута повороту МР, а другий – значення швидкості руху МР.

В [31] запропоновано здійснювати рух до рухомої цілі, що рухається за певною траєкторією. Цільовими точками, при цьому, є координати цілі, а в якості вхідних даних використовується різниця кута між цільовим і наявним значенням та похідна різниці кута, а вихідним значенням – кут повороту МР.

## 1.2 Особливості керування рухом робота на основі нейромережових технологій

Технології управління на основі принципів “чорної скриньки”, з використанням нейромережових структур, відкриває широкі перспективи для вирішення багатьох прикладних задач опрацювання інформації та управління. Так, результати проведених досліджень свідчать про можливість створення інтелектуальних нейромережових регуляторів для великого класу систем автоматичного управління, включаючи сервоприводи. Однак ієрархія управління складними технічними пристроями, автономно функціонуючими в екстремальних умовах, припускає наявність не тільки виконавчого (або приводного), але і тактичного, а також стратегічного рівнів планування доцільних дій і поведінки.

Складність завдань, що відносяться до компетенції верхніх рівнів системи управління, зумовлена необхідністю ідентифікації поточної ситуації на основі обробки, узагальнення та аналізу великих обсягів сенсорної інформації з наступним прийняттям адекватних управлінських рішень. При цьому вкрай гострою стає проблема мінімізації необхідних обчислювальних, а головне, часових затрат. У зв'язку з цим, застосування нейромережових технологій, що забезпечують високу швидкодію за рахунок паралельної обробки вхідних сигналів, становить значний інтерес для організації тактичного рівня управління.

Останні досягнення в галузі прикладного застосування нейромережевих структур дозволяють говорити про реальність переходу на абсолютно нову елементну базу для розробки інтелектуальних систем управління. Перспективність даного напрямку зумовлена можливістю навчання штучних нейромереж заданому принципу функціонування. Тоді, за наявності відповідних методик, уніфікована нейромережева структура може бути оперативно налаштована на досягнення заданих цілей і таких важливих параметрів якості управління, як висока точність і оптимальна швидкодія при мінімальних енергетичних затратах.

### 1.3 Аналіз нейромереж для реалізації засобів відновлення втрачених навігаційних даних у МР

Вибір нейромережі для реалізації засобів відновлення втрачених навігаційних даних у МР передбачає аналіз та порівняння сильних та слабких сторін існуючих нейромереж. На основі аналізу необхідно вибрати конкретну нейромережу для реалізації засобів відновлення втрачених навігаційних даних, які відповідають вище перерахованим вимогам.

Основна маса зусиль розробника, який використовує нейронні мережі в своїх дослідженнях та побудові технічних систем для відновлення втрачених навігаційних даних в процесі синтезу робототехнічних систем полягає у:

- виборі вхідних даних для навчання нейромережі;
- синтезі архітектури нейронної мережі;
- побудові тестової вибірки та її наповнення;
- дослідження та вибір методу навчання синтезованої нейромережі.

Для відновлення втрачених навігаційних даних у МР необхідно відповідним чином налаштувати нейронну мережу. В процесі налаштування

штучної нейронної мережі тренувальну вибірку вхідних даних поділяють на три підвибірки:

- вибірку на якій виконується навчання мережі;
- вибірку, яка використовується для перевірки та валідації побудованої моделі на основі неромережі;
- тестову вибірку.

Процес налагодження нейромережі передбачає виконання багаторазового навчання з різними параметрами структури. За допомогою валідаційної вибірки необхідно зробити оцінку якості та обрати оптимальний варіант архітектури нейронної мережі. Тестова множина вхідних даних дає можливість випробувати вибрану точність налаштування та навчання штучної нейронної мережі. Визначальним фактором вибору архітектури нейромережі, яка найбільш відповідає вимогам відновлення втрачених навігаційних даних є критерій моделі оптимальної складності. Не всі штучні нейронні мережі, вимагають виконання дії налаштування, а саме: архітектура яких визначається структурою векторів даних. Прикладом такої нейромережі є одношаровий перцептрон.

Визначальними параметрами навчання нейронної мережі є досконалість набору вагових коефіцієнтів та інших параметрів і час, який необхідно затратити на навчання. Часто ці параметри є взаємно виключними і їх підбір реалізується з врахуванням вимог, що впливають з постановки задачі.

Для відновлення втрачених навігаційних даних у МР в основному використовуються такі нейронні мережі:

- рекурентні (RNN, Recurrent Neural Networks);
- конволюційні (Convolutional Neural Networks, CNN);
- гібридні нейромережі;
- нейромережі на основі парадигми модель послідовних геометричних перетворень (МППП).

Рекурентні нейронні мережі RNN використовуються для обробки часових рядів та послідовностей. Нейронні мережі RNN відрізняються від звичайних нейронних мереж тим, що мають петлі зворотного зв'язку, що дозволяє зберігати інформацію про попередні елементи послідовності. Це робить їх корисними для задач відновлення втрачених даних, в яких попередні дані впливають на поточний стан. Оскільки навігаційні дані мають часову та послідовну природу, то нейронні мережі RNN враховують взаємозв'язки між попередніми і наступними елементами послідовних вимірювань. Ця особливість дозволяє прогнозувати та відновлювати втрачені елементи в послідовності, спираючись на наявні дані. Завдяки механізму зворотного зв'язку, RNN здатні зберігати контекст попередніх елементів, що дозволяє моделі відновлювати втрачені дані на основі аналізу попередніх і наступних елементів у послідовності.

Мережа RNN для відновлення втрачених значень навчається на наявних неповних даних із "пропусками". У процесі навчання нейронна мережа вивчає закономірності в даних, що дозволяє їй відновлювати відсутні елементи з високою точністю. У випадках, коли є пропущені дані (наприклад, вхідні дані зі сенсорів, що мають пропуски), RNN можуть використовуватися для заповнення цих прогалів, навчившись на закономірностях у наявних даних.

Особливістю RNN є орієнтація їх на роботу з часовими рядами та на відновлення даних на основі попередніх значень. Для ефективного відновлення втрачених даних нейромережа RNN вимагає великої кількості даних для тренування.

Конволюційні нейронні мережі, як правило, використовують для дослідження зображень або сенсорних даних, таких як карти місцевості або дані камер. Вони ефективно виділяють ознаки з високорівневих представлень простору даних. Основними компонентами архітектури CNN є: вхідний шар, на який надходять вхідні дані; конволюційний шар, який використовує кілька згорткових фільтрів (конволюційні ядра); шар активації, який використовує

функцію активації ReLU (Rectified Linear Unit); шар підвибірки, де використовується макспулінг (Max Pooling) і усереднюючий пулінг (Average Pooling), які допомагають зменшити кількість параметрів і запобігти перенавчанню; повнозв'язний шар, де кожен нейрон з'єднаний з кожним нейроном попереднього шару; вихідний шар, який використовує функцію активації Softmax або Sigmoid для класифікації та регресії. Нейромережі CNN добре справляються з обробкою та інтерпретацією даних зображень, що може бути корисно для МРП, які використовують камери для навігації. Вони є інваріантними до зміни масштабу, позиції та добре адаптуються до змін у вигляді вхідних даних. Недоліком нейромереж CNN є великий обсяг даних, необхідний для якісного навчання CNN, що не завжди є доступним у випадку МР.

Гібридні підходи поєднують класичні методи фільтрації та нейронні мережі для покращення результатів. Наприклад, фільтр Калмана може використовуватися для початкової оцінки стану, тоді як нейромережа може допомагати в прогнозуванні складних випадків. Комбінація класичних методів з нейромережами забезпечує досягнення високої точності та стабільності, особливо коли одні методи доповнюють інші. У гібридних системах нейронні мережі швидко навчаються та адаптуються до нових умов. Недоліком гібридних систем є складність налаштування та реалізації, оскільки вони вимагають значних обчислювальних ресурсів у наслідок необхідності поєднання кількох методів обробки даних.

Нейромережі, які базуються на концепції “Моделі послідовних геометричних перетворень” (МПП) характеризуються швидкодією, точністю, циклічністю, та дають можливість аналізувати і опрацьовувати величезні набори даних (Big Data). Концепція МПП ґрунтується на неітераційному методі навчання нейроподібної мережі, при якому безпосередньо на нейронах прихованого шару розраховують значення вагових коефіцієнтів, при послідовному скороченні розмірності простору вхідних даних, які

характеризуються набором характеристик. Таким чином, реалізується подання вхідних багатовимірних даних в ортогональному базисі (відносно набору взаємно перпендикулярних векторів), для ефективного аналізу, стиснення та опрацювання даних, що здійснюється на основі неітераційного алгоритму найвіддаленішої точки.

Нейронні мережі, які ґрунтуються на концепції МПГП характеризуються рядом переваг:

- висока швидкість навчання, ефективне та продуктивне опрацювання даних;
- достовірність, надійність та відтворюваність результатів;
- можливість оперування як обмеженим набором даних, так і великими наборами даних (Big Data).

Для реалізації засобів відновлення втрачених даних доцільно використати нейроподібні мережі на основі парадигми МПГП оскільки вони мають такі переваги:

- здатність адаптуватися до складних і різноманітних типів даних, що забезпечує точніше відновлення втрачених даних, які можуть мати нерегулярні та фрагментовані структури;
- забезпечують відновлення значних втрат даних, оскільки геометричні перетворення дозволяють реконструювати вихідну інформацію на основі наявних фрагментів;
- просто масштабуються, що дозволяє нейроподібним мережам адаптуватися до задач різного розміру – від локальних перетворень до глобальних;
- менш чутливі до шуму у вхідних даних, оскільки перетворення можуть допомагати відокремлювати корисну інформацію від випадкових флуктуацій або перешкод;
- забезпечує оптимізацію обчислювальних процесів, що знижує навантаження на апаратне забезпечення і підвищує швидкість роботи мереж.

## 1.4 Формулювання вимог та вибір принципів реалізації блоків управління рухом МР

Аналіз показує, що в останні роки стрімко зростає роль МР, що вимагають впровадження нових систем керування, забезпечення захисту передачі даних тощо. Виходячи з цих особливостей загальними технологічними тенденціями їх розвитку є:

- інтелектуалізація;
- мініатюризація;
- зниження енергоспоживання;
- багатофункціональність;
- автономність;
- зниження ваги.

Спостерігається стрімкий розвиток і впровадження засобів робототехніки у промисловості. Повна автоматизація багатьох процесів на підприємствах допомагає значно підвищити показники продуктивності, сприяє збільшенню обсягів виробництва.

Усунення людського фактору дає змогу уникнути можливих помилок та неточностей при виконанні різних операцій. Саме МР відіграють значну роль при автоматизації транспортування предметів та спеціального устаткування. Робототехнічний пристрій, оснащений різними системами маніпуляції, забезпечує розширенню функціональних можливостей, а мобільні роботи сприяють прискоренню виробничих процесів та підвищенню безпеки, особливо на небезпечних ділянках.

Вимоги до мобільних роботів варіюються залежно від напрямку їхнього використання. Функціональні потреби та умови експлуатації визначають індивідуальний набір необхідних характеристик для кожного типу мобільних роботів:

- у військовій сфері ключовими вимогами є надійність, простота управління та здатність здійснювати специфічні бойові завдання;
- для ліквідації надзвичайних катастроф та роботи в екстремальних умовах пріоритетом є здатність зберігати функціональність та працездатність в умовах високих температур, радіації, паводку;
- роботи для промисловості чи для побуту мають бути надійними, простими в експлуатації та доступними по ціні.

Саме тому, є певні вимоги, що висувають до блоків управління рухом мобільних роботів:

- аналізувати дані та вносити зміни у режимі реального часу для організації управління рухом;
- безперебійне функціонування, безвідмовна робота та стійкість системи до збоїв;
- оптимізація проходження маршруту за критеріями часу і відстані;
- уникнення зіткнень з перешкодами, їх автоматичне оминання;
- незалежність алгоритму підтримки руху МР від зовнішнього середовища і його стану;
- використання сучасних засобів передачі відеоданих і команд управління;
- мінімізація маси та габаритів;
- мінімізація енергоспоживання.

Для забезпечення вказаних вимог реалізацію блоків управління рухом МР доцільно здійснювати на основні наступних принципів:

- модульності, що передбачає реалізацію компонентів у вигляді функціонально завершених вузлів;
- відкритості, який враховує можливість доповнення і оновлення апаратних або програмних засобів без порушення логіки їх роботи;
- спеціалізації та адаптації апаратно-програмних засобів до структури даних і алгоритмів їх опрацювання;

– використання при розробці блоків управління рухом комплексу базових проектних рішень та готових промислових модулів окремих вузлів.

Розроблення МР потребує суттєвого опрацювання технологій, необхідних для створення усієї номенклатури апаратних та програмних засобів. Наприклад, типовий зразок платформи може бути представлений у вигляді сукупності функціонально пов'язаних елементів. Зокрема:

– базовий носій – шасі призначене для пересування у різних середовищах;

– спеціалізоване навісне або вбудовуване обладнання у реалізації набору знімних модулів корисного навантаження;

– засоби забезпечення та обслуговування, що використовуються при підготовці до застосування та технічної експлуатації платформи.

Склад обладнання базового носія виходячи з функціонального призначення робота повинен включати:

– засоби інтелектуального керування;

– навігаційні пристрої;

– засоби орієнтування на місцевості;

– спеціальне обладнання для забезпечення автономного пересування;

– засоби захищеної комунікації;

– спеціалізовані обчислювачі з програмно-алгоритмічним забезпеченням.

Можливе використання додаткових засобів радіоелектронної боротьби та захисних засобів.

Забезпечення та обслуговування МР реалізується комплексом додаткового устаткування:

– пункт управління, контролю та обробки інформації;

– засоби доставки, транспортування та підготовки;

– засоби спорядження, заправки та зарядки.

Аналіз показує, що особливостями системи управління МР є функціонування у реальному часі у динамічно мінливому середовищі:

- асинхронна взаємодія та реакція на зовнішні події;
- управління приводами та рухом, зняття даних із датчиків, динамічна побудова моделі оточуючого середовища тощо;
- одночасне відпрацювання різних завдань;
- використання принципу ієрархічності, коли верхні рівні управління працюють все з більш абстрактним представленням зовнішнього середовища;
- принцип декомпозиції та інкапсуляції, коли система управління функціонує як набір взаємодіючих компонентів за принципом клієнт/сервер, видавець/передплатник тощо.

На етапі реалізації окремі рівні робототехнічної платформи можуть бути виконані з використанням різних парадигм програмування.

Шасі платформи реалізовано у колісному варіанті. Перевагами такого варіанту є: простота програмування, швидкість, мобільність, збірка механізму та адаптація до потреб користувача, а також досить висока прохідність. Стандартний варіант – чотири колеса, з можливістю зміни такої кількості, в залежності від потреб користувача. Кожна з платформ має свої недоліки та переваги.

Застосована повнопривідна версія з чотирма ведучими колесами. Вона оптимальна для МР внаслідок простоти реалізації та можливості виконання широкого спектру завдань у складних умовах рельєфу. Чотириколісна база з усіма ведучими колесами виконана у варіанті з мотор-редукторами. Забезпечується висока вантажопідйомність, точність маневрування та простота керування.

Привід включає двигун, трансмісію, колеса та систему управління, яка забезпечує роботу приводу. Для її функціонування використано цифрову систему управління з широтно-імпульсною модуляцією для забезпечення плавного керування двигунами та зниження втрат на регулюючих елементах. У якості приводів застосовано електричні двигуни постійного струму, які

забезпечують зручність в управлінні та експлуатації, точне позиціонування. Власне система керування двигунами МР призначена для забезпечення виконання команд, що передаються з вищих рівнів управління системою і перетворення їх у послідовність електричних імпульсів ШІМ, що безпосередньо подаються на електроприводи. Застосування управління з використанням широтно-імпульсної модуляції реалізовано шляхом використання сучасної силової електроніки на базі IGBT транзисторів, що дає змогу значно спростити схемотехніку та використовувати наявні промислові модулі.

Більшість сучасних МР використовують інтерактивне управління з використанням технологій обчислювального та штучного інтелекту. Особливістю МРТП є здатність до адаптації до зовнішнього середовища, що вимагає включення інтелектуальних датчиків і систем технічного зору.

## 1.5 Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз існуючих підходів управління мобільними роботами та визначимо їх переваги та недоліки.

2. Проведено аналіз нейромереж та особливостей використання для управління мобільними роботами.

3. Сформульовано вимоги та обрано принципи реалізації системи управління рухом МРТП, що вимагають забезпечення управління рухом у режимі реального часу, забезпечення високої надійності та відсутність збоїв в роботі апаратури та програмного забезпечення, оптимізації проходження маршруту за критеріями часу і відстані, уникнення зіткнень з перешкодами, їх автоматичне оминання, незалежність алгоритму підтримки руху МРТП від зовнішнього середовища і його стану, мінімізації масо-габаритних показників та енергоспоживання.

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОМ З ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

### 2.1 Модель та алгоритм нечіткого управління рухом робота

З теорії нечіткого управління відомо, що реалізація методів нечіткого логічного виведення потребує виконання п'яти кроків. В роботі, запропоновано замінити етапи акумулювання та дефазифікації на обчислення значення множинної лінійної регресійної моделі (ЛРМ), що дасть змогу зменшити обчислювальні ресурси в процесі покращення ефективності управління мобільним роботом.

Синтезовано модель на основі нечіткої логіки для управління переміщення мобільного робота. Побудована модель, окрім того, використовує лінійну регресію, що дає змогу зменшити обчислювальну складність алгоритму управління мобільним роботом. В загальному випадку, синтезована модель включає ряд основних блоків, які взаємодіючи між собою генерують керуючий сигнал. Приклад схеми моделі зображено на рис. 2.1, де:

БФНВ – блок моделі, який синтезує нечіткі висновки;

БЛР – блок реалізації операції лінійної регресії (ЛР);

$x_1, \dots, x_n$  – вхідні параметри керування мобільним роботом;

$F_{y1}, \dots, F_{yq}$  – вихідні значення параметрів блоку синтезу нечітких висновків;

$u$  – обчислене значення величини сигналу керування мобільним роботом.

Алгоритм реалізації розробленої нечіткої моделі управління рухом робота виконується за три основних кроки:

Крок 1. Початок та введення вхідних даних та перевірка їх коректності;

Крок 2. Подати вхідні дані на блок формування нечітких висновків;

Крок 3. Реалізація операції блоком формування нечітких висновків фазифікації та агрегування;

Крок 4. Виконання операції активізації блоком формування нечітких висновків;

Крок 5. Отримані величини значень  $F_{y_1}, \dots, F_{y_q}$  з використанням блоку формування нечітких висновків на вхід блок лінійної регресії;

Крок 6. Визначення величини сигналу керування мобільним роботом  $y$  з використанням блоку лінійної регресії.

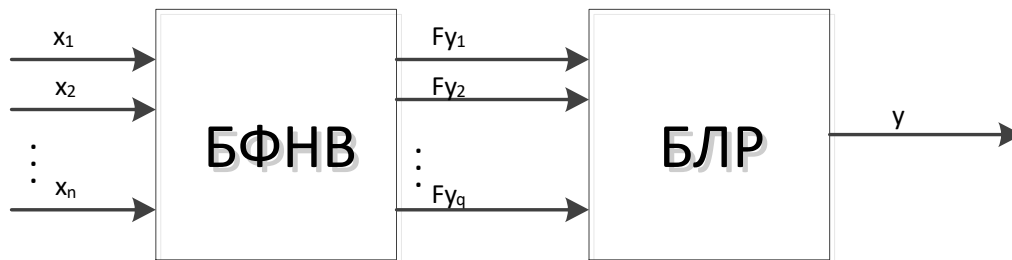


Рисунок 2.1 – Загальна структура схеми взаємодії основних блоків розробленої нечіткої моделі управління рухом робота

В процесі керування мобільним роботом з використанням побудованої моделі на основі нечіткої логіки необхідно розв’язати такі основні задачі: знаходження коефіцієнтів множинної лінійної регресійної моделі та обчислення значень сигналів управління при функціонуванні.

На першому кроці необхідно побудувати базу правил, що містить множину нечітких правил. Складність реалізації цього кроку полягає в забезпеченні необхідної кількості та несуперечності нечітких правил, які б повністю писали усі можливі випадки в процесі розв’язання сформульованої задачі та коректно відображали мету управління. При побудові бази правил (БП) спочатку виділяються в кожній вихідній лінгвістичній змінній певні терми і задаються функції належності. Далі для кожного терму вихідної лінгвістичної змінної формулюється правило, використовуючи логічну кон’юнкцію або логічну диз’юнкцію.

У більшості випадків, правила нечіткої логіки складаються з двох частин:

умов та заключень. Щоб охопити всі можливі випадки при реалізації управління, кількість правил в базі визначається за формулою (2.1):

$$L = T^N, \quad (2.1)$$

де  $L$  – кількість правил;

$N$  – кількість вхідних змінних;

$T$  – кількість термів вхідних змінних.

Після побудови бази правил в БФНВ, обчислюють величини функції належності для кожного з висновків БП  $F_{y1}, \dots, F_{yq}$ . Обчислення в БФНВ виконується для етапів: фазифікації, агрегування та активізації.

На етапі фазифікації виконується перетворення чітких значень параметрів у вихідні нечіткі.

Етап агрегування полягає в визначенні степеня істинності умов по кожному з правил системи нечіткого виведення. В залежності від того, як задані правила в базі правил, на цьому етапі знаходиться степінь істинності умов бази правил. При цьому, залежно від форми представлення правил, обчислюються логічні кон'юнкції або диз'юнкції, що є бінарними логічними операціями з результатом у вигляді нечіткого висловлювання, істинність якого визначається за формулами [32, 33, 34]. Найбільш поширеними операціями при обчисленні істинності результату на основі логічної кон'юнкції є:

- операція обчислення мінімуму

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)); \quad (2.2)$$

- операція обчислення алгебраїчного добутку

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y); \quad (2.3)$$

- операція обчислення граничного добутку

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max(\mu_A(x) + \mu_B(y) - 1, 0), \quad (2.4)$$

- операція обчислення драстичного добутку

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \begin{cases} \mu_B(y), & \text{якщо } \mu_A(x) = 1 \\ \mu_A(x), & \text{якщо } \mu_B(y) = 1, \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (2.5)$$

де  $A$  і  $B$  – нечіткі множини.

Для обчислення значень істинності нечіткого висловлювання на основі операції логічної кон'юнкції вибрано операцію обчислення мінімуму.

Найбільш поширеними формулами для обчислення істинності результату на основі логічної диз'юнкції є:

- операція обчислення максимуму

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)); \quad (2.6)$$

- операція обчислення алгебраїчної суми

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) + \mu_B(y) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(y); \quad (2.7)$$

- операція обчислення граничної суми

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(\mu_A(x) + \mu_B(y), 1); \quad (2.8)$$

- операція обчислення драстичної суми

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \begin{cases} \mu_B(y), & \text{якщо } \mu_A(x) = 0 \\ \mu_A(x), & \text{якщо } \mu_B(y) = 0. \\ 1, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (2.9)$$

Для обчислення значень істинності нечіткого висловлювання на основі операції логічної диз'юнкції вибрано операцію обчислення максимуму.

На етапі активізації здійснюється знаходження степеню істинності заключень для кожного правила з БП. Кожне правило пов'язане з заданим певним ваговим коефіцієнтом. Якщо він не заданий явно – то його значення приймається рівним 1. Степінь істинності заключень кожного правила обчислюється алгебраїчним добутком вагового коефіцієнта на степінь істинності умов бази правил, знайденого на етапі агрегування.

Визначення функцій належності кожного з заключень для вихідних лінгвістичних змінних (ЛЗ) здійснюється за формулами:

– min-активізація

$$\mu_C(Z) = \min(c_i, \mu_{A \rightarrow B}(x, y)); \quad (2.10)$$

– prod-активізація

$$\mu_C(Z) = c_i \cdot \mu_{A \rightarrow B}(x, y); \quad (2.11)$$

– average- активізація

$$\mu_C(Z) = 0,5 \cdot (c_i + \mu_{A \rightarrow B}(x, y)). \quad (2.12)$$

При визначенні функцій належності кожного з висновків для вихідних ЛЗ прийнято рішення щоби застосувати min-активізацію.

В результаті виконання етапів фазифікації, агрегування та активізації в БФНВ отримуються значення  $F_{y1}, \dots, F_{yq}$ .

Знаходження значення вихідної змінної сигналу управління здійснюється з допомогою множинної ЛРМ, що реалізовується в БЛР. В загальному випадку така модель представляється згідно з виразом (2.13) [35]:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon \quad (2.13)$$

де  $a_0, \dots, a_n$  – коефіцієнти ЛРМ;

$X_1, \dots, X_n$  – вхідні параметри;

$Y$  – вихідний параметр.

В розробленому методі керування, модель множинної ЛР можна записати у наступному форматі:

$$y = a_0 + a_1Fy_1 + \dots + a_qFy_q, \quad (2.14)$$

де  $a_0, \dots, a_q$  – коефіцієнти ЛРМ;

$Fy_1, \dots, Fy_q$  – величини значень функцій належності кожного з висновків БП;

$y$  – вихідний параметр управління.

Визначення величин коефіцієнтів даного рівняння можна проводити різними методами:

- методом максимальної правдоподібності,
- підхід на основі методу найменших квадратів,
- підхід на основі найменших модулів,
- методом моментів тощо.

Запропоновано використовувати метод найменших квадратів, оскільки він є найбільш простим для обчислення та не накладає обмежень на врахування нелінійності взаємозв'язків вхідних і вихідних змінних.

На другому кроці обчислюються вихідні значення ЛРМ  $y$  з використанням імітаційної моделі. Згідно з розробленою структурою засобів управління рухом з врахуванням значень характеристик робота, що наведена на

рис.2.1, використання побудованого нечіткого методу здійснюється для обчислення кута повороту робота в кожному режимі руху, для визначення коефіцієнтів активації, для обчислення кута повороту мобільного робота з врахуванням характеристик робота та для визначення швидкості руху робота.

Величину вихідної змінної управління кожного режиму переміщення розраховують через 3 терми вихідної ЛЗ  $y_i$ , що обчислює кут повороту мобільного робота. Відповідно формулу (2.14) можна переписати у наступній формі:

$$y_i = a_0 + a_1 Fy_1 + a_2 Fy_2 + a_3 Fy_3, \quad (2.15)$$

де  $a_0, a_1, a_2$  і  $a_3$  – коефіцієнти рівняння ЛР;

$Fy_1, \dots, Fy_3$  – значення параметрів, які отримуємо після виконання етапів фазифікації, агрегування та активізації (ФАА).

Величини коефіцієнтів активації ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) обчислюються з використанням вхідних змінних – значення відстані до перешкоди та різницю кутів між вектором ходу мобільного робота та напрямком руху на визначену ціль.

В результаті подання вхідних змінних в БФНВ та проходження етапів ФАА знаходять величини  $Fn_1, \dots, Fn_m$ . Для визначення величини вихідної змінної, що характеризує коефіцієнт активації застосовують 5 термів вихідної ЛЗ  $T_i$ . Визначення  $T_i$  виконується згідно формули (2.16):

$$T_i = b_0 + b_1 Fn_1 + b_2 Fn_2 + b_3 Fn_3 + b_4 Fn_4 + b_5 Fn_5, \quad (2.16)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  і  $b_5$  – коефіцієнти рівняння ЛР;

$Fn_1, \dots, Fn_5$  – одержані значення після операцій ФАА.

Для розрахунку результуючого кута повороту робота, необхідно обчислити величини кутів повороту різних режимів руху та знайти коефіцієнти активації відповідних режимів.

Через значення вхідних змінних (величина кута повороту та значення характеристик робота) можна розрахувати значення оновленого кута повороту мобільного робота.

Розрахунок значення вихідної змінної кута повороту робота проводим з застосуванням 9 термів, згідно формули (2.17):

$$M = c_0 + c_1 * Fm_1 + c_2 * Fm_2 + c_3 * Fm_3 + c_4 * Fm_4 + c_5 * Fm_5 + c_6 * Fm_6 + c_7 * Fm_7 + c_8 * Fm_8 + c_9 * Fm_9 , \quad (2.17)$$

де  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$  – коефіцієнти рівняння ЛР;

$Fm_1, \dots, Fm_9$  – одержані значення після операцій ФАА.

Визначення величини значення змінної швидкості мобільного робота застосовують вхідні ЛЗ, а саме: значення віддалі до перешкод, цілі та ЛЗ, що позначає кут повороту мобільного робота. Вихідна ЛЗ містить 3 терми і визначається за формулою, яка подана нижче:

$$V = d_0 + d_1 * Fv_1 + d_2 * Fv_2 + d_3 * Fv_3 , \quad (2.18)$$

де  $d_0, d_1, d_2, d_3$  – коефіцієнти для рівняння ЛР;

$Fv_1, \dots, Fv_3$  – одержані значення після операцій ФАА.

На етапі управління мобільним роботом вхідні значення поступають на вхід БФНВ. В результаті, подальше виконання етапів ФАА одержуємо значення функцій належності для кожного з виводів БП, число яких рівне числу термів вихідної ЛЗ. Вихідні значення підставляються в рівняння лінійної регресії, з якого отримується шукане значення.

## 2.2 Схема реалізації алгоритму формування сигналу управління роботом

Оскільки розроблена вдосконалена система управління рухом робота містить 4 режими руху робота та блок вибору режимів руху містить 4 блоки визначення коефіцієнтів активації для кожного режиму роботи, а також блок управління швидкістю та блок врахування значень характеристик робота, то для отримання вихідного значення управління робота необхідно знайти значення коефіцієнтів 10 рівнянь моделі на основі лінійної регресії. Схема реалізації алгоритму формування сигналу управління робота представлена на рисунку 2.2.

Наведена на рисунку 2.2 схема реалізації алгоритму висвітлює, що для кожного режиму керування рухом, для визначення значень коефіцієнтів активації режимів руху, для визначення величини значення швидкості мобільного робота та перерахованого значення кута його повороту з врахуванням значень характеристик робота розробляється окрема реалізація нечіткого методу керування переміщенням мобільного робота. При цьому, пошук результуючих значень  $y_1, y_2, y_3$  і  $y_4$  та значень коефіцієнтів активації  $T_1, T_2, T_3$  і  $T_4$ , а також значень швидкості робота  $V$  та перерахованого кута повороту  $M$  можна здійснювати паралельно.

На рисунку 2.2 зображено такі основні блоки:

ВМ – вузол множення, де здійснюється перемноження коефіцієнтів активації та відповідних кутів повороту для кожного окремо взятого режиму переміщення мобільного робота;

$\Sigma$  – блок обчислення суми значень відповідних кутів повороту з коефіцієнтами активації.

В результаті одержується оновлений кут повороту робота та відповідна швидкість руху МР.

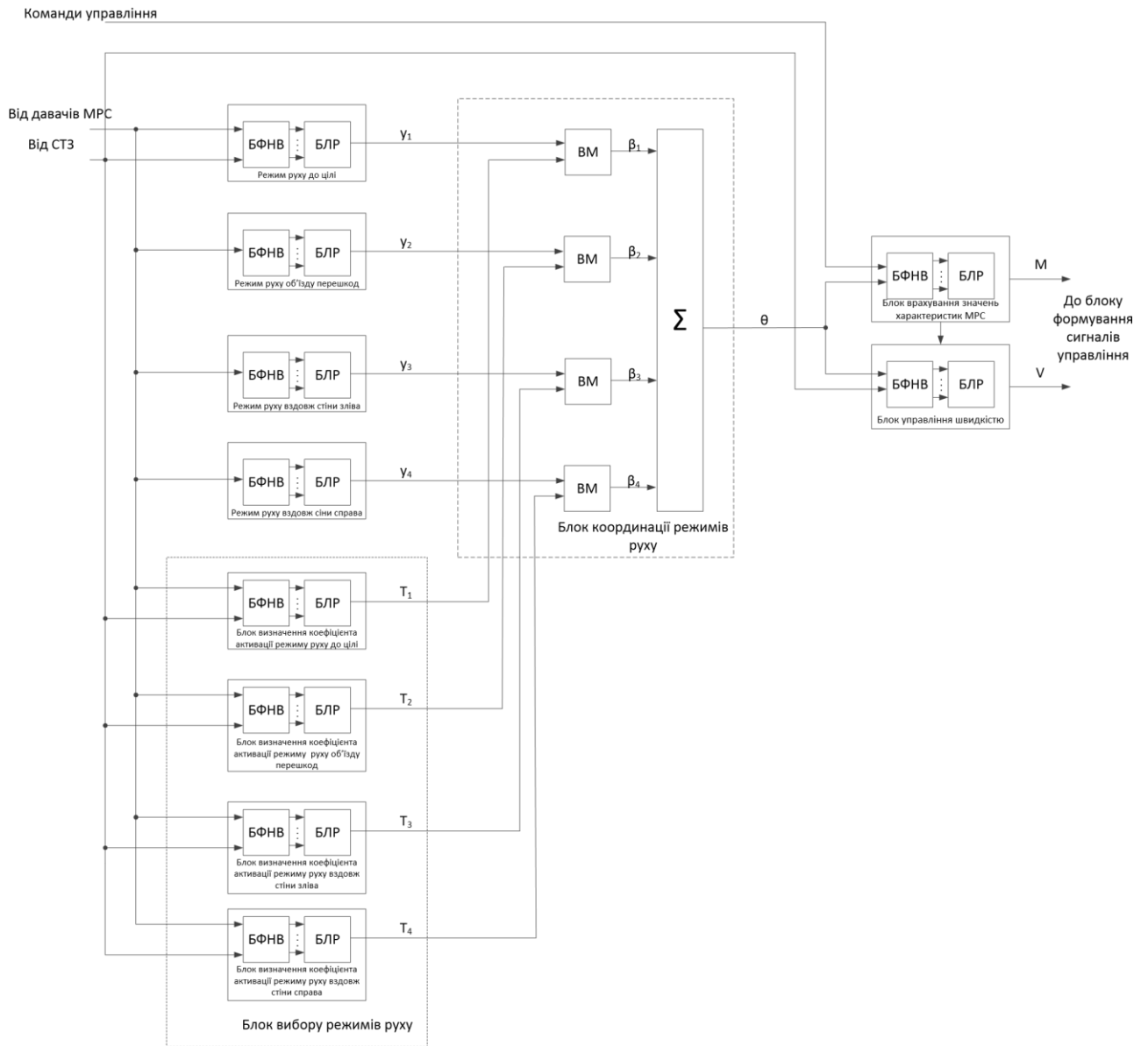


Рисунок 2.2 – Схема реалізації алгоритму формування сигналу управління  
робота

### 2.3 Розроблення структури системи управління рухом мобільного робота

З розвитком сучасних технологій – безперервно вдосконалюються пристрої, які здатні самостійно виконувати завдання без участі людини; переміщуватись, використовуючи для цього інтегровані датчики для навігації,

сенсори для виявлення перешкод та прокладання маршрутів. Такі мобільні роботи можуть дистанційно діяти в небезпечних, несприятливих для людини екологічних умовах чи важкодоступних ділянках, для ліквідації техногенних аварій, проводити пошук, розпізнавання та переміщення об'єктів, розвідку чи розмінування речей. Для успішної навігації МР використовується інтелектуальна система управління, яка повинна вміти будувати маршрут та управляти параметрами руху (задавати швидкість руху та кути повороту).

Робота такої інтелектуальної системи управління ґрунтується на інформації від давачів про оточуюче середовище, її аналізі та інтерпретації, а також на постійному відслідковуванні власних координат. У системі керування навігацією та рухом МР може використовуватися як пасивна, так і активна навігація. При пасивній навігації використовується інформація про власні координати та інші характеристики руху МР, яка надходить від зовнішніх джерел, а при активній навігації власні координати визначаються виключно за допомогою пристроїв розміщених на МР.

Структура системи керування рухом мобільного робота подана на рисунку 2.3.

Із рисунку 2.3 видно, що для керування рухом колісної мобільного робота можуть використовуватися такі види управління:

- дистанційне;
- інтелектуальне гібридне;
- інтелектуальне автономне.

Дистанційне управління рухом МР призначено для приймання, аналізу команд дистанційного управління від оператора та формування управляючих сигналів для системи руху (приводи). Особливістю дистанційного управління рухом МР є:

- постійний канал зв'язку від людини-оператора до робота, в режимі реального часу, для передачі команд та контролю;

- ефективне функціонування робота можливе тільки в межах ділянки, стабільної роботи каналу зв'язку;
- робот підпорядковується командам людини-оператора і діє тільки в межах запрограмованих дій;
- дистанційне управління та перешкоди для зв'язку зумовлюють затримки при передачі команд управління;
- в людино-машинних системах, під впливом "людського фактора" (вдома, розсіяння уваги) спричиняють помилки та неправильні дії.

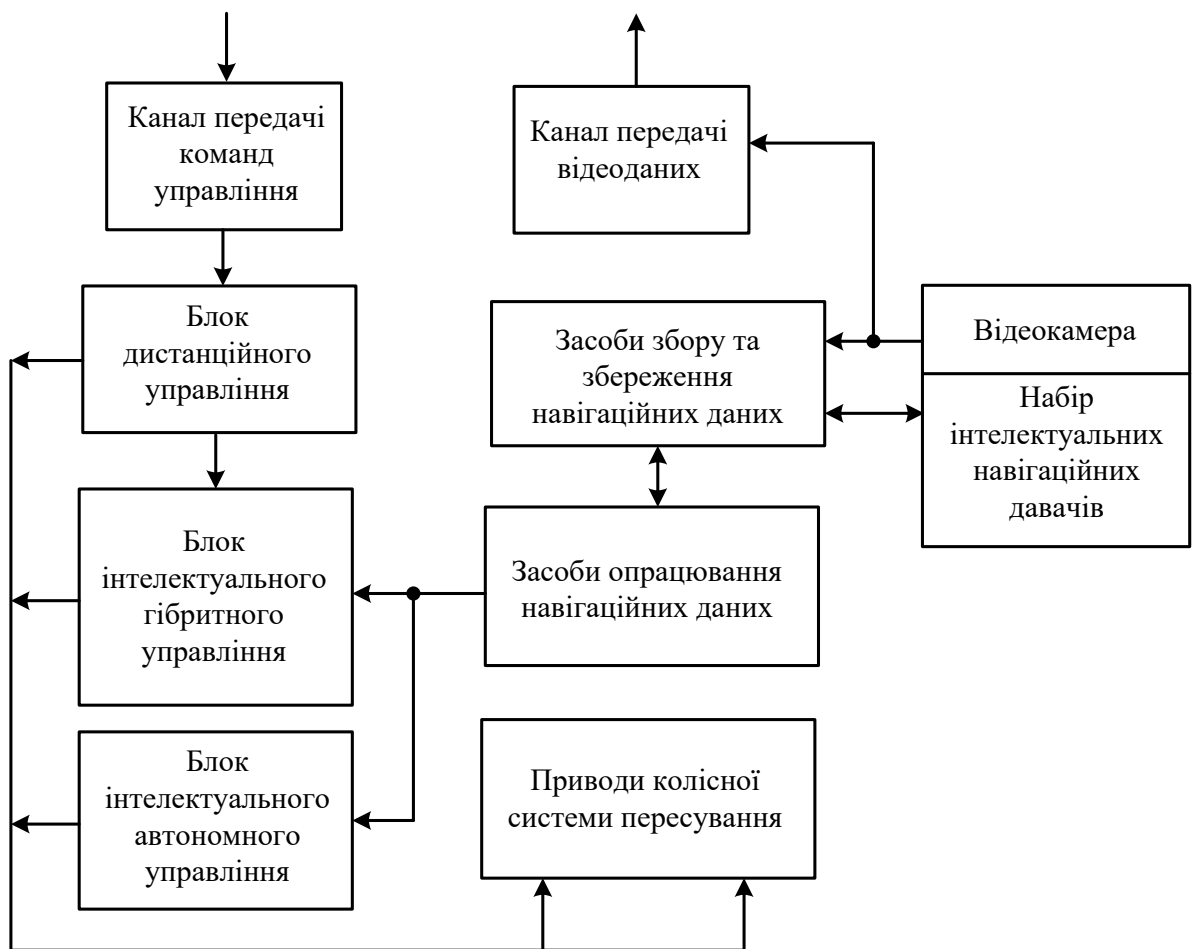


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи управління рухом мобільного робота

Для інтелектуального автономного управління рухом МР необхідно забезпечити моделювання оточуючого середовища з різним ступенем

деталізації, локалізацію місця положення МР, контроль руху, виявлення та уникнення перешкод.

Блок інтелектуального автономного управління виконує аналіз оточуючого середовища, забезпечує розпізнавання зображень і сцен, визначення перешкод і можливості руху по заданій ділянці шляху та формує сигнали управління для приводів системи руху. Однією із основних функцій МР є забезпечення надійності руху від початкової позиції до визначеного місця і у зворотному напрямку. Для реалізації інтелектуального автономного управління рухом МР в її склад повинні входити набір датчиків вимірювання віддалі широкого діапазону вимірювання відстані до близьких та віддалених об'єктів, засоби збору та зберігання навігаційних даних, програмно-апаратні засоби інтелектуального опрацювання, моделювання та виявлення перешкод.

Щоби забезпечити ефективне переміщення мобільного робота доцільно використовувати інтелектуальне гібридне управління, яке об'єднує переваги як дистанційного, так і інтелектуального автономного управління. Недоліком даного керування переміщення є те, що воно працює лише в радіусі дії каналу зв'язку.

#### 2.4 Розроблення програмних засобів для оцінки розробленої моделі

Програмні засоби розроблені з використанням мови програмування C#. При цьому, було використано середовище швидкого розроблення програмних продуктів Visual Studio.

На першому етапі здійснюється налаштування параметрів робота та середовища. Зокрема, серед параметрів робота вказується довжина, ширина, маса і колія коліс робота, а також координати і початковий кут робота. Серед параметрів робота вказується тип середовища (з статичними чи динамічними перешкодами, або середовище без перешкод), вказується коефіцієнт тертя та

ширина і довжина самого середовища, в якому здійснюється моделювання руху робота. Крім того, задаються координати цілі робота та те чи ціль є статична чи динамічна. При виборі динамічної цілі чи динамічного середовища з'являється можливість задати швидкість та напрямок руху перешкод і цілі, а також коли здійснюється початок їх руху. Крім того, вказується кількість перешкод та задаються координати кожної перешкоди. На рисунку 2.4 наведено вікно налаштувань програмного комплексу.

Після того, як всі налаштування вибрано, їх збереження необхідно здійснити кліком на відповідну кнопку. На рисунку 2.5 наведено основне робоче вікно програмного комплексу.

| Coord. obst 1 | Coord. obst 2 | Coord. obst 3 | Coord. obst 4 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| X1            | X2            | X3            | X4            |
| 100           | 100           | 120           | 120           |
| Y1            | Y2            | Y3            | Y4            |
| 110           | 130           | 110           | 130           |

Рисунок 2.4 – Вікно налаштувань програмного комплексу

Використання розробленого програмного середовища забезпечує моделювання руху робота шляхом використання розробленої моделі. Зокрема, в вікні налаштування параметрів руху здійснюється вибираються відповідні параметри робота та зовнішнього середовища. На основі одержаних параметрів обчислюється оновлений кут повороту та швидкість руху робота з використанням відповідного розробленого метода вибору значень параметрів

руху. Також існує можливість вибору швидкості руху робота: з рівномірною чи з змінною.

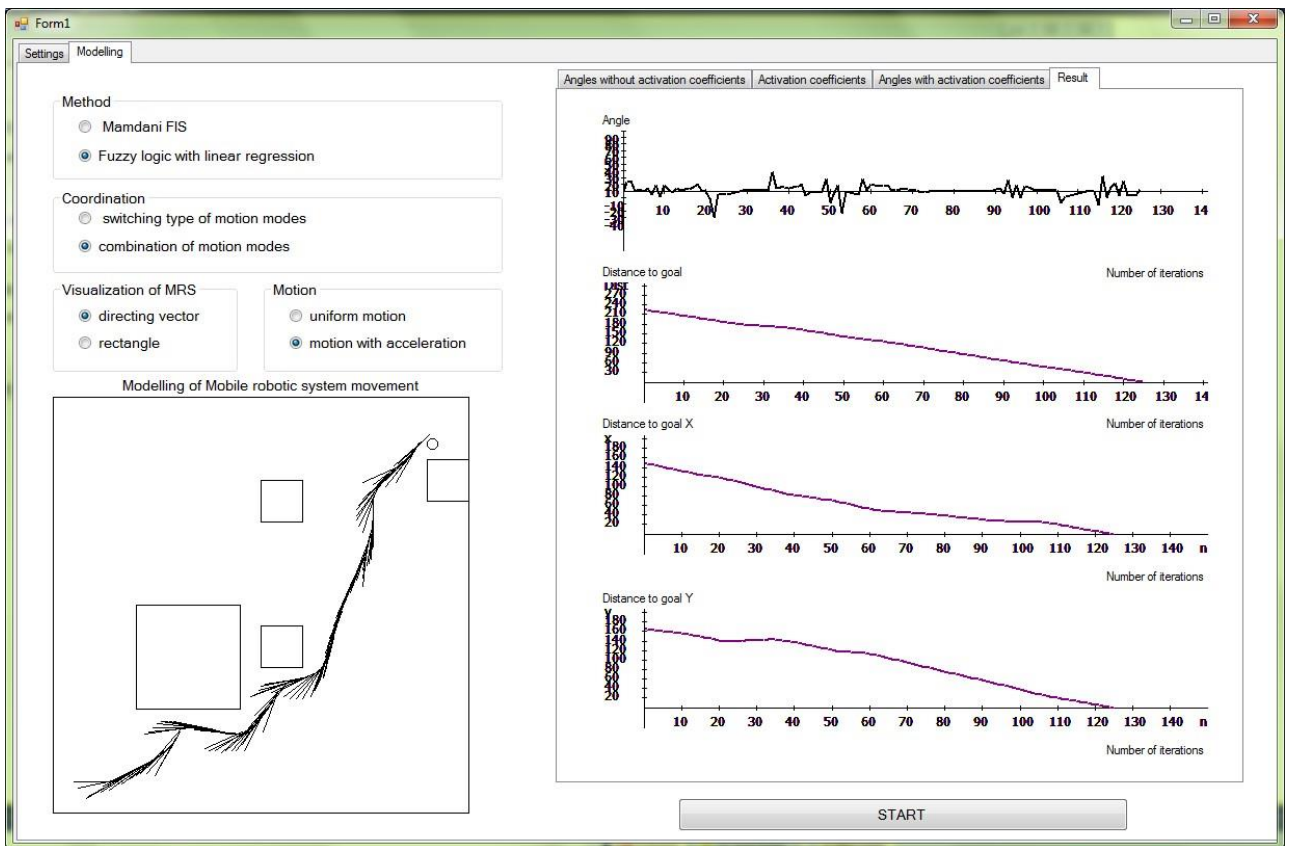


Рисунок 2.5 – Основне робоче вікно програмного комплексу

При налаштуванні параметрів моделювання є можливість вибору розробленого методу нечіткого управління рухом робота, в якому здійснено доповнення нечіткої логіки лінійною регресією. В цьому випадку необхідно обчислити коефіцієнти лінійної регресії з використанням розробленої імітаційної моделі для кожного режиму руху робота, коефіцієнти активації та блоків врахування параметрів та швидкості робота.

Забезпечена можливість вибору певного режиму руху робота: вибором певного режиму в кожен момент часу, чи з використанням розробленого методу визначення кута повороту, що полягає в врахуванні коефіцієнтів активації для відповідних режимів руху. Зокрема, в правій частині робочої області

здійснюється візуалізація графічних залежностей кутів повороту кожного режиму руху на кожному кроці, що одержуються на початковому етапі; коефіцієнтів активації на кожному кроці руху робота; та кутів повороту робота після поєднання з коефіцієнтами активації. Також здійснюється представлення графічних залежностей результуючого кута повороту на кожному кроці робота та зменшення відстані до цілі (також і по координатам X та Y). При здійсненні візуалізації руху робота існує можливість вибору представлення робота або у вигляді вектора або у вигляді спрощеної моделі робота (у вигляді прямокутника).

## 2.5 Висновки до розділу 2

1. Розроблено модель та алгоритм управління роботом на основі нечіткої логіки, яка дає змогу оминати перешкоди та вирішувати нестандартні ситуації.
2. Розроблено схему реалізації алгоритму формування сигналу управління мобільним роботом.
3. Розроблена структура системи управління рухом колісної МРТП, яка включає блоки дистанційного, інтелектуального гібридного та інтелектуального автономного керування. Канал передачі команд управління забезпечує подачу відповідних команд. Відеокамера та канал передачі відеоданих забезпечує підтримку пересування МРТП у режимах інтелектуального гібридного та інтелектуального автономного керування.
4. Розроблено програмні засоби для оцінки синтезованої моделі управління роботом на основі нечіткої логіки. Побудовані засоби розроблені на основі мови C# в програмному середовищі Visual Studio 2010 та здійснюють візуалізацію траєкторії руху робота в різних середовищах та різних режимах руху.

### 3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Розроблення технічного забезпечення системи управління рухом мобільного робота

Важливим завданням при розробленні мобільних роботів – є побудова моделі зовнішнього середовища, у якому робот здійснює рух. Така модель зовнішнього середовища повинна адекватно відображати поточний стан і положення робота, можливі перешкоди для руху та небезпечні ділянки шляху.

Для її побудови слід використовувати наявні датчики, серед яких у першу чергу слід вказати датчики віддалі, побудовані з використанням різноманітних технологій виявлення перешкод – ультразвукова, оптична тощо, 2D та 3D лідари, які є основою для побудови власне моделі зовнішнього середовища, датчики на основі електронних акселерометрів та компасів для просторової орієнтації платформи.

Системи позиціонування на основі технології GPS забезпечують достатньо точну прив'язку платформи на місцевості, однак, не завжди є адекватними у приміщеннях чи при значному затіненні супутників GPS перешкодами у полі зору. При пересуванні у приміщеннях МР має майже повністю покладатися на дані лідарів, акселерометрів та компасів.

Для забезпечення дистанційного та інтелектуального гібридного управління також доцільно застосовувати різноманітні відеокамери і які сьогодні випускаються доволі в широкій номенклатурі. Перевагу слід надавати камерам, які передають зображення у реальному часі з використанням радіоканалу. Радіоканал, як правило реалізується за технологією Wi-Fi або у діапазонах 2.4, 5 і 10 ГГц з використанням пропрієтарних протоколів. Сигнал може прийматися на віддалення мобільні пристрої, що спрощує варіант реалізації системи дистанційного керування. Серед можливих варіантів

реалізації відеоканалу для забезпечення дистанційного керування можна вказати пристрої типу 1080P HD WiFi Network Camera Mobile Monitoring, які сьогодні достатньо поширені. Вони сьогодні достатньо відпрацьовані та мають низьке енергоспоживання, забезпечують достатньо високі якісні і кількісні характеристики для реалізації як завдань дистанційного керування МР оператором, так і можливості застосування їх для реалізації завдань розпізнавання зображень.

Елементи розпізнаваних зображень можуть стати основою для побудови та доповнення моделі зовнішнього середовища, яка створюється для керування платформою.

Інтелектуальні давачі для визначення віддалі сьогодні створюються як на основі технології ультразвукової ехолокації, так і з застосуванням принципів лазерної ехолокації. Останні моделі давачів забезпечують роботу як при низьких, так і при високих рівнях зовнішньої освітленості з формуванням адекватних показників вимірювання віддалі до перешкоди, точності вимірювання і кута зору датчика.

Ультразвукові давачі наскільки якісних параметрів не мають, тому застосування їх на платформі вважається недоцільним. З іншої сторони давачі оптичного діапазону можна поділити на давачі ближнього радіусу дії та дальнього. Давачі ближнього радіусу дії, як правило, мають відповідну чутливість і забезпечують локалізацію перешкод на відстані до декількох сантиметрів. З іншої сторони, давачі для дистанційного вимірювання відстані забезпечують вказані вимірювання у діапазоні до декількох метрів. Для вимірювання більшої дальності доцільним вважається застосування лазерних лідарів як 2D і 3D типів, однак вартість таких пристроїв є достатньо високою.

Отже, для створення адекватної системи відображення та побудови зовнішнього середовища вважається доцільним застосовувати як мінімум один лідар, до чотирьох давачів дистанційного вимірювання віддалі, які забезпечують детектування перешкод у межах 360°. Також доцільне

застосування з давачів перешкод ближнього радіусу дії, а конкретні місця розміщення їх на платформі будуть визначатися в процесі реалізації та побудови необхідної моделі зовнішнього середовища.

Сьогодні для безконтактного визначення відстані використовують інфрачервоні давачі, наприклад, типу TCRT5000 Infrared Reflective Sensor.

Як показує аналіз, на відміну від традиційних інфрачервоних давачів, які вимірюють кількість відбитого світла і залежать від відбиваючої здатності поверхні об'єкта, давачі FlightSense безпосередньо вимірюють відстань до об'єкта за часом відбиття фотонів, що дає змогу точно визначати відстань, незалежно від характеристик поверхні об'єкта. Функціонування ToF (Time-of-Flight) або часопрогонних давачів полягає у тому, що лазерний діод (емітер) випромінює фотони, а фотодетектор реєструє відбитий промінь. За часом, за який фотони відбиваються від об'єкта, ToF-датчик визначає відстань. Перевагою давача є здатність виявляти темні предмети з низьким коефіцієнтом відбиття, тоді як звичайних інфрачервоних давачів відбитого світла може бути недостатньо. Час відбиття від об'єкта на відстані 1 см складає 67 пс. ToF-давачі компанії STMicroelectronics дають можливість вимірювати дальність об'єкта незалежно від розміру, матеріалу, кольору та коефіцієнта відбиття його поверхні. Довжина хвилі випромінювання VSCEL-діодів, що використовуються в давачах, становить 940 або 850 нм, що знаходиться в невидимому діапазоні. Залежно від типу давача можна вимірювати відстань до об'єктів до 4 м (в темряві від білих поверхонь) за десятки мілісекунд з кутом огляду до 27°, а новий датчик VL53L5CX з оптичними елементами на приймальній матриці та випромінюючому діоді дає змогу розширити кут до 61°. Параметри та характеристики давачів VL53Lxx подано в таблиці 3.1.

Для забезпечення навігації застосовуються цифрові магнітометри та акселерометри. Тривісний магнітометр компас HMC5883L використовується у модулі GY-273 і призначений для орієнтації роботизованих платформ у просторі, пошук місць з сильним магнітним полем. В якості чутливих елементів

в компасі використовується три магніторезистивних датчі. З'єднання з контролером по інтерфейсу I2C, діапазон вимірювань: 1,3...8 Гаус, точність: 5мГаус.

В якості акселерометра в процесі розроблення навігаційних систем використовується ADXL345 трьохосьовий акселерометр.

Таблиця 3.1 – Основні параметри ToF-датчів STMicroelectronics

| Найменування                                    | VL53L0X            | VL53L1X            | VL53L1CB           | VL53L3CX           | VL53L5CX           | VL6180V1          | VL6180X                           |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Застосування                                    | Вимірювач відстані | Вимірювач відстані | Вимірювач відстані | Вимірювач відстані | Вимірювач відстані | Датчик наближення | Датчик наближення та освітленості |
| Відстань до об'єкта, м                          | До 2               | До 4               | До 3,2             | До 3,1             | До 4               | До 0,62           | 0,1 та вище                       |
| Стійкість до зовнішнього освітлення (5 клк), см | До 80              | До 150             | До 90              | До 100             | До 150 вище        | –                 | –                                 |
| Вибір області виявлення                         | 1 зона             | 1 зона             | Кілька зон         | 1 зона             | До 64 зон          | 1 зона            | 1 зона                            |
| Виявлення кількох об'єктів                      | –                  | –                  | До 4 об'єктів      | До 4 об'єктів      | +                  | –                 | –                                 |

Лідар RPLidar A1M8 360 Degree Laser Scanner Development Kit фірми Slamtec має наступні особливості: 360° всенаправлене лазерне сканування, 5,5 – 10 Гц адаптивна частота сканування, частота вибірки: 4000 – 8000 Гц, дальність дії: 0,15 – 12м, а точність вимірювання менше 0,1%. Лідар YDLIDAR G4 360° Laser Scanner фірми YDLIDAR має скануючий далекомір із діапазоном

обертання за годинниковою стрілкою та проти годинникової стрілки на 360 градусів. Забезпечує швидкість сканування 9000 разів/с, дальність дії 16 м, використовує оптомагнітну технологію та оснащений механізмом прискорення опрацювання зображень власної розробки YDImage 3.0. Отже, така сукупність давачів забезпечує побудову моделі зовнішнього середовища та пересування у ньому з можливістю обходу перешкод.

Також у перелік слід включити давачі температури, вологості та тиску, які забезпечують оперативне вимірювання вказаних показників на місці з метою внесення коректив у модель зовнішнього середовища та врахування додаткових параметрів. Давач BME280 призначений для вимірювання значення атмосферного тиску, температури та вологості.

Як правило, сьогодні давачі вказаних параметрів будуються з використанням спеціалізованих інтерфейсів серед яких переважають інтерфейси I2C, SPI та послідовний. Застосування таких інтерфейсів вимагає використання додаткового керуючого мікроконтролера. Безпосереднє під'єднання давачів вказаних типів до керуючого мікроконтролера слід вважати недоцільним внаслідок обмеженої кількості доступних інтерфейсів. Вбудовані системи на базі мікрокомп'ютера типу Raspberry Pi або Orange Pi у своєму складі має не більше двох-чотирьох інтерфейсів I2C або SPI, що значно обмежує можливість під'єднання додаткових периферійних пристроїв як для вводу даних, так і для керування пристроями.

У зв'язку з цим пропонується рішення орієнтоване на реалізацію побудови моделі зовнішнього середовища, яке буде полягати у використанні для кожного окремого давача індивідуального дешевого мікроконтролера з вбудованим інтерфейсом Wi-Fi або Bluetooth, які в свою чергу, будуть під'єднуватися до точки доступу і таким чином передавати дані незалежними каналами на віддалений сервер (рисунок 3.1).

Для реалізації планується застосовувати протокол MQTT, як такий, що забезпечує мінімальний час затримки передачі даних та оперативне

нарощування кількості передаваних параметрів у випадку необхідності та протокол UDP у випадку локальної передачі даних. У подальшому можлива інтеграція давачів з використанням протоколів типу послідовний інтерфейс для передачі даних на мобільну платформу у штатному режимі експлуатації.

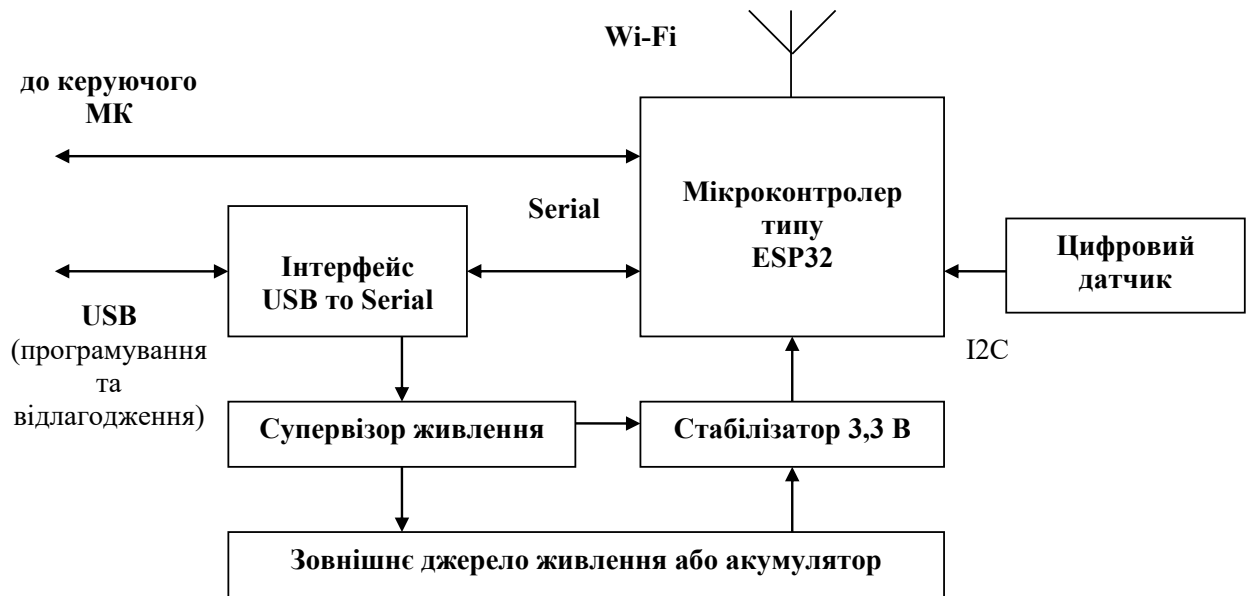


Рисунок 3.1 – Типова структурна схема пристрою зчитування даних з давача

Важливим питанням, яке вимагає додаткових досліджень у процесі реалізації платформи і побудови моделі зовнішнього середовища залишається застосування систем позиціонування для визначення розташування платформи на місцевості.

Сьогодні з такою метою застосовується система GPS, також розвивається платформа позиціонування на основі супутників Beidou та Galileo, які сьогодні є доповненням та розширенням системи GPS. На ринку сьогодні, доступні приймачі сигналів GPS, які працюють з різними угрупованнями супутників та забезпечують, у випадку адекватного підбору антени для отримання сигналу супутників, достатньо високу точність, яка може складати для комерційних застосувань до порядку 3 метрів. Модуль U-blox NEO-6M GPS GY-GPS використовується з мікроконтролерними системами, а для обміну даними

UART. Окрім того, цей модуль містить вбудовану пам'ять EEPROM, яка використовується для збереження даних після вимкнення живлення. Модуль U-blox NEO-6 має 50 каналів позиціонування з більш ніж 2 мільйонами ефективних кореляторів, швидкість оновлення розташування 5Hz. Модуль GPS Beitian BN-180 має 72-канальний приймач M8030-KT, що підтримує навігаційні системи BeiDou, GPS, Galileo, QZSS. Інтерфейс підключення – UART. Необхідно відмітити, що робота технічних систем позиціонування є найбільш адекватним у межах відкритого простору, однак, значно обмежується в результаті затінення тих чи інших супутників, відсутності прямої їх видимості. У такому випадку гарантована точність визначення розташування платформи може падати до десятків метрів.

З іншої сторони використання платформи GPS є значно утрудненим у приміщеннях і вимагає застосування інших систем позиціонування. Отже, у цьому випадку слід покладатися тільки на побудову моделі зовнішнього середовища за допомогою лідарів, оскільки інші системи позиціонування наприклад на основі давачів Bluetooth, на основі різноманітних пасивних систем прийому радіосигналів вимагають як попереднього обстеження і побудови картини розподілу радіочастотного поля у тому чи іншому приміщенні або необхідності попередньої інсталяції відповідних радіоміток, наприклад Bluetooth маячків, у випадку застосування технології Bluetooth для забезпечення локації у приміщенні.

Щодо реалізації структури системи управління рухом МР слід сказати, що вона будується, як показано на рисунку 2.3, з використанням окремих функціональних закінчених блоків, кожен з яких виконує ту чи іншу специфічну функцію. Для побудови вказаних блоків застосовано готові модулі промислового виконання. Сьогодні номенклатура модулів, наприклад для побудови приводів колісної системи пересування МР є достатньо широкою та забезпечує адекватне керування двигунами відносно високої потужності.

Для забезпечення подачі команд власне на приводи колісної системи пересування використовується інтерфейс з використанням двох-чотирьох керуючих сигналів. Передача команд керування може відбуватися від керуючого мікрокомп'ютера, а сам блок реалізовано на основі мікроконтролера типу ESP-32, основним завданням якого є як виконання команд щодо напрямку пересування, визначення швидкості пересування та повороту колісної системи МРТП та, з іншої сторони, паралельно забезпечення реакціях на появу у напрямку руху колісного пристрою незапланованих перешкод. Виявлення таких перешкод здійснюється за допомогою індивідуальних давачів, які охоплюють поле зору перед платформою і призначені для реагування на такі перешкоди. Така система побудована на основі двох давачів визначення відстані безконтактним способом, які забезпечують виявлення перешкод на відстані до декількох метрів і реалізують механізм аварійної зупинки МР.

Канал передачі команд управління реалізується за допомогою спеціалізованих трансиверів з використанням для їхнього керування мікроконтролерів, що забезпечує побудову каналу з оптимальними якісними та кількісними характеристиками.

Блок дистанційного управління, блок інтелектуального гібридного управління та блок інтелектуального автономного управління може бути реалізований програмними засобами на основі виділеного мікрокомп'ютера типу Raspberry Pi (Orange Pi тощо) та є наступним рівнем інтелектуального опрацювання даних з платформи та засобів збору і збереження навігаційних даних.

У наслідок використання MQTT сервера (брокера) забезпечується можливість віддаленого збору даних з усіх давачів МР, що забезпечує можливість розробки, побудови та відлагодження моделі зовнішнього середовища та програмного забезпечення блоків дистанційного управління, інтелектуального гібридного управління та інтелектуального автономного управління у віддаленому режимі на основі актуальної інформації від давачів. У

подальшому, розроблені та відпрацьовані програмні засоби завантажуються на керуючий мікрокомп'ютер для штатного використання зважаючи на кросплатформність використовуваних засобів розроблення.

Канал передачі відео даних будується з використанням спеціалізованих передавачів відеосигналу, які реалізують передачу на відстані до декількох сотень метрів і забезпечують як оцінку сцени візуальним шляхом оператором так її аналіз за допомогою методів розпізнавання зображень тощо. Такі дані застосовується для уточнення та деталізації розробленої моделі зовнішнього середовища і доповнюють її.

В сучасних МР управління рухом здійснюється з використанням мікроконтролерних систем. Для управління рухом доцільно використовувати готові промислові модулі на базі сімейств мікроконтролерів ESP8266 та ESP32. Основними перевагами цих сімейств мікроконтролерів є невисока вартість, доступність засобів розробки програмного забезпечення (ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), PlatformIO, LUA тощо), наявність плат розширення для отримання даних від давачів та управління різноманітними пристроями тощо. На базі лінійок мікроконтролерів ESP8266/ESP32 реалізовано спеціалізовані модулі, які є основою для побудови готових апаратних рішень. Мікроконтролери містять щонайменше один аналоговий вхід з вбудованим АЦП розрядністю 10 та 12 біт відповідно. Для передачі даних з різноманітних давачів та для керування пристроями підтримуються стандартні інтерфейси SPI/I2C/I2S/UART: для ESP8266 – 2/1/2/2, а для ESP32 – 4/2/2/2 відповідно. Крім того, виводи мікроконтролерів можуть визначатися як вивід загального призначення (GPIO) і забезпечувати інтерфейс широкої номенклатури контролерів керування двигунами. На рисунку 3.2 та рисунку 3.3 показано загальний вигляд модулів на основі ESP32 C3, виконаних відповідно до типової структурної схеми пристрою зчитування даних з датчика.

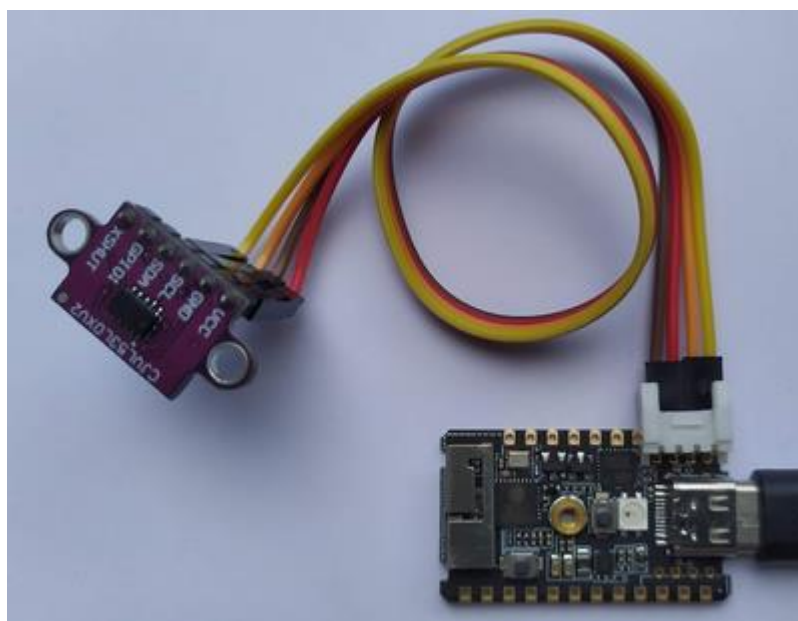


Рисунок 3.2 – Вигляд модуля датчика VL53L0X дальності з мікроконтролером ESP32-C3 на базі плати M5Stamp C3 для МРТП

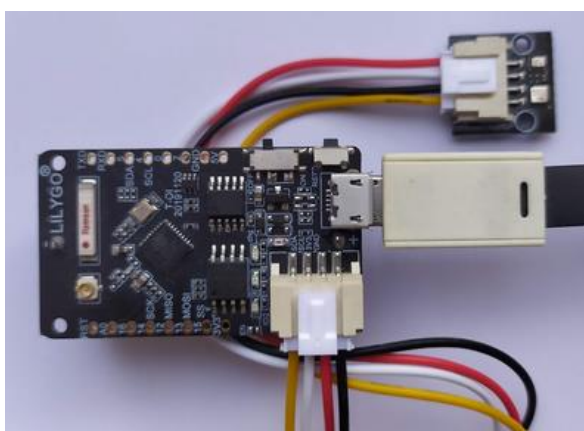


Рисунок 3.3 – Вигляд модуля датчика АНТ20+ВМР280 тиску і температури з мікроконтролером ESP32-C3 на базі плати TTGO T-O1 для МР

Тестування модулів здійснено з використанням засобів сайту [thingspeak.com](https://thingspeak.com). На цьому сайті проводяться обчислення та зберігаються вихідні дані у зручному для користувача форматі (MatLab). На рисунку 3.4 зображено

графік даних від датчика відстані VL53L0X при його розміщенні на відстані 100 мм від перешкоди та гістограму розподілу зміни цих даних (рисунок 3.5).

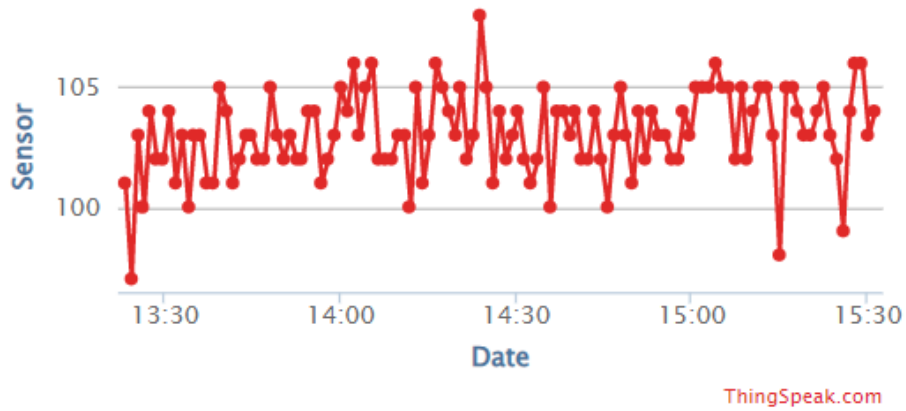


Рисунок 3.4 – Графік значень від датчика відстані VL53L0X

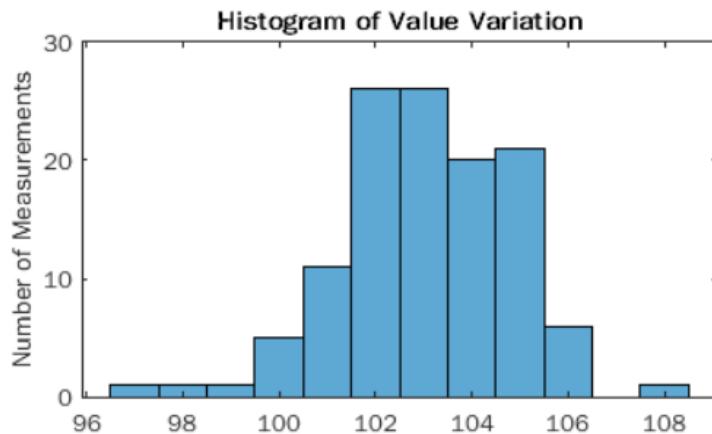


Рисунок 3.5 – Гістограма розподілу значень від датчика відстані VL53L0X

З іншої сторони, вимірювання відстані за допомогою датчика VL53L0X відбувається, відповідно до аналізу гістограми розподілу з прийнятною для функціонування МР точністю.

Також перевірено час передачі даних на віддалений сервер thingspeak.com з використанням розроблених модулів датчиків по протоколу MQTT. При цьому,

оцінювався час від моменту формування команди «publish» до отримання даних відповідно до підписки. Гістограма розподілу часу наведена на (рисунок 3.6).

Визначення даних значень здійснено за допомогою інтегрованого в мікроконтролер годинника. Побудована в Matlab гістограма розподілу значень дала можливість встановити, що середній час реакції становить 250 мс. Слід зазначити, що вказані значення отримані для власне віддаленого сервера `mqtt3.thingspeak.com`, фізично розташованого на іншому континенті. Для тестового сервера `broker.mqtt-dashboard.com` аналогічний параметр склав біля 45 мс.

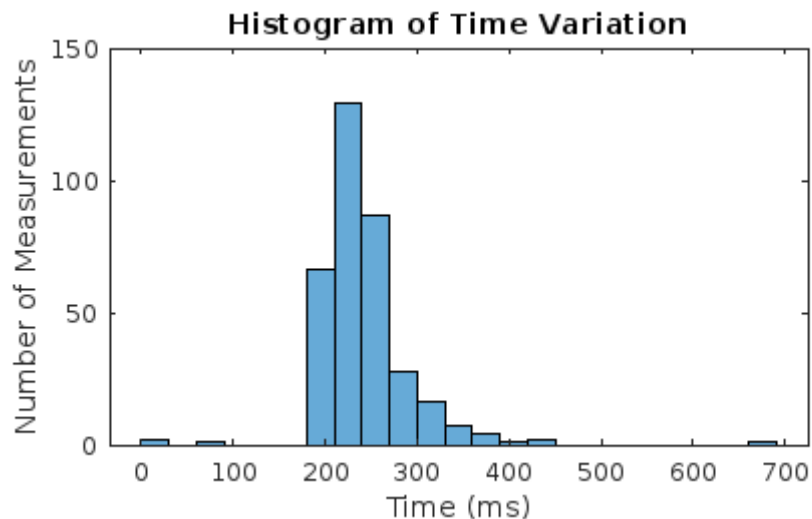


Рисунок 3.6 – Графічне подання розподілу часу реакції на команду «publish» для віддаленого сервера `mqtt3.thingspeak.com`

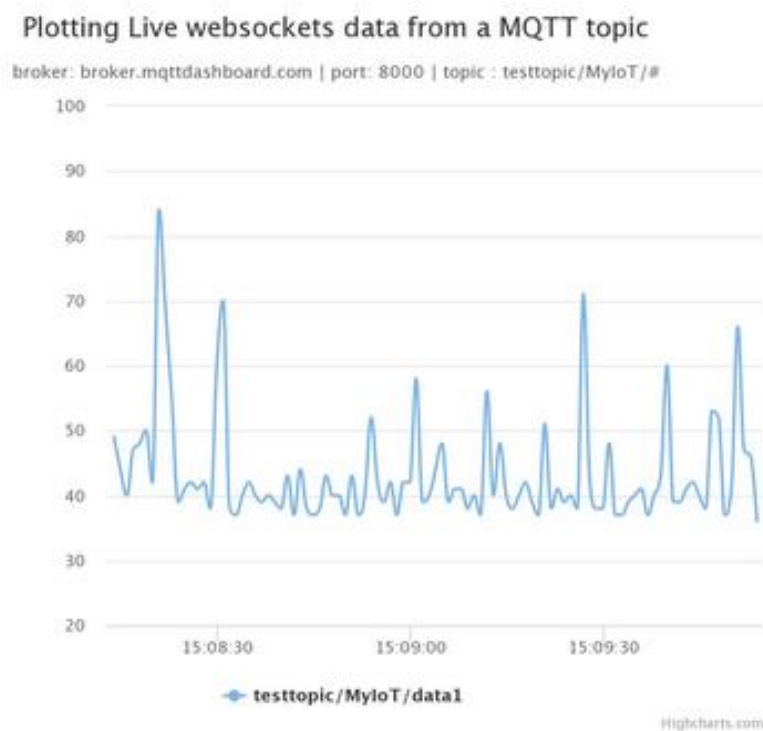


Рисунок 3.7 – Час реакції на команду «publish» для сервера broker.mqtt-dashboards.com

Отже, вказані значення затримки передачі даних з давачів біля 50 мс слід вважати допустимими у процесі відлагодження програмного забезпечення. Вказану затримку можна суттєво зменшити при використанні локального сервера і протоколу UDP.

У даній реалізації для керування двигунами застосовано промисловий модуль Dual Channel H Bridge Motor Driver Module DHB-01A, який забезпечує керування двигунами у діапазоні напруг живлення 5-15В при струмі до 30А. Зміна швидкості відбувається шляхом застосування ШІМ. Діапазон регулювання ШІМ: 0-98% при доступній частоті для колекторних двигунів 16кГц, для безколекторних – 80кГц. Для керування вказаним модулем використано окремий модуль на базі мікроконтролера ESP32. Вказаний модуль керування забезпечує отримання відповідних команд на рух МРТП від керуючого мікрокомп'ютера. Формат команд визначає напрямок, швидкість руху та кут пороту МРТП. На їх основі мікроконтролером формуються керуючі

сигнали для керування двигунами та швидкістю обертання з використанням ШІМ. Таким чином окремий мікроконтролер забезпечує неперервність і стійкість формування керуючих сигналів, що подаються на двигуни. Поряд з формуванням цих сигналів мікроконтролер забезпечує отримання сигналів з давачів віддалі, які розміщені по курсу руху МРТП і забезпечує аварійну зупинку платформи у випадку появи перешкоди незалежно від команд керуючого мікрокомп'ютера.

Важливою перевагою обох лінійок мікроконтролерів є підтримка роботи у безпроводових мережах Wi-Fi 802.11 b/g/n. Особливістю лінійки мікроконтролерів ESP32 є забезпечення функціонування у відповідності до безпроводового протоколу Bluetooth 4.2 та BLE.

Для опрацювання даних від давачів для побудови моделі зовнішнього середовища використовується промисловий мікрокомп'ютерний модуль Orange Pi на основі SOC Allwinner H2+, що має чотири процесорних ядра Cortex-A7 з тактовою частотою 1.2 ГГц та відео ядро Mali400 MP2 частотою 600 МГц. Orange Pi має об'єм оперативної пам'яті 512 Мбайт DDR3 SDRAM, має інтерфейси UART, I2C, SPI та GPIO на 26 виводів та додатковий на 13 виводів. Живлення може відбуватися двома способами: або через роз'єм micro-USB від блоку живлення 5В, або при через GPIO піни. Для зберігання даних можна використовувати карту microSD. Що важливо Orange Pi Zero має адаптер Wi-Fi 802.11 b/g/n із зовнішньою антеною. Для побудови моделі зовнішнього середовища і орієнтування у просторі МРТП застосовано сукупність модулів давачів, описаних вище.

Канал передачі команд управління у МРТП побудовано з удосконаленими промисловими модулями NRF24L01+PA+LNA з зовнішньою SMA антеною. При побудові каналу передачі використано керуючий мікроконтролер, призначений для узгодження інтерфейсу SPI трансивер з послідовним інтерфейсом керуючого мікрокомп'ютера. Керуючий мікроконтролер

забезпечує узгодження швидкості прийому/передавання даних шляхом їх буферизації.

Канал передачі відеоданих реалізується з використанням штатних засобів застосованої відеокамери 1080P HD WiFi Network Camera Mobile Monitoring з підтримкою мережі Wi-Fi 802.11 b/g/n.

### 3.2 Блок дистанційного управління рухом МР та система команд

Одним із найважливіших факторів, які впливають на роботу МР є ефективність управління рухом. Для дистанційного управління рухом МР можуть використовуватися 8-и, 12-и, 16-и, 20-и, 24-и та більше розрядні системи команд.

Для реалізації блоку дистанційного управління рухом МР виберемо 16-и розрядну систему команд. Перші вісім розрядів (1-8) команди код операції (стоп, рух вперед, рух назад, рух вліво, рух вправо), а другі вісім розрядів (9-16) – параметри операції (швидкість, градуси повороту, віддаль та час руху). Структура 16-и розрядних команд управління МР наведена в таблиці 3.2, де  $\Delta$  – мінімальна зміна (приріст) швидкості.

### 3.3 Блок інтелектуального автономного управління рухом МР з використанням нечіткої логіки

Нечітка логіка (НЛ) використовується в ситуаціях, коли існує висока ступінь невизначеності, складності та нелінійності. При автономному управлінні рухом МР НЛ використовується для класифікації даних, прийняття

рішень, які забезпечують уникнення таких проблем навігації, як безперервне створення петель, зворотне відстеження, тупикові пастки та рух у вузьких проходах.

Таблиця 3.2 – Структура команд управління рухом МРТП

| Код операції |   |   |   |   |   |   |   | Операція                          | Значення $k$ |    |    |    |    |    |    |    | Параметри      |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|-----------------------------------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| 1            | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |                                   | 9            | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |                |
| 1            | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Стоп                              | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  |                |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Вперед<br>$V = V_{max} - k\Delta$ | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Вперед<br>$V = V_{cep} + k\Delta$ | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | Вперед<br>$V = V_{cep} - k\Delta$ | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | Вперед<br>$V = V_{min} + k\Delta$ | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | Назад<br>$V = V_{max} - k\Delta$  | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | Назад<br>$V = V_{cep} + k\Delta$  | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | Назад<br>$V = V_{cep} - k\Delta$  | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | Назад<br>$V = V_{min} + k\Delta$  | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Швидкість руху |
| 0            | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | Вліво $k$ градус                  | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Кут повороту   |
| 0            | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | Вправо $k$ градус                 | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Кут повороту   |
| 0            | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Віддаль $k$ км                    | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Віддаль км     |
| 0            | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Віддаль $k$ м                     | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Віддаль м      |
| 0            | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | Віддаль $k$ см                    | x            | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | Віддаль см     |

Структура засобів управління рухом МР з використанням НЛ наведена на рисунку 3.8.

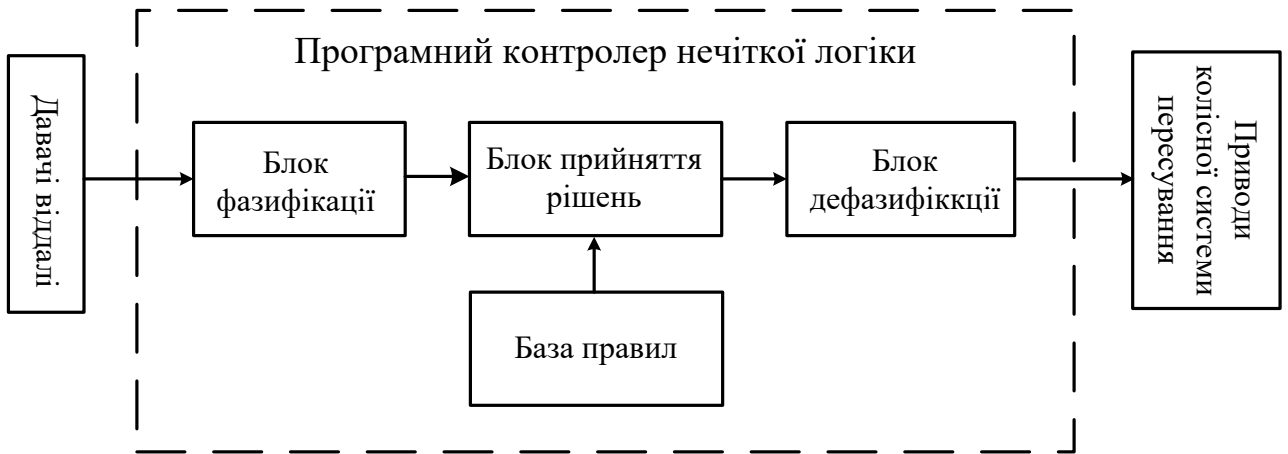


Рисунок 3.8 – Структура системи управління рухом МР з використанням НЛ

Головними елементами системи керування переміщення мобільних роботів із застосуванням НЛ є давачі відстані та програмний контролер НЛ, який включає блоки фазифікації, прийняття технічних рішень, дефазифікації та попередньо розробленої бази правил.

Управління швидкістю та напрямом руху мобільного робота відбувається завдяки даним, які отримано від давачів, що надходить з бортової інтелектуальної підсистеми. Отримані дані надходять в спеціальний програмний контролер навігації та локалізації, який їх аналізує та перетворює на керівні сигнали для зміни руху робота. Особливістю програмного контролера НЛ є те, що він опрацьовує нечіткі (або розмиті) величини, включаючи нечіткі множини, нечіткі та лінгвістичні змінні.

В процесі прийняття рішення щодо переміщень МР виконується трансформація вхідної нечіткої множини у вихідну нечітку множину. При цьому, використовується попередньо розроблена нечітка база правил у відповідності з таким виразом:

$$R_k = M_k \rightarrow N_k, \quad (3.1)$$

де  $R_k$  – правило,  $M_k, N_k$  – відповідно вхідна та вихідна нечіткі множини.

На етапі дефазифікації виконується перетворення нечіткого вихідного значення  $N_k$ , яке надходить з блоку прийняття рішень, в чітку величину  $y_k$ , що подається на приводи колісної системи пересування МРТП, у відповідності з наступним виразом:

$$y_k = F(N_k), \quad (3.2)$$

де  $F$  – нейромережевий алгоритм дефазифікації.

Особливістю нейромережевого алгоритму дефазифікації є використання групи з двох нейронних мереж моделі геометричних перетворень, що дає змогу забезпечити мінімальне значення похибку перетворення.

### 3.4 Методи та алгоритми інтелектуального автономного управління МР

Для ефективної навігації МР повинна бути оснащена інтелектуальними засобами моделювання оточуючого середовища, контролю руху, виявлення та уникнення перешкод. Планування безпечного переміщення на основі визначення перешкод з наступним ефективним оминанням їх від початкової точки до кінцевої позиції, що безумовно є найважливішою функцією навігаційної техніки. Відповідно, правильний підбір навігаційної техніки є найважливішим кроком у плануванні шляху МР при роботі в простих і складних умовах. Навігацію МР можна розбити на три категорії:

- глобальна навігація – здатність визначати положення елементів у навколишньому середовищі відносно опорної осі та рухатися до наперед визначеної мети;

– локальна навігація – займається виявленням динамічних умов середовища та встановленням позиційних взаємозв'язків між різними елементами;

– особиста навігація – управління різними елементами навколишнього середовища відносно один одного з врахуванням їх положення.

Основні етапи функціонування робота представлені на рисунку 3.9.

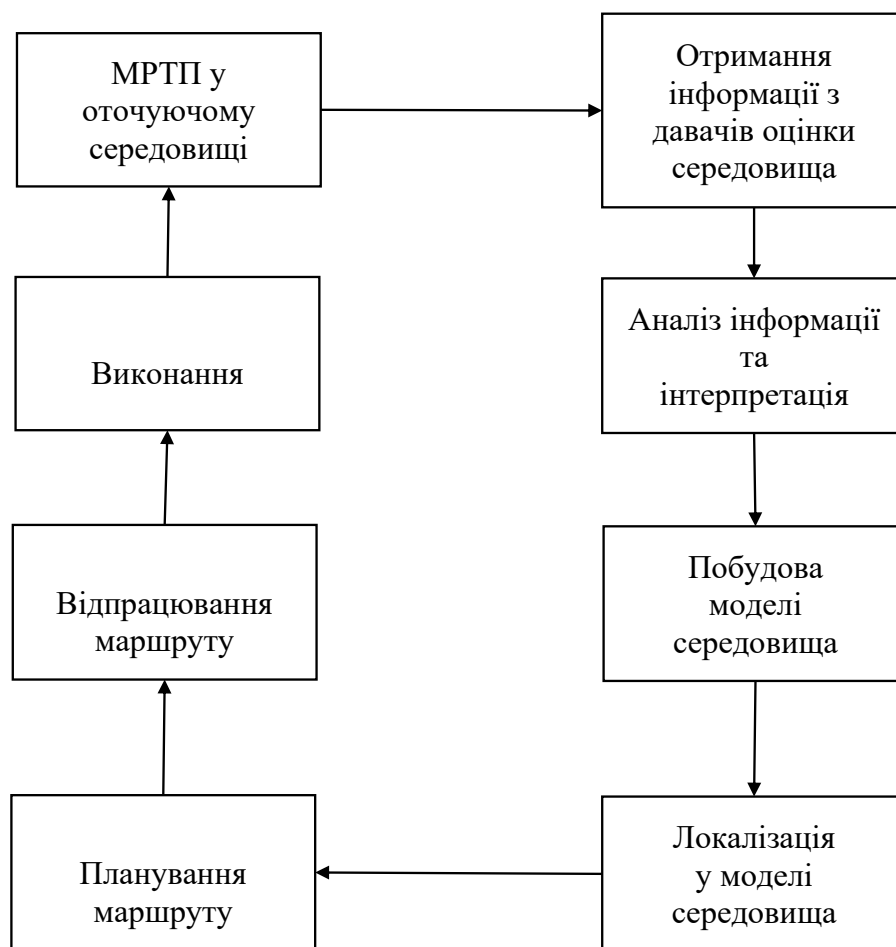


Рисунок 3.9 – Схема навігації мобільного робота

При глобальній навігації система управління рухом МР повинна мати попередню інформацію про навколишнє середовище, положення перешкод та цільове положення, а при локальній навігації не потрібно попередньої інформації про довкілля. Глобальна навігація має справу з повністю відомим

середовищем, а локальна навігація – з невідомим і частково відомим середовищем.

### 3.5 Моделювання руху МР при об’їзді перешкоди

Моделювання переміщення МР реалізовано з використанням теорії нечіткої логіки. Приклад меню з параметрами моделі зображено на рисунку 3.10.

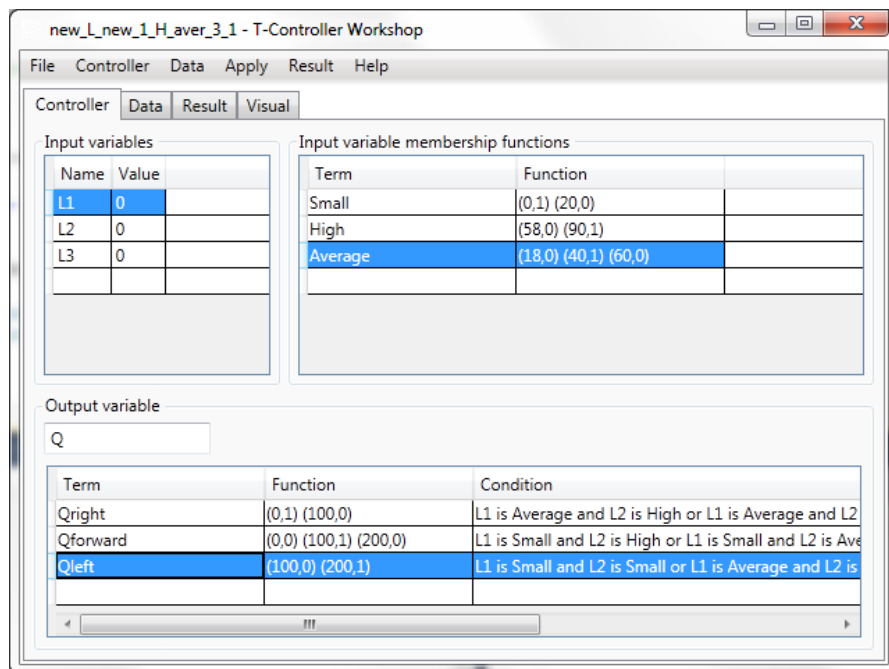


Рисунок 3.10 – Меню програмного засобу з парметрами моделі на основі нечіткої логіки

Приклад меню програмного засобу, де подано інформацію про функції належності вхідних лінгвістичних змінних і вихідної зображено на рисунку 3.11.

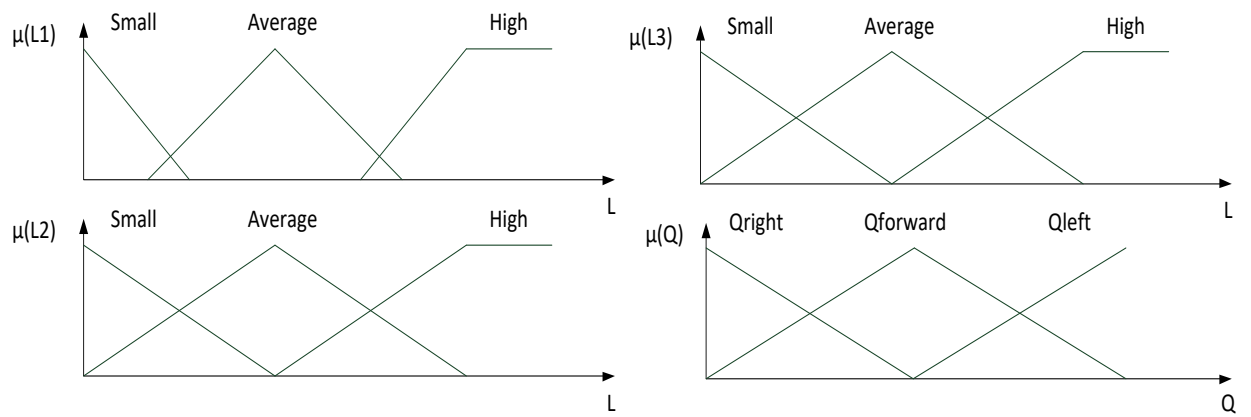


Рисунок 3.11 – Приклад подання функцій належності

Графічне представлення типового об'їзду перешкоди мобільним роботом з використанням розроблених програмних засобів зображено на рисунку 3.12.

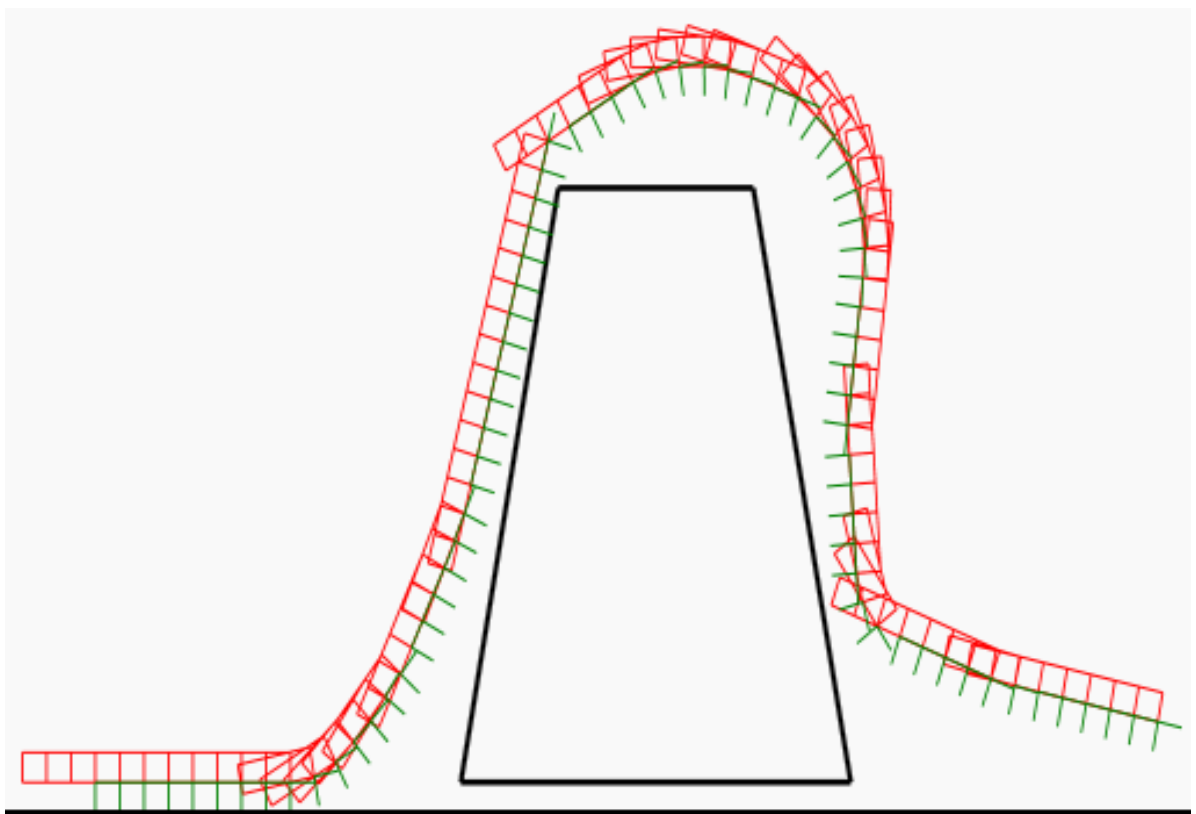


Рисунок 3.12 – Графічне моделювання руху мобільної RTC при об'їзді перешкоди

### 3.6 Висновки до розділу 3

1. Виконано розробку та виготовлення блоків інтелектуального управління макету МРТП з використанням принципів: модульності, що передбачає реалізацію компонентів системи у вигляді окремих компонентів, універсальності, шляхом застосування типових рішень при реалізації давачів МРТП, універсальності, що передбачає максимальне використання стандартних програмних засобів та рішень при реалізації компонентів МРТП і забезпечує їх удосконалення і нарощування можливостей системи.

2. Визначено набір інтелектуальних навігаційних давачів та відеокамера, які забезпечують формування за допомогою засобів збору та збереження навігаційних даних моделі зовнішнього середовища, у якому здійснює рух МРТП. Така модель зовнішнього середовища адекватно відображає поточний стан і положення МРТП, можливі перешкоди для руху та небезпечні ділянки шляху. Засоби опрацювання навігаційних даних використовують побудовану динамічну модель зовнішнього середовища у процесі інтелектуального гібридного та інтелектуального автономного керування.

3. Описано перелік та типи давачів для формування моделі зовнішнього середовища для МРТП. З метою уніфікації, для кожного окремого давача оцінки стану оточуючого середовища застосовано окремий мікроконтролер з підтримкою мережі Wi-Fi. Інформація передається на віддалений сервер за протоколом MQTT (локально UDP), що забезпечує оперативне нарощування типів передаваних параметрів. Отримані дані застосовуються локально на МРТП та віддалено на керуючих комп'ютерах для розробки та відпрацювання алгоритмів навігації для платформи. Апаратні засоби модулів давачів реалізовано та протестовано у реальних умовах. Визначено, що час передачі даних становить біля 50 мс та може бути суттєво зменшеним у випадку застосування при необхідності протоколу UDP.

4. Розроблено систему команд для блоку дистанційного управління рухом МРТП та визначено вимоги до блоку інтелектуального автономного управління рухом МРТП. При його реалізації доцільним слід вважати використання методів нечіткої логіки. Наведена структура системи управління рухом МРТП з використанням нечіткої логіки. Особливістю нейромережевого алгоритму дефазифікації є використання каскаду двох нейромереж моделі геометричних перетворень, що забезпечує нульову методичну похибку перетворення.

5. Розроблено блок-схему навігації МРТП, яка використовує навігаційні дані з набору інтелектуальних датчиків для динамічного формування моделі зовнішнього середовища, локалізації МРТП у моделі середовища та планування і виконання маршруту з застосуванням методів нечіткої логіки. Виконано моделювання траєкторії руху МРТП в умовах наявності перешкод з застосуванням апарату нечіткої логіки.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих моделей, алгоритмів, підходів та методів управління мобільними роботами та визначимо їх переваги і недоліки.
2. На основі проведеного аналізу сформульовано вимоги та обрано принципи реалізації блоків управління рухом МРТП, що вимагають забезпечення управління рухом у режимі реального часу, забезпечення високої надійності та відсутність збоїв в роботі апаратури та програмного забезпечення, оптимізації проходження маршруту за критеріями часу і відстані, уникнення зіткнень з перешкодами, їх автоматичне оминання, незалежність алгоритму підтримки руху МРТП від зовнішнього середовища і його стану, мінімізації масо-габаритних показників та енергоспоживання.
3. Розроблено модель, алгоритм та схему реалізації управління роботом на основі нечіткої логіки, яка дає змогу оминати перешкоди та вирішувати нестандартні ситуації.
4. Побудована структура системи управління рухом колісної МРТП та програмні засоби для оцінки синтезованої моделі управління роботом на основі нечіткої логіки. Побудовані засоби розроблені на основі мови C# в програмному середовищі Visual Studio 2010 та здійснюють візуалізацію траєкторії руху робота в різних середовищах та різних режимах руху.
5. Виконано розробку та виготовлення блоків інтелектуального управління макету МРТП з використанням принципів: модульності, що передбачає реалізацію компонентів системи у вигляді окремих компонентів, універсальності, шляхом застосування типових рішень при реалізації давачів МРТП, універсальності, що передбачає максимальне використання стандартних програмних засобів та рішень при реалізації компонентів МРТП і забезпечує їх удосконалення і нарощування можливостей системи.

6. Визначено набір інтелектуальних навігаційних давачів та відеокамера, які забезпечують формування за допомогою засобів збору та збереження навігаційних даних моделі зовнішнього середовища, у якому здійснює рух МРТП. Така модель зовнішнього середовища адекватно відображає поточний стан і положення МРТП, можливі перешкоди для руху та небезпечні ділянки шляху. Засоби опрацювання навігаційних даних використовують побудовану динамічну модель зовнішнього середовища у процесі інтелектуального гібридного та інтелектуального автономного керування.

7. Описано перелік та типи давачів для формування моделі зовнішнього середовища для МРТП. З метою уніфікації, для кожного окремого давача оцінки стану оточуючого середовища застосовано окремий мікроконтролер з підтримкою мережі Wi-Fi. Інформація передається на віддалений сервер за протоколом MQTT (локально UDP), що забезпечує оперативне нарощування типів передаваних параметрів. Отримані дані застосовуються локально на МРТП та віддалено на керуючих комп'ютерах для розробки та відпрацювання алгоритмів навігації для платформи. Апаратні засоби модулів давачів реалізовано та протестовано у реальних умовах. Визначено, що час передачі даних становить біля 50 мс та може бути суттєво зменшеним у випадку застосування при необхідності протоколу UDP.

8. Розроблено систему команд для блоку дистанційного управління рухом МРТП та визначено вимоги до блоку інтелектуального автономного управління рухом МРТП. При його реалізації доцільним слід вважати використання методів нечіткої логіки. Наведена структура системи управління рухом МРТП з використанням нечіткої логіки. Особливістю нейромережевого алгоритму дефазифікації є використання каскаду двох нейромереж моделі геометричних перетворень, що забезпечує нульову методичну похибку перетворення.

9. Розроблено блок-схему навігації МРТП, яка використовує навігаційні дані з набору інтелектуальних давачів для динамічного формування моделі зовнішнього середовища, локалізації МРТП у моделі середовища та планування і виконання маршруту з застосуванням методів нечіткої логіки. Виконано моделювання траєкторії руху МРТП в умовах наявності перешкод з застосуванням апарату нечіткої логіки.

10. Матеріали магістерської роботи доповідалися на III Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі», 26 листопада 2025 р. [37-38].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arena P., Towards autonomous adaptive behavior in a bio-inspired CNN-controlled robot,/ Arena P., Fortuna L., Frasca M., Patané L., Pavone M., // Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS 2006, Island of Kos, Grecia, 21–24 April 2006
2. Grassi V J Hybrid deliberative/reactive architecture for human-robot interaction/ Grassi V J, Parikh Sarangi P., Okamoto //ABSM Symposium Series in Mechtronics, 2006, - Vol.2. – pp.563-570
3. Panus N. Fuzzy logic based control of mobile robot navigation: A case study on iRobot Roomba Platform// Scientific Research and Essays Vol. 8(2), pp. 82 - 94, 11 January, 2013
4. Benbouabdallah K. A Fuzzy Logic Behavior Architecture Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment/ Benbouabdallah K. Qi dan Z// Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(14): - 2013 pp. 3835-3842
5. Cherroun L., Designing of Goal Seeking and Obstacle Avoidance Behaviors for a Mobile Robot Using Fuzzy Techniques/ Cherroun L., Boumehraz M// J. Automation & Systems Engineering 6-4 (2012):pp. 164-171
6. Nazari D., Design of optimal Mamdani-type fuzzy controller for nonholonomic wheeled mobile robots/ Nazari D., Abadi M., Khooban M. H. // Journal of King Saud University – Engineering Sciences (2013), P. 1-9
7. AlYahmedi, A. S. Behavior based control of a robotic based navigation aid for the blind/ AlYahmedi, A. S., El-Tahir, E., Pervez, T.// Control & Applications Conference, CA2009, July 13-July 15, 2009, Cambridge, UK
8. Fatmi, A., AlYahmedi, A. S., Khriji, L., Masmoudi, NA fuzzy logic based navigation of a mobile robot/ Fatmi, A., AlYahmedi, A. S., Khriji, L.,

Masmoudi, N//, World academy of science, Engineering and Technology, issue 22, 2006, pp. 169-174

9. Seraji H. A Behavior-based robot navigation on challenging terrain: A fuzzy logic approach/ Seraji H. Howard//, IEEE Trans. Rob. Autom. Vol. 18, No. 3, .(2002).pp. 308-321

10. Brooks R. A A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, (March 1986), pp. 14–23

11. Brooks R. A. A Robot that Walks; Emergent Behavior from a Carefully Evolved Network, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ 1989, pp. 292–296

12. El-Teleity Fuzzy Logic Control of an Autonomous Mobile Robot /ElTeleity, S. A-LNossair, Z.B. Mansour, H.M.A.-K.,TagElDein// Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2011 16th International Conference, p.188-193

13. Althaus P. Behavior coordination for navigation in office environment/Althaus P. Christensen H. I.// Proceedings of 2002 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Switzerland, 2002, pp. 2298-2304

14. Arkin, R. C.. Towards Cosmopolitan Robots: Intelligent Navigation in Extended Manmade Environments, PhD Thesis, University of Massachusetts, Department of Computer and Information Science, 1987

15. Langer D. A Behavior-Based System For Off-Road Navigation/ Langer D., Rosenblatt J.K. & Hebert M.//, IEEE Journal of Robotics and Automation , Vol. 10, No. 6, . (1994) pp. 776-782

16. Rosenblatt J. A Fine-Grained Alternative to the Subsumption Architecture for Mobile Robot Control,/ Rosenblatt J. & Payton D. W. // Proceedings of the IEEE/INNS International Joint Conference on Neural Networks, Washington DC, June 1989, vol. 2, pp. 317-324

17. Aguirre E. Fuzzy behaviors for mobile robot navigation: design, coordination and fusion/ Aguirre E. Gonzales A. // Int. J. of Approximate Reasoning, Vol. 25, 2000, pp. 255-289
18. Saffiotti A. The uses of fuzzy logic for autonomous robot navigation: a catalogue raisonn'e, Soft Computing Research journal, Vol. 1, No. 4, pp. 180-197
19. Tunstel E., Behavior Hierarchy for Autonomous Mobile Robots: Fuzzy behavior modulation and evolution, International Journal of Intelligent Automation and Soft Computing,/ Tunstel E., Lippincott T. & Jamshidi M. // Special Issue: Autonomous Control Engineering at NASA ACE Center, Vol. 3, No. 1, 1997, pp. 37-49
20. Dragoicea, M., Multi-behavioral model based autonomous navigation of the mobile robots/ Dragoicea, M., Dumitrache, I., Cuculescu, D.S // International Journal Automation Austria, Vol. 11, Nr.12003,, pp:1-20
21. Leyden M., A Fuzzy Logic Based Navigation System for a mobile Robot/Leyden M., Toal D., Flanagan C. // Automatisierungs symposium Wismar (1999).
22. Сорокін, А. Р. Локалізація та навігація мобільних колісних роботів з використанням методів обчислювального інтелекту. 2021
23. Singh M.K Intelligent controller for mobile robot:Fuzzy logic approach /Singh M.K, Parhi D.R. //IACMAG 2008
24. Dadios E. P. Cooperative mobile robots with obstacle and collision avoidance using fuzzy logic/ Dadios E. P. and Maravillas O. A. Jr. //Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 27-30 Oct. 2002, pp.75–80
25. Cherroun L., Path following behavior for an autonomous mobile robot using fuzzy logic and neural networks// Cherroun L., Mechgoug, R. Boumehraz M./ Courrier du Savoir – N°12, Octobre 2011, pp.63-70
26. Boubertakh H, A Simple Goal Seeking Navigation Method for a Mobile Robot using Human Sense, Fuzzy Logic and Reinforcement Learning/ Boubertakh H,

Tadjine M, Glorennec P-Y, Labiod S // JOURNAL OF AUTOMATIC CONTROL, UNIVERSITY OF BELGRADE, VOL. 18(1): 23-27, 2008 pp.23-27

27. Бабич, Л. О. Использование методов нечеткой логики в процессе достижения противоречивых целей интеллектуальным мобильным роботом. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2008 (2), 216-221.

28. Богданова, Н. В., Богданов, О. В. Математичне моделювання систем і процесів. Конспект лекцій. 2022

29. Цмоць, І. Г., Теслюк, В. В., & Ваврук, І. Є. Архітектура та модель управління рухом мобільної робототехнічної системи. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Інформаційні системи та мережі, 2014 (783), 242-251.

30. Кісарчук, Б. М., Месюра, В. І. Система автоматичного гальмування автомобіля з використанням контролера нечіткої логіки (Doctoral dissertation, ВНТУ) 2022.

31. Asif Khan, Bernhard Rinner, Andrea Cavallaro Cooperative Robots to Observe Moving Targets: Review // IEEE Transactions on Cybernetics ( Volume: 48, Issue: 1, January 2018) p. 187 – 198

32. Субботін С. О. Нейронні мережі : теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. – 184 с

33. С.В.Ткаліченко. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник. – Кривий Ріг: Державний університет економіки і технологій, 2023. –150 с.

34. Основи нейрокомп'ютингу : навчально-методичний посібник до практичних занять / В. Д. Дмитрієнко, О. Ю. Заковоротний, В. І. Носков, М. В. Мезенцев. – Х.: НТМТ, 2014. – 140 с.

35. Цмоць І.Г. Особливості реалізації інтелектуальних компонентів робототехнічних систем / І.Г. Цмоць І.Є. Ваврук // Технічні вісті. Науково публіцистичний часопис. 2011. 1(33), 2(34), С.77-78.

36. Березький О.М., Мельник Г.М. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи з освітнього ступеня “Магістр”. Спеціальність: 123 – Комп’ютерна інженерія. Магістерська програма – Комп’ютерна інженерія". Тернопіль: ЗУНУ, 2024. 32 с.

37. Лукачик В. С. Математичне забезпечення системи для управління роботом з використання нечіткої логіки. *Інтелектуальні комп’ютерні системи та мережі* : тези доп. III Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених (25 листопада 2025 р.). Тернопіль: ЗУНУ, 2025. С. 197-198.

38. Лукачик В. С. Розроблення технічного забезпечення системи управління рухом мобільного робота. *Інтелектуальні комп’ютерні системи та мережі* : тези доп. III Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених (25 листопада 2025 р.). Тернопіль: ЗУНУ, 2025. С. 199-200.