Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту
Факультет інформаційно-керуючих систем та технологій
Кафедра інформаційних технологій

До захисту допустити
Завідувач кафедри ІТ,
д.т.н., проф., Каргін А.О.

_____
24 червня 2026 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

тема: Автономний гаражний комплекс: роботизована система моніторингу стану воріт

Студент 4-го курсу
109-ТШІ-Д22 групи
Галузь знань 12 - Інформаційні технології
Спеціальність 126 - Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма - Технології штучного інтелекту)

Остапенко Олег Ярославович
(ПІБ)
Керівник - Каргін Анатолій Олексійович
(ПІБ)
д.т.н., професор, завідувач кафедри ІТ
(науковий ступінь, вчене звання, посада)
Рецензент_Ковтун І.В.
(ПІБ)
к.т.н., доцент, доцент кафедри ТЗ УкрДУЗТ
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

Національна шкала	відмінно
Кількість балів:	98
Оцінка (ECTS)	A

м. Харків – 2026 рік

Лист оцінок кваліфікаційної роботи здобувача _____Остапенка О.Я_____

(прізвище в родовому відмінку та ініціали)

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
Галузь знань 12 - Інформаційні технології
Спеціальність - 126 Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма - Технології штучного інтелекту)

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ	макс. оцінка	оцінка керівн.	оцінка комісії
***ОЦІНКА** ЕТАПУ ПІДГОТОВКИ РОБОТИ*	**8 б.**	**8 б.**	**8 б.**
дотримання графіка консультацій з керівником кваліфікаційної роботи	2 б.	2 б.	2 б.
дотримання термінів підготовки звіту	2 б.	2 б.	2 б.
дотримання термінів практичної реалізації програм	2 б	2 б	2 б
самостійність і ініціативність	2 б.	2 б.	2 б.
***ОЦІНКА** ЗА ЗВІТ - ВІДПОВІДНІСТЬ ВИМОГАМ ДО ЗВІТУ*	**60 б.:**	**60 б.:**	**60 б.:**
(структура звіту - наявність обов'язкових розділів і підрозділів):	***48 б.***	***48 б.***	***48 б.***
ТИТУЛЬНИЙ ЛИСТ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ	1	1	1
ЛИСТ ОЦІНОК	1	1	1
ЛИСТ ЗАВДАННЯ	1	1	1
ДЕКЛАРАЦІЯ	1	1	1
РЕФЕРАТ (2 примірника - укр., англ.)	2	2	2
ЗМІСТ	1	1	1
ВСТУП	2	2	2
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	2	2	2
2 ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ	5	5	5
3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ <ТЕМА РОБОТИ>			
3.1 Концептуальна модель системи	4	4	4
3.2 Логічна модель системи. Моделювання в Mental Modeler	5	5	5
3.3 Логічна модель системи. Моделювання в MATLAB	6	6	6
3.4 Фізична модель системи	4	4	4
4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ПРОТОТИП СИСТЕМИ			
4.1 Топологія та компоненти апаратної частини прототипу системи	3	3	3
4.2 Архітектура та компоненти програмної частини прототипу системи	3	3	3
4.3 Опис даних та бібліотек підтримки компонентів системи	3	3	3
ВИСНОВКИ	2	2	2
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	2	2	2
ДОДАТКИ	2	2	2
обсяг роботи (не менше 50 і не більше 70)	***3 б.***	***3 б.***	***3 б.***
оформлення (тексту, малюнків, таблиць, формул, додатків, посилань)	***7 б.***	***7 б.***	***9 б.***
***ОЦІНКА** ЗА ДОПОВІДЬ:*	**15 б.**	**15 б.**	**15 б.**
структура доповіді, оформлення слайдів	5 б.	5 б.	5 б.
знання матеріалу роботи і рівень відповіді на питання	5 б.	5 б.	5 б.
дотримання регламенту, активність	5 б.	5 б.	5 б.
***ОЦІНКА** ЗА ПРАКТИЧНУ РЕАЛІЗАЦІЮ*	**15 б.**	**15 б.**	**15 б.**
Апаратно-програмний прототип системи за темою здобувача	5 б.	5 б.	5 б.
відповідність практичної реалізації постановці завдання	5 б.	5 б.	5 б.
наочність процесу демонстрації (+відео)	5 б.	5 б.	5 б.
ПІДСУМКОВА ОЦІНКА (захист роботи 25.06.26 о 10.00, Zoom***)***	**100 б**.	**98 б**.	**98 б**.

Кер. (П.І.Б. підпис)	(П.І.Б. підпис)
(П.І.Б. підпис)	(П.І.Б. підпис)
(П.І.Б. підпис)	(П.І.Б. підпис)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту
Факультет інформаційно-керуючих систем та технологій
Кафедра інформаційних технологій

Затверджую
Завідувач кафедри IT,
д.т.н., проф., Каргін А.О.

_____
18 травня 2026 р.

Завдання

На кваліфікаційну роботу студента 4-го курсу, здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти	Остапенка Олега Ярославовича
Тема кваліфікаційної роботи	Автономний гаражний комплекс: роботизована система моніторингу стану воріт
Постановка завдання в стислій формі	Виконати проєктування апаратно-програмної системи як фрагмент IoT, виконати аналіз предметної області, сформувати концептуальні, логічні та фізичні моделі системи та за певними сценаріями виконати моделювання системи як нечіткої когнітивної карти та нечіткої логічної системи.
Джерела, які рекомендує керівник курсової роботи	Limitations 2D LiDAR (https://www.yellowscan.com/knowledge/2d-vs-3d-lidar-a-comparison-of-two-laser-scanning-technologies/)

Календарний план роботи

Дата отримання версії звіту керівником	Етап виконання роботи	Виконання (зазначає керівник)
21.05.2026	Уточнення моделей предметної області за темою роботи (UML діаграми, FCM модель). Формування першої версії звіту (включно 3.2)	Виконано
28.05.2026	Моделювання системи як нечіткої системи в Fuzzy Logic Tools (MATLAB). Уточнення фізичної моделі системи. Формування другої версії звіту (включно 4.3)	Виконано
4.06.2026	Тестування моделі в MATLAB. Опис архітектури системи. Формування повної версії звіту, презентації (+відео), докладу.	Виконано
11.06.2026	Формування остаточних версій звіту, презентації, докладу та відправлення керівнику	Виконано

Дата видачі завдання 18.05.26
Керівник (ПІБ) Каргін Анатолій Олексійович

Декларація щодо унікальності роботи
та невикористанні матеріалів інших авторів, включно асистентів AI, без посилань

ДЕКЛАРАЦІЯ

Усвідомлюючи свою відповідальність за надання неправдивої інформації, стверджую, що подана пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Автономний гаражний комплекс: роботизована система моніторингу стану воріт» написана мною особисто.

Ця робота подається до захисту вперше та не передавалася іншим особам; не порушує авторських та суміжних прав, що закріплені статтями 21-25 Закону України «Про авторське право та суміжні права»; дані та інформація, які використані в роботі, не отримані в недозволений спосіб.

Я усвідомлюю, що у разі порушення перелічених вимог моя робота може бути відхилена без права її захисту, або під час захисту робота буде оцінена як незадовільна.

Здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
студент 4-го курсу
109-ТШІ-Д22 групи
Галузь знань 12 - Інформаційні технології
Спеціальність 126 - Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма - Технології штучного інтелекту)

Остапенко Олег Ярославович
(ПІБ)

Дата 14.06.2026

Підпис

м. Харків – 2026 рік

РЕФЕРАТ

Остапенко О.Я. Проєктування автономного гаражного комплексу: роботизована система моніторингу стану воріт. − На правах рукопису.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти: 58 сторінок, 37 рисунків, 10 таблиць, 30 джерел, 4 додатка.

Об’єктом дослідження є процеси автоматизованого моніторингу та розпізнавання стану воріт гаражного комплексу.

Метою роботи є розробка програмно-апаратного прототипу роботизованої системи для визначення стану гаражних воріт.

Методи дослідження: нечітке когнітивне моделювання (FCM), теорія нечітких множин, комп'ютерне моделювання.

У роботі сформовано концептуальну та фізичну моделі системи у вигляді UML-діаграм. Апаратний прототип побудовано на базі мобільної платформи TurtleBot3 із контролером OpenCR та мікрокомп’ютером Raspberry Pi 4, що об'єднує просторові дані від лазерного далекоміра RPLidar A1 та показники магнітного датчика Холла KY-024.

Спроєктовано та протестовано логіко-математичну модель нечіткого контролера у середовищі MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox). Розроблена комплексна база правил дозволяє алгоритму розпізнавати стан гаражних воріт та виявляти апаратні аномалії, ефективно компенсуючи сенсорний шум за допомогою налаштованих функцій належності.

FUZZY LOGIC, MATLAB, RASPBERRY PI, LIDAR, KY-024, TURTLEBOT3, AUTONOMOUS SYSTEM, GARAGE COMPLEX DOORS, ANOMALY DETECTION, MONITORING, UML DIAGRAMS, FCM, MENTAL MODELER, MOBILE ROBOT

ABSTRACT

Oleg Ostapenko. Design of an autonomous garage complex: a robotic gate status monitoring system. − Manuscript rights.

Explanatory note to the qualification work of a candidate for the first (bachelor's) level of higher education: 58 pages, 37 figures, 10 tables, 30 sources, 4 appendices.

The object of the study is the processes of automated monitoring and recognition of the state of the gate in the conditions of a garage complex.

The purpose of the work is to develop a software and hardware prototype of a robotic system for determining the state of the garage gate.

Research methods: fuzzy cognitive modeling (FCM), fuzzy set theory, computer modeling.

The work forms a conceptual and physical model of the system in the form of UML diagrams. The hardware prototype is built on the basis of the TurtleBot3 mobile platform with an OpenCR controller and a Raspberry Pi 4 microcomputer, which combines spatial data from the RPLidar A1 laser rangefinder and the readings of the KY-024 Hall magnetic sensor.

A logical-mathematical model of a fuzzy controller is designed and tested in the MATLAB environment (Fuzzy Logic Toolbox). The developed comprehensive rule base allows the algorithm to recognize the state of the garage door and detect hardware anomalies, effectively compensating for sensor noise using customized membership functions.

FUZZY LOGIC, MATLAB, RASPBERRY PI, LIDAR, KY-024, TURTLEBOT3, AUTONOMOUS SYSTEM, GARAGE COMPLEX DOORS, ANOMALY DETECTION, MONITORING, UML DIAGRAMS, FCM, MENTAL MODELER, MOBILE ROBOT

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ 9
2 ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ 10
2.1 Опис предметної області 10
2.2 Огляд підходів до вирішення завдання 11
2.2.1 Огляд та обґрунтування вибору LiDAR 11
2.2.2 Огляд та обґрунтування вибору робота 14
2.2.3 Методи визначення стану гаражних воріт 16
3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ВОРІТ В ГАРАЖНОМУ КОМПЛЕКСІ 19
3.1 Концептуальна модель системи 19
3.2 Логічна модель системи. Моделювання в Mental Modeler 20
3.3 Логічна модель системи. Моделювання в MATLAB 23
3.4 Фізична модель системи 33
4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ПРОТОТИП СИСТЕМИ 36
4.1 Топологія та компоненти апаратної частини прототипу системи 36
4.2 Архітектура та компоненти програмної частини прототипу системи 38
4.3 Опис даних та бібліотек підтримки компонентів системи 39
ВИСНОВКИ 41
СПИСОК ПОСИЛАНЬ 42
ДОДАТОК А ДІАГРАМИ UML 45
ДОДАТОК Б МОДЕЛЮВАННЯ В MENTAL MODELER 46
ДОДАТОК В МОДЕЛЮВАННЯ В MATLAB 49
ДОДАТОК Г МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ 58

ВСТУП

Автоматизація великих гаражних та складських комплексів з кожним роком стає все актуальнішою, кількість та масштаб такої інфраструктури зростають, тому потребується введення автоматизації у цій галузі. Постійні перевірки гаражів вручну доволі неефективні. Використання автономних роботів для патрулювання гаражних комплексів вирішує цю проблему. Роботи можуть безперервно стежити за станом воріт та використовувати певні протоколи поведінки залежно від ситуації.

Для коректної роботи такого робота треба виділити ключові поняття. Вирішити, які засоби навігації він буде використовувати для орієнтації в просторі, які дані він отримує від лазерних датчиків та як він розуміє, чи закриті ворота, чи ні. Помилка в навігації може викликати за собою неправильні результати моніторингу дверей, в цій системі все тісно взаємопов’язано.

Для основи системи використано 2D LiDAR та технології Інтернету речей. Такі системи мають певні обмеження: наприклад, основним недоліком 2D LiDAR є обмежена інформація про глибину, вимірювання глибини в 2D LiDAR стосуються вимірювання відстані до об'єкта. Оскільки 2D LiDAR сканує лише в одній площині, він може вимірювати глибину лише в цій площині. Також обмежена продуктивність в умовах навколишнього середовища, таких як дощ або туман. Вони розсіюють лазерні промені та впливають на точність даних. Проєктування системи допоможе знайти баланс між точністю роботи та можливостями заліза.

Для підготовки до написання коду спочатку будуть використані методи моделювання. UML-діаграми допоможуть зробити архітектуру системи більш оптимальною та дозволять візуалізувати зв’язки між сенсорами та виконавчими механізмами. А нечіткі когнітивні карти (FCM) допоможуть заздалегідь провести сценарії поведінки робота в умовах справжнього гаражного комплексу. Ці методи моделювання надають змогу мінімізувати ризики помилок та визначити можливості системи ще до її практичної реалізації.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Необхідно спроектувати систему моніторингу для автономного гаражного комплексу як фрагмент інфраструктури IoT, яка за допомогою мобільної роботизованої платформи забезпечуватиме контроль стану воріт. Основна задача полягає в реалізації алгоритму обробки просторових даних із 2D LiDAR. Система повинна в реальному часі аналізувати масиви даних для аналізу стану дверей гаражів.

Потрібно виконати аналіз предметної області та існуючих підходів до вирішення завдання моніторингу, а також визначити ключові функції системи. Також необхідно побудувати UML-діаграми варіантів використання та розгортання для опису архітектури програмно-апаратної частини проєкту.

Потрібно сформувати модель прийняття рішень у вигляді нечіткої когнітивної карти (FCM) та розробити детальну логічну модель у середовищі MATLAB. Для перевірки алгоритму систему потрібно протестувати за певними сценаріями. Треба перевірити логіку роботи робота в умовах невизначеності та апаратного шуму в різних ситуаціях.

2 ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ

2.1 Опис предметної області

Опис предметної області в роботі зроблено відповідно до вимог [1) 2)]. Для автоматизації моніторингу інфраструктури переважно використовують два технологічні підходи:

Стаціонарні системи на базі IoT та сенсорних мереж. Цей підхід передбачає використання фіксованих датчиків або камер, які збирають дані та передають їх через інтернет речей на централізовані хмарні платформи для аналізу в реальному часі. Принцип роботи та технології - у таких системах можуть застосовуватися гібридні набори датчиків. Наприклад, для моніторингу паркування використовують комбінацію пасивних інфрачервоних датчиків руху та ультразвукових далекомірів, дані з яких передаються через модулі Wi-Fi або інші протоколи з низьким енергоспоживанням. У сфері безпеки це традиційні камери відеоспостереження, закріплені на стовпах або стінах. Стаціонарні системи ефективні для створення стабільної системи координат, постійного моніторингу визначених точок входу та контролю цінних активів. Використання гібридних сенсорів дозволяє підвищити точність виявлення об'єктів та зменшити кількість хибних спрацьовувань. Головним недоліком є структурні сліпі зони, фіксовані камери та датчики мають статичний кут огляду, тому між ними виникають сліпі зони за перешкодами чи запаркованим транспортом. Така система є передбачуваною для зловмисників і вразливою до саботажу, адже датчики не можуть змінити своє положення. Крім того, ці пристрої лише фіксують події, а реагування залишається за людьми-охоронцями [3) 4)].

Автономні мобільні роботи для патрулювання [1)]. Цей підхід полягає у використанні рухомих платформ, які здатні самостійно переміщуватися територією, сканувати середовище та фіксувати аномалії. Принцип роботи та технології - такі роботи, як, наприклад, Knightscope K5, працюють повністю

автономно завдяки технології SLAM з використанням лідарів, сонарів, інерціальних вимірювальних модулів та одометрії. Вони оснащені 360-градусними камерами, мікрофонами, динаміками та системами розпізнавання. Переваги - усунення сліпих зон, зона покриття визначається тим, куди робот може фізично доїхати; адаптивність та якість даних, робот може наблизитися до підозрілого об'єкта або аномалії, щоб змінити кут огляду та зібрати якісніші докази; непередбачуваність, оскільки маршрути та час патрулювання можуть змінюватися, зловмисникам набагато складніше діяти. Недоліки таких роботів — це швидкий знос та високі вимоги до обслуговування, залежність від мереж зв'язку, складність і тривалість налаштування, психологічний дискомфорт для оточуючих [4) 5)].

Для моніторингу великих гаражних комплексів найоптимальнішим рішенням буде використання автономних мобільних платформ, один робот зможе забезпечити покриття доволі великої площі, використання 2D LiDAR спрощує інфраструктуру комплексу та надає точну фіксацію стана воріт гаражів.

2.2 Огляд підходів до вирішення завдання

2.2.1 Огляд та обґрунтування вибору LiDAR

Для системи автономного моніторингу головним є вибір сенсора для сканування простору. В гаражних комплексах найефективнішим є використання 2D LiDAR, це радіолокаційна система, яка визначає положення, швидкість та інші характерні величини цілі за допомогою випромінювання лазерного променю. Вона складається переважно з передавальної системи, приймальної системи, системи обробки інформації та інших частин [6)].

Для оптимального вибору LiDAR датчика було проаналізовано різні типи LiDAR, аналіз наведено в **Error! Reference source not found.** [7)10)].

Таблиця 2.1 - Характеристики LiDAR

Характеристика	RPLIDAR A1	YDLIDAR X4	LD-06
Радіус дії	До 12 метрів	До 10 метрів	12 метрів
Частота дискретизації	8000 Гц	5000 Гц	4500 Гц
Кутова роздільна здатність	1°	Від 0.48° до 0.52°	Від 0.5° до 1°
Швидкість сканування	від 2 до 10 Гц	від 6 до 12 Гц	Від 10 до 15 Гц
Інтерфейс	UART (micro USB)	UART	UART

Для системи обрано сканер RPLIDAR A1. Він працює за принципом лазерної триангуляції та забезпечує кругове сканування на 360°. Такий вибір обумовлений високою частотою дискретизації та якісною програмною підтримкою. Цей сенсор забезпечує належну щільність точок для виявлення дрібних змін стану воріт на відстані 12 метрів [11)].

Технічні характеристики RPLIDAR A1:

a) Основні параметри сканування:
    a. Радіус дії: від 0.15 до 12 метрів для білих об'єктів;
    b. частота дискретизації: 8000 вимірювань на секунду;
    c. швидкість обертання: налаштовується користувачем у діапазоні від 2 до 10 Гц шляхом зміни ШІМ-сигналу мотора. Типове та рекомендоване значення становить 5.5 Гц;
    d. кутова роздільна здатність: ≤1° (при типовій швидкості сканування 5.5 Гц);
    e. точність вимірювання: 1% від фактичної відстані для дистанції до 3 метрів; 2% для дистанції 3-5 м.
b) Електричні характеристики та інтерфейси:
    a. Інтерфейс передачі даних: послідовний порт UART зі швидкістю 115200 bps;
    b. напруга живлення: 5 В;
    c. енергоспоживання: близько 0.5 Вт [11)].

Для роботи з RPLIDAR A1 використовується бібліотека rplidar-roboticia на мові Python. Бібліотека rplidar-roboticia - це простий та легкий модуль для мови програмування Python, спеціально створений для роботи з лазерними

далекомірами серії RPLidar, вона призначена для реалізації протоколу зв'язку між комп'ютером та сканером [12)].

Бібліотека rplidar-roboticia працює на основі головного класу RPLidar, який відповідає за встановлення зв'язку та обмін даними з лазерними далекомірами серії RPLidar через послідовний порт. Читання даних відбувається у безперервному циклі за допомогою методів-генераторів, які ітеруються по вимірюваннях [13)].

Бібліотека надає два основні методи для збору даних, які повертають різну структуру:

a) Метод iter_scans(): Цей метод генерує дані цілими сканами. Він повертає масив вимірювань для одного повного оберту лідара. Кожне окреме вимірювання всередині цього списку представлене у вигляді кортежу з трьох елементів:
    a. quality: сила відбитого лазерного імпульсу;
    b. angle: кут напрямку вимірювання в градусах (від 0 до 360);
    c. distance: виміряна відстань до об'єкта в міліметрах. Якщо вимірювання недійсне, це значення дорівнює 0 [13)].
b) Метод iter_measurments(): Цей метод генерує дані по одній точці за раз. Замість списку кортежів, він повертає 4 окремі змінні для кожного зчитаного вимірювання:
    a. new_scan: приймає значення True, якщо це вимірювання є першим у новому оберті;
    b. quality: якість відбитого сигналу;
    c. angle: поточний кут;
    d. distance: поточна відстань у міліметрах [13)]

Для моніторингу стану воріт використовуються дані отримані через метод iter_scans(), RPLIDAR A1 має частоту дискретизації 8000 та швидкість обертання 5.5 Гц, загальна кількість точок в одному масиві розраховується по формулі - $N_{total} = f_{sample} / f_{scan} \approx 1455$. Кутова роздільна здатність - $\Delta\theta = 360° / N_{total} \approx 0.25°$.

2.2.2 Огляд та обґрунтування вибору робота

Робот - це програмована електронна машина або пристрій, який виконує корисні завдання для людей або обладнання та має певний ступінь автономності, здатність виконувати завдання на основі поточного стану та даних з датчиків без втручання людини [14)].

Залежно від мобільності та здатності до пересування роботи поділяються на такі основні типи:

a) Шарнірні роботи або роботизовані руки - мають дуже обмежену здатність до самостійного пересування у просторі, але ідеально підходять для маніпуляцій з продуктами, інструментами, для пакування та збірки на місці;
b) автоматизовані керовані транспортні засоби - переміщуються лише за чітко визначеним, заздалегідь прокладеним маршрутом;
c) автономні мобільні роботи - здатні вільно переміщуватися простором і самостійно приймати рішення практично в реальному часі. Вони використовують бортові процесори та датчики для орієнтування у середовищі;
d) гуманоїди - як правило, це різновид автономних мобільних роботів, які мають людську форму корпусу і здатні виконувати дії, подібні до тих, що роблять люди;
e) коботи - спеціально спроєктовані для безпосередньої та безпечної спільної роботи поруч із людьми; вони допомагають виконувати небезпечні, рутинні або повторювані завдання [15)].

Для системи було обрано мобільну платформу - TurtleBot3. TurtleBot3 - це компактна, доступна та програмована мобільна платформа на базі ROS [16)].

Технічні характеристики TurtleBot3 Waffle Pi:

a) Максимальна лінійна швидкість: 0.26 м/с.
b) Максимальна кутова швидкість: 1.82 рад/с.
c) Максимальне корисне навантаження: 30 кг.

d) Габарити (Довжина x Ширина x Висота): 281 x 306 x 141 мм.

e) Вага (разом з комп'ютером, акумулятором і датчиками): 1.8 кг.

f) Здатність долати перешкоди (висота): 10 мм або нижче

g) Очікуваний час роботи: 2 год.

h) Очікуваний час заряджання: 2 год 30 хв [17)].

Робота TurtleBot3 Waffle Pi зображено на Рисунок 2.1.

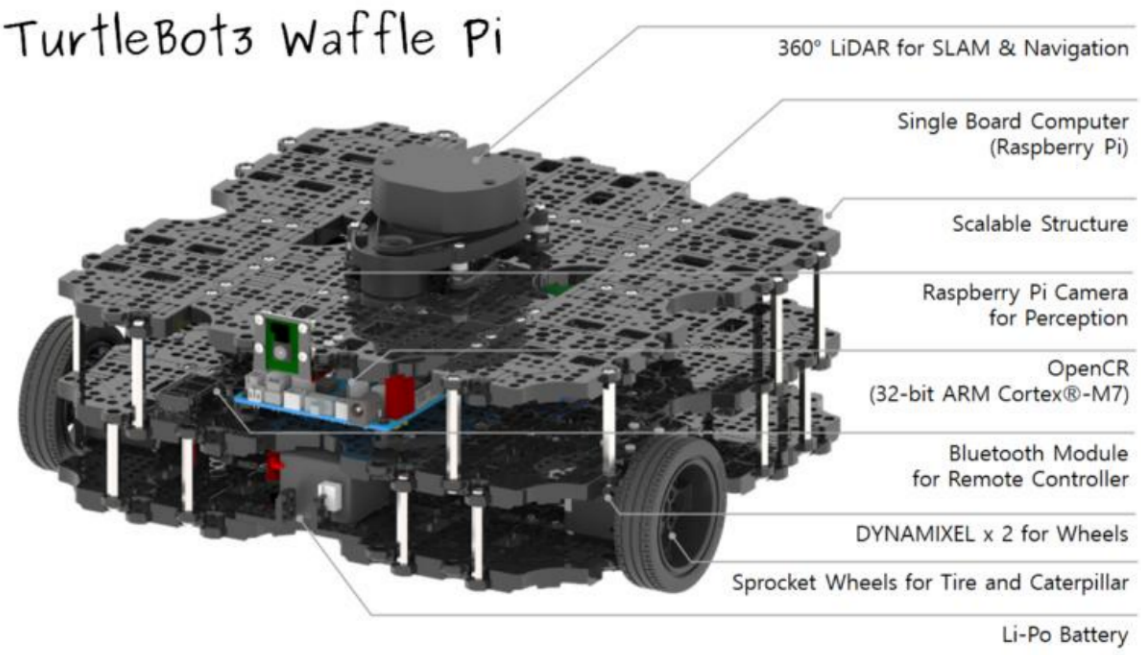


Рисунок 2.1 - TurtleBot3 Waffle Pi

Вибір TurtleBot3 Waffle Pi зумовлений його високою модульністю та можливістю встановити на базову платформу додатковий вертикальний каркас для підняття лідара на достатню висоту. Це дуже важливо для забезпечення прямої видимості воріт гаражів над порогом та дрібними перешкодами. Габарити робота дозволяють йому вільно маневрувати у вузьких проходах гаражних комплексів, а максимальна швидкість 0.26 м/с є оптимальною для отримання щільної хмари точок від RPLIDAR A1.

2.2.3 Методи визначення стану гаражних воріт

Для розрахунку математичних параметрів системи було визначено базові геометричні характеристики типового гаражного комплексу та платформи:

a) Ширина проїзду: 3 м;
b) Ширина гаражного боксу: 3 м;
c) Глибина боксу: 5.5 м;
d) Товщина міжбоксових перегородок: 120 мм;
e) Тип воріт: підйомні, відкриваються на всю ширину боксу (3 м).
f) Габарити робота TurtleBot3 Waffle Pi: 30 см (збільшено для наочності);
g) Масштаб моделювання: 1 м = 100 px.

Схему сканування гаражів показано на Рисунок 2.2.

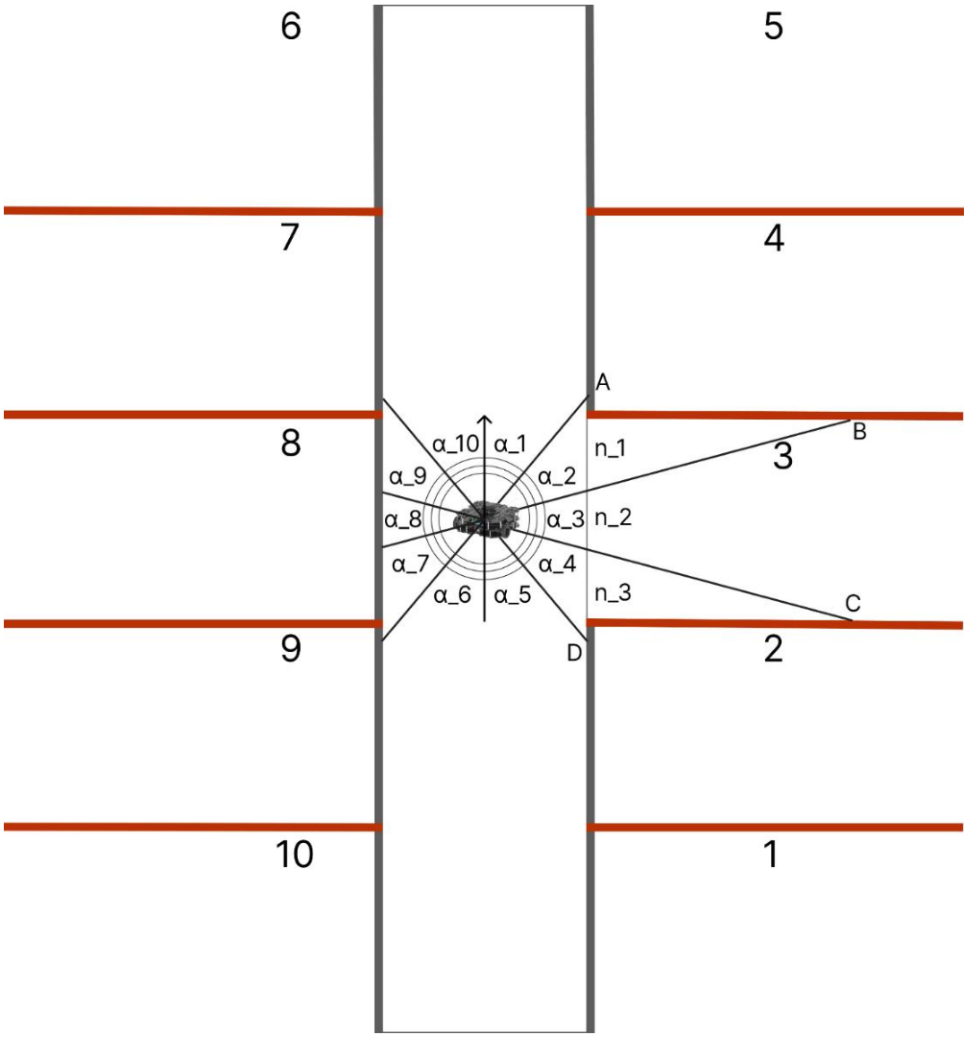


Рисунок 2.2 – Схема сканування гаражів

Алгоритм фіксації стану воріт базується на аналізі щільності та глибини точкової хмари в кутових діапазонах. За допомогою цього можна визначити очікувану кількість променів n_expected у будь-якому кутовому секторі, які відповідають місцезнаходженню воріт.

$$n_{expected} = \frac{\alpha_{end} - \alpha_{start}}{\Delta\theta} \quad (2.1)$$

де α_{end} , α_{start} - це межі кутового сектора, а $\Delta\theta$ - кутова роздільна здатність датчика.

Відповідно до схеми сканування, проведемо розрахунок очікуваної кількості променів для трьох цільових секторів:

a) Сектор α_3: при куті 30° очікувана кількість точок становить $n_{expected}$ = 30 / 0.25 =120 променів.
b) Сектор α_2: при куті 35° очікувана кількість точок становить $n_{expected}$ = 30 / 0.25 = 140 променів.
c) Сектор α_4: при куті 35° очікувана кількість точок становить $n_{expected}$ = 30 / 0.25 = 140 променів.

Для кожного окремого променя l_i у вибраному секторі визначається показник n_i:

n_i = 1, якщо l_i > 5 метрів та n_i = 0, якщо l_i < 5 метрів.

Значення l_i відповідає довжині конкретного променя в межах сектора. Якщо промінь проходить далі ніж на 5 метрів, система робить висновок, що він пройшов далі дверей гаражу.

Сумарна кількість далеких променів у секторі розраховується як:

$$\hat{n} = \sum_{i=1}^{n_{expected}} n_i \quad (2.2)$$

Отримане значення знаходиться в межах $0 < \hat{n} < n_{expected}$. Для подальшого аналізу використовується нормований показник n_norm:

$$n_norm = \frac{\hat{n}}{n_{expected}}, \text{ де } 0 < n_norm < 1 \quad (2.3)$$

Також через те що робот постійно рухається треба додати показник який відображає різницю між поточною та попередньою кількістю далеких променів:

$$\Delta n = \frac{\hat{n}(t) - \hat{n}(t-1)}{n_{expected}} \quad (2.4)$$

де $\hat{n}(t)$ - кількість променів, що пройшли понад 5 метрів у поточний момент часу, а $\hat{n}(t-1)$ - аналогічний показник для попереднього кроку вимірювання.

Логіка прийняття рішення системою:

a) Якщо n_norm → 0, більшість променів мають довжину менше 5 м, система робить висновок, що ворота гаражу закриті.
b) Якщо n_norm → 1, значна частина променів проходить всередину гаража на велику відстань, система включає тривогу, що ворота відкриті.

В розділі було використано онлайн-інструмент NotebookLM [18)].

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ВОРІТ В ГАРАЖНОМУ КОМПЛЕКСІ

3.1 Концептуальна модель системи

Основними акторами системи є адміністратор системи , який відповідає за технічне налаштування параметрів сканування, та співробітник охорони, який отримує інформацію про стан об'єктів.

Адміністратор системи налаштовує параметри робота та ініціює автономне патрулювання. Робот рухається за маршрутом та система автоматично підтримує його положення по центру проходу, одночасно виконується збір та аналіз даних з LiDAR. Після фіксації стану воріт гаража, якщо вони відкриті - система надсилає тривожне сповіщення, яке отримує охорона.

Сенс акторів та прецедентів системи представлено у вигляді таблиць (Таблиця 3.1 та Таблиця 3.2). Концептуальну модель зображено на Use Case diagram, яка наведена в додатку А (Рисунок А.1).

Для побудови Use Case diagram використано середовище Draw.io [19)].

Таблиця 3.1 - Актори системи

Ім’я актора системи (англ. мова)	Пояснення призначення (укр. мова)
System Administrator	Технічний фахівець, який здійснює налаштування параметрів лідара та конфігурує маршрути робота.
Security Officer	Користувач, який здійснює моніторинг у реальному часі, отримує сповіщення про відкриті ворота та реагує на зафіксовані аномалії.

Таблиця 3.2 - Варіанти використання системи

Ім’я актора системи (англ. мова)	Пояснення призначення (укр. мова)
Set scanning parameters	Процес встановлення критичних значень кутів та порогів відстані для коректної роботи алгоритму.

Autonomous patrolling	Виконання роботом повного циклу автономного об’їзду території гаражного комплексу.
Analyze LiDAR point cloud	Безперервна обробка масивів даних від датчика для фільтрації променів у робочих секторах.
Identify gate status	Математичний розрахунок кількості відбиттів та порівняння їх з еталоном для визначення стану воріт.
Generate alarm notification	Автоматичне формування та надсилання сигналу тривоги охоронцю у разі фіксації відчиненого боксу.
Traffic in the middle of the road	Автоматичне коригування курсу робота для підтримки положення строго по центру дороги на основі порівняння відстаней до лівої та правої стін.
Movement along a given route	Переміщення робота за запрограмованим маршрутом патрулювання.

3.2 Логічна модель системи. Моделювання в Mental Modeler

Моделювання FCM дозволяє дослідити взаємозв'язки між технічними параметрами робота, факторами навколишнього середовища та надійністю системи [20)]. Для побудови моделі та проведення сценарного аналізу використано спеціалізоване середовище Mental Modeler [21)].

Для побудови моделі функціонування роботизованого комплексу було обрано 13 компонентів, їх опис наведено в Таблиця 3.3.

Таблиця 3.3 - Компоненти FCM

Назва компоненту (англ.мова)	Пояснення призначення (укр.мова)
Linear speed stability	Постійність руху платформи для забезпечення стабільного сканування та щільності точок.
Corridor centering accuracy	Точність утримання робота по центру проходу, що забезпечує правильні кути огляду воріт.
Platform vibration level	Рівень фізичних вібрацій, що вносять шум у хмару точок під час руху.
Passageway configuration	Геометричні параметри проходу - ширина, паралельність стін, що впливають на відстань.
ROS data frequency	Швидкість оновлення та передачі даних від драйвера лідара до обробного Python-скрипта.
Gate material reflectivity	Інтенсивність відбиття лазерного променя від поверхні воріт, залежить від їх матеріалу.
Optical system dustiness	Ступінь забруднення лінзи лідара, що знижує точність зчитування та дальність роботи.
Weather conditions	Вплив зовнішнього середовища на розсіювання лазерного випромінювання.

Permissible error	Встановлений програмний поріг чутливості до відхилень фактичної відстані від очікуваної.
Identification reliability	Ключовий концепт - підсумкова точність висновку системи про стан гаражних воріт.
False alarm probability	Ризик виникнення помилкових сповіщень через шуми датчиків або сторонні перешкоди.
Foreign objects presence	Наявність у коридорі людей або техники, що псують результати сканування.
Quality of determining the characteristics of the lidar data sector	Якість даних від LiDAR які містять характеристики промінів.

Структура FCM вийшла центричною. Усі основні зв'язки сходяться до ключового концепту Identification reliability. Він працює як підсумковий показник, на який позитивно впливають стабільна швидкість, правильне центрування робота та якість обробки даних, а негативний вплив викликають технічні завади, вібрації, пил та сторонні предмети.

Модель та матриця впливу компонентів FCM зображені в додатку Б на Рисунок Б.1 та Рисунок Б.2.

Аналіз структурної моделі FCM показав, що система має високий ступінь керованості. Значення показника Density = 0.096 свідчить про розрідженість графа, що характерно для систем моніторингу, де кожен датчик вносить незалежний внесок у фінальний результат. Driver - 10 підтверджує, що система враховує великий спектр зовнішніх та апаратних факторів. Проміжні компоненти False alarm probability та Quality of determining the characteristics of the lidar data sector дозволили об’єднати негативні впливи в логічний ланцюг, що покращило прозорість прийняття рішень. Показник Complexity становить 0.1 це невелика складність моделі, але це забезпечує високу швидкість збіжності алгоритму та однозначність висновків про стан воріт.

Найбільш значущих змін зазнав показник складності моделі, він визначається як співвідношення проміжних вузлів до вузлів-передавачів. В модель було введено два проміжних компонента, це дозволило перенаправити вплив зовнішніх чинників через логічні вузли. Модель почала імітувати реальну роботу алгоритму, де завади спочатку створюють помилкову фіксацію, яка вже потім знижує загальну надійність висновку.

Значення та оцінка метрик FCM зображено на Таблиця 3.4.

Таблиця 3.4 - Значення та оцінка метрик FCM системи

Показник нечіткої когнітивної моделі (FCM)	Значення показника FCM	Оцінка значення показника
N (Компонентів)	13	Достатня кількість для опису роботи автономного робота та його сенсорів.
C (Зв'язків)	15	Свідчить про наявність прямих та чітких логічних залежностей між датчиками та результатом.
N1 (Drivers)	10	Значення вказує на врахування широкого спектра вхідних параметрів.
N2 (Ordinary)	2	Наявність двох проміжного вузла мінімізує накопичення помилок при передачі сигналу.
N3 (Receivers)	1	Чітка спрямованість системи на один ключовий результат - надійність ідентифікації воріт.
Центральність (середня)	1,154	Більшість чинників мають однаковий ступінь важливості для фінального висновку.
Зв’язність (C/N)	1,154	Низька зв'язність забезпечує високу швидкість обробки даних у реальному часі.
Складність моделі (N3/N1)	0,1	Низька складність характерна для надійних діагностичних систем з однозначною логікою.
Щільність моделі	0,096	Розріджена структура виключає конфлікти між незалежними показниками різних сенсорів.

Сценарії моделювання FCM:

a) Критичне погіршення умов середовища. Sigmoid Function - одночасне підвищення рівнів вібрації платформи, запиленості оптики, появи сторонніх об'єктів та погіршення погодних умов. Таке велике навантаження значно впливає на точність системи, оновлені показники - False alarm probability = 0.01, a Identification reliability = -0.01 (Рисунок Б.3). Отримані дані підтверджують високу чутливість апаратної частини лідара до фізичних завад, без спеціальної програмної обробки та фільтрації система не гарантує високу точність.
b) Критичне погіршення умов середовища. Hyperbolic Tangent Function - також підвищено фізичний негативний вплив, функція Tanh демонструє

більш сильну реакцію системи, за несприятливих умов апаратна похибка стає домінуючою (Рисунок Б.4).

c) Програмна оптимізація та стабілізація системи. Sigmoid Function - робота системи за умови оптимального налаштування програмних параметрів. В межах моделювання було максимізовано чинники, що залежать від алгоритмічної частини (Рисунок Б.5). Показник Identification reliability зріс до 0.08, а якість визначення характеристик сектору даних лідара до 0.11, це свідчить про високу адаптивність математичної моделі. Стабільність ROS-інфраструктури та якісне програмне забезпечення здатні нівелювати більшість апаратних обмежень лідара.
d) Програмна оптимізація та стабілізація системи. Hyperbolic Tangent Function - використання тангенціальної функції активації показало значне зростання стабільності системи, програмна конфігурація та якість передачі даних є домінуючими факторами для забезпечення надійності моніторингу (Рисунок Б.6).

3.3 Логічна модель системи. Моделювання в MATLAB

Для реалізації логіки прийняття рішень системою моніторингу було обрано математичний апарат нечіткої логіки. Моделювання виконано у середовищі MATLAB з використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox [4422)25)]. Модель повинна аналізувати стан гаражних воріт під час руху робота на основі даних від LiDAR та аналогового датчика магнітного поля. Загальний вигляд розробленої архітектури нечіткого виведення наведено в додатку В (Рисунок В.1).

Використано алгоритм нечіткого виведення типу Mamdani. Цей алгоритм обрано через його здатність максимально наближено описувати людський досвід та гнучкість у налаштуванні логічних правил.

В моделі використовується метод Centroid для етапу дефазифікації вихідної змінної. Метод Centroid дозволяє системі знаходити один висновок між

показниками всіх трьох цільових секторів, це зменшує кількість випадкових помилок окремих променів і забезпечує плавний перехід системи між станами. Це підвищує надійність виявлення аномалій, що є дуже важливим для систем моніторингу та безпеки.

Для визначення простору навколо робота використовуються 3 вхідні змінні - S2_n, S3_n, S4_n. Ці змінні показують, яка нормована кількість променів пройшла вглиб гаража в діапазоні від 0 до 1. Для цих змінних створено чотири терми: Closed, Mostly_Closed, Mostly_Open та Open. Проміжні терми підвищують чутливості системи, це допомагає уникати різких стрибків під час прийняття рішень. Параметри термів забезпечують максимальну стабільність на крайніх значеннях та безперервну чутливість у зонах часткового перекриття. Графічне відображення налаштованих функцій належності для цих змінних у вікні Membership Function Editor наведено в додатку В (Рисунок В.2).

Для фіксації динаміки зміни простору під час руху робота створено змінні - S2_delta, S3_delta та S4_delta. Вони відображають різницю нормованої кількості променів, які пройшли вглиб гаража, між поточним та попереднім кроками вимірювання. Діапазон значень цих змінних – [-1;1]. Створено три терми: Decreasing, Steady та Increasing. Динамічні показники допомагають системі робити висновки точнішими та робити прогнози стану воріт, ще до того, як робот опиниться посередині гаражу. Графічне відображення налаштованих функцій належності для змінних динаміки у вікні Membership Function Editor наведено в додатку В (Рисунок В.3).

Для орієнтації робота відносно гаражів створено вхідну змінну - Tag_Distance, вона допомагає уникнути хибним спрацюванням алгоритму, коли робот рухається між гаражами. Ця змінна базується на показниках датчика Холла і визначає положення робота відносно центру воріт у нормованому діапазоні від -1 до 1. Використовуються три лінгвістичні терми: Approaching, Center та Leaving. Терм Center налаштовано за допомогою трапецієподібної функції, це створює зону стабільності. Система не робитиме зайвих коригувань і надаватиме пріоритет даним лідара, коли робот перебуває безпосередньо перед воротами.

Графічне відображення функцій належності для цієї змінної наведено в додатку В (Рисунок В.4).

Вихідна змінна Door_State, відображає підсумковий висновок алгоритму щодо стану гаражних воріт. Діапазон значень змінної становить від 0 до 1. Визначено три лінгвістичні терми: Closed, Undefined та Open. Для забезпечення стабільності крайніх станів використано трапецієподібні функції належності, а для зони невизначеності трикутну функцію. Графічне відображення функцій належності вихідної змінної наведено в додатку В (Рисунок В.5).

Опис вхідних та вихідних змінних нечіткої логічної системи наведено в Таблиця 3.5.

Таблиця 3.5 - Вхідні та вихідні змінні нечіткої логічної системи

Назва нечіткої вхідної змінної або терму (англ.мова)	Пояснення призначення українською мовою
S2_n, S3_n, S4_n	Вхідні змінні. Статична нормована кількість далеких променів для цільових секторів сканування 2, 3 та 4. Діапазон: [0;1].
Closed	Терм: закритий простір. Тип функції: trapmf. Параметри: [-0.1 0 0.1 0.3].
Mostly_Closed	Терм: скоріше закритий простір. Тип функції: trimf. Параметри: [0.1 0.35 0.6].
Mostly_Open	Терм: скоріше відкритий простір. Тип функції: trimf. Параметри: [0.4 0.65 0.9].
Open	Терм: відкритий простір. Тип функції: трапецієподібна trapmf. Параметри: [0.7 0.9 1 1.1].
S2_delta, S3_delta, S4_delta	Вхідні змінні. Динаміка зміни кількості променів. Діапазон: [-1; 1].
Decreasing	Терм: простір швидко закривається. Тип: trapmf. Параметри: [-1.1 -1 -0.3 -0.1].
Steady	Терм: ситуація стабільна. Тип: trapmf. Параметри: [-0.3 -0.1 0.1 0.3].
Increasing	Терм: простір швидко відкривається. Тип: trapmf. Параметри: [0.1 0.3 1 1.1].
Tag_Distance	Вхідна змінна. Дистанція до магнітної мітки. Діапазон значень: [-1; 1].
Approaching	Терм: робот наближається до гаража. Тип функції: trapmf. Параметри: [-1.5 -1 -0.3 -0.1].
Center	Терм: робот знаходиться ідеально по центру воріт. Тип функції: trapmf. Параметри: [-0.3 -0.1 0.1 0.3].
Leaving	Терм: робот проїхав гараж та віддаляється. Тип функції: trapmf. Параметри: [0.1 0.3 1 1.5].

Назва нечіткої вихідної змінної або терму (англ.мова)*	Пояснення призначення українською мовою
Door_State	Вихідна змінна. Підсумковий статус гаражних воріт. Діапазон значень: [0; 1].
Closed	Терм: ворота зачинені, стан безпечний. Тип функції: trapmf. Параметри: [-0.1 0 0.3 0.5].
Undefined	Терм: стан невизначено. Тип функції: trimf. Параметри: [0.3 0.5 0.7].
Open	Терм: ворота відчинені, генерується сигнал тривоги. Тип функції: trapmf. Параметри: [0.5 0.7 1 1.1].

Створено базу з 25 правил. Правила враховують статичну геометрію променів LiDAR та динаміку зміни відстані. Система розпізнає напрямок руху відносно воріт. Загальний вигляд бази правил наведено в додатку В (Рисунок В.6).

Правила ідеального позиціювання, зона сканування, де всі три сектори спрямовані у площину поточних воріт (Рисунок 3.1):

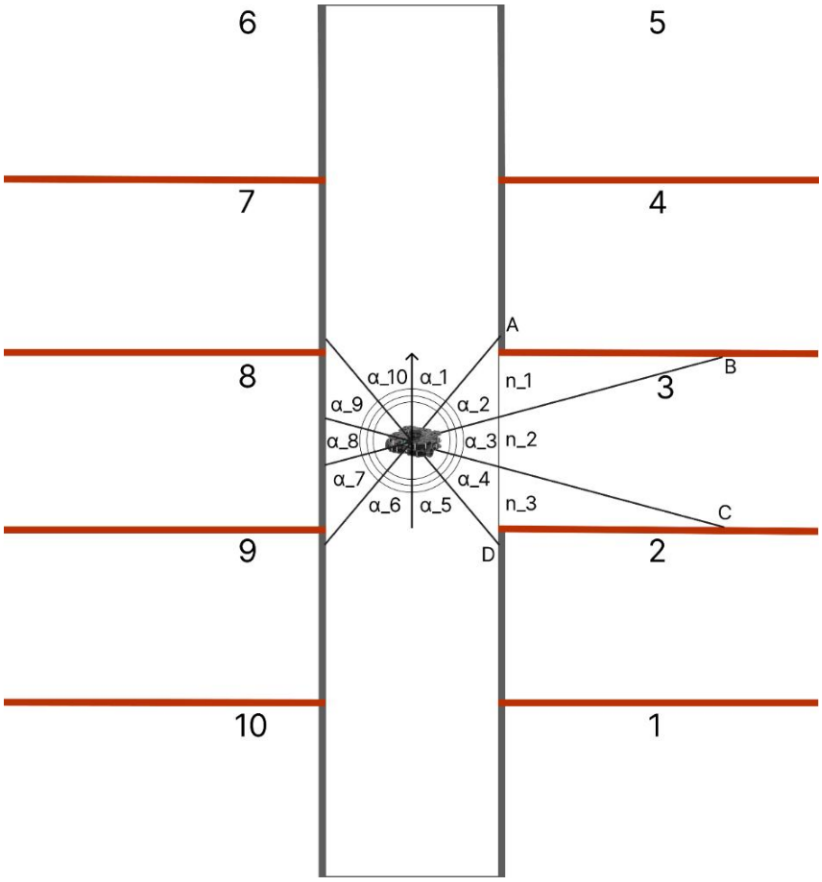


Рисунок 3.1 - Ідеальне позиціювання робота

1) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Closed) then (Door_State is Closed)

2) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Open) AND (S3_n is Open) AND (S4_n is Open) then (Door_State is Open)
3) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Mostly_Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Mostly_Closed) then (Door_State is Closed)
4) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Mostly_Open) AND (S3_n is Open) AND (S4_n is Mostly_Open) then (Door_State is Open)
5) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Mostly_Open) AND (S3_n is Open) AND (S4_n is Mostly_Open) AND (S2_delta is Increasing) AND (S3_delta is Steady) AND (S4_delta is Decreasing) then (Door_State is Open)
6) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Mostly_Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Mostly_Closed) AND (S2_delta is Increasing) AND (S3_delta is Steady) AND (S4_delta is Decreasing) then (Door_State is Closed)

Правила наближення, робот заїжджає в цільову зону під кутом, передній сектор першим фіксує простір цільових воріт, а задній спрямований на попередню стіну. Для швидкого виявлення відчинених воріт використовуються данні динаміки переднього сектора (Рисунок 3.2):

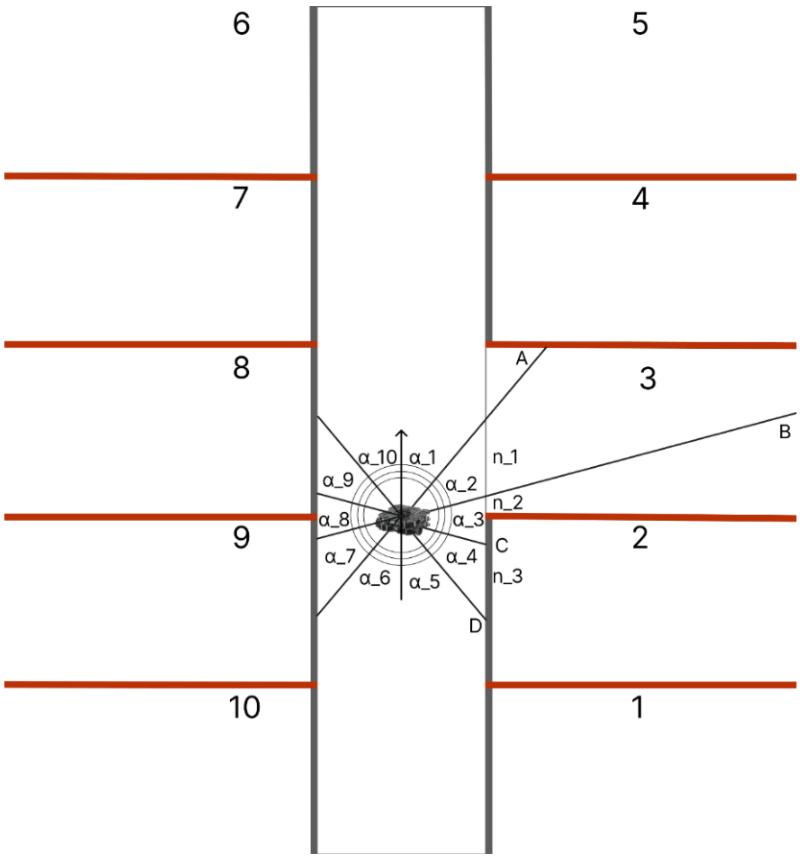


Рисунок 3.2 - Наближення робота до відкритих воріт

7) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Closed) then (Door_State is Closed)
8) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Open) AND (S3_n is Open) AND (S4_n is Open) then (Door_State is Open)
9) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Open) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Closed) AND (S2_delta is Increasing) then (Door_State is Open)
10) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Mostly_Open) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Closed) AND (S2_delta is Increasing) then (Door_State is Open)
11) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Mostly_Open) AND (S3_n is Mostly_Open) AND (S2_delta is Increasing) AND (S3_delta is Increasing) then (Door_State is Open)
12) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Mostly_Closed) AND (S2_delta is Decreasing) then (Door_State is Closed)

Правила віддалення, задній сектор фіксує простір поточного гаражу, а передній сектор вже спрямований в стіну наступного боксу:

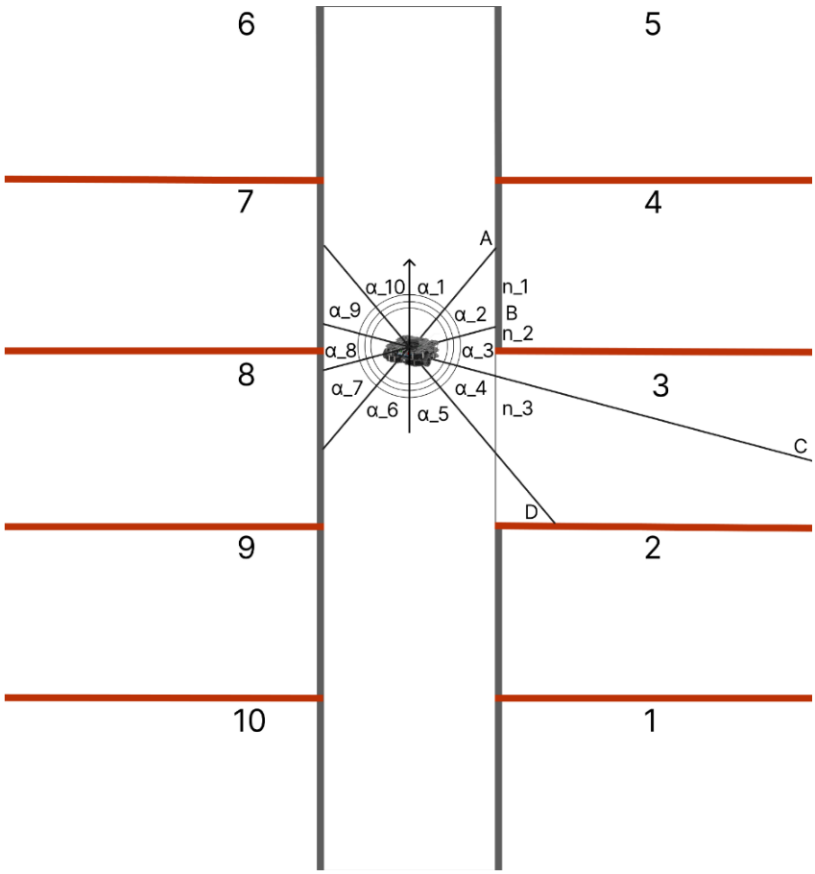


Рисунок 3.3 - Віддалення робота від відкритого боксу

13) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S2_n is Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Closed) then (Door_State is Closed)

14) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S2_n is Open) AND (S3_n is Open) AND (S4_n is Open) then (Door_State is Open)

15) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S2_n is Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Open) AND (S4_delta is Steady) then (Door_State is Open)

16) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S4_n is Mostly_Open) AND (S4_delta is Steady) then (Door_State is Open)

17) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S4_n is Mostly_Closed) AND (S4_delta is Decreasing) then (Door_State is Closed)

Правила відкритих зон, гаражі відчинені і попереду, і позаду робота, а центральний сектор фіксує вузьку перегородку між ними (Рисунок 3.4):

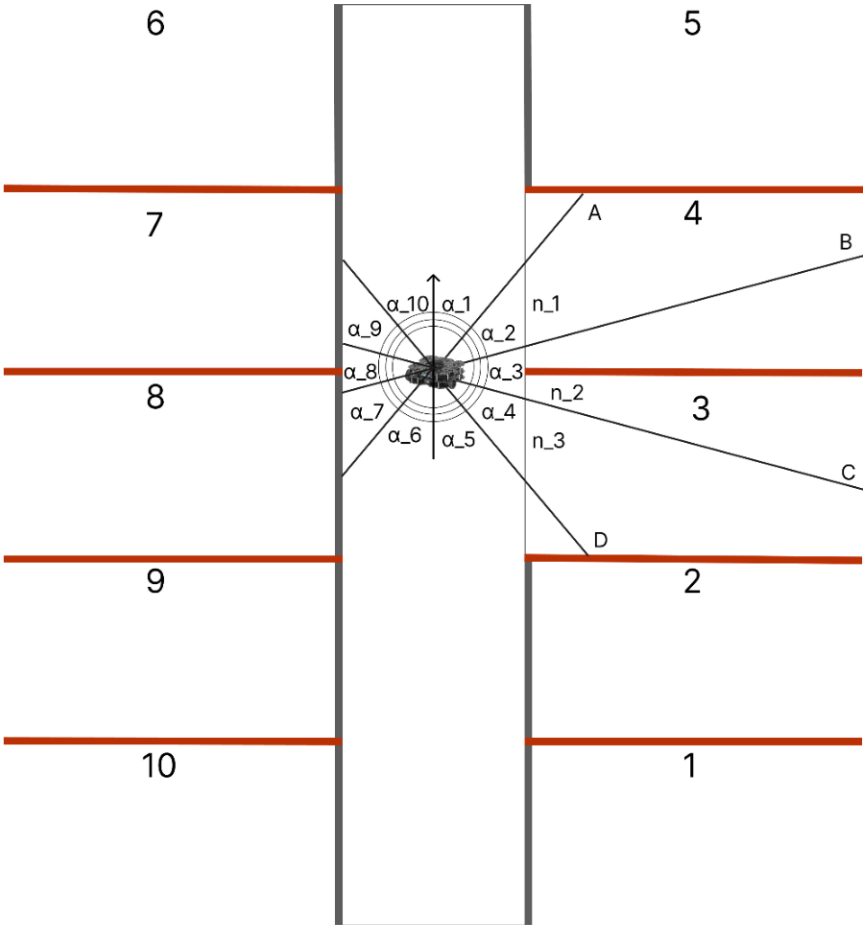


Рисунок 3.4 - Робот знаходиться між відкритими боксами

18) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Open) AND (S4_n is Open) then (Door_State is Open)

19) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S2_n is Open) AND (S4_n is Open) then (Door_State is Open)

Правила для аномалій, система отримує невизначеність, щоб привернути увагу оператора або охоронця. Охоплюють неможливі стани ролетних воріт, та моменти коли ворота працюють в реальному часі (Рисунок 3.5):

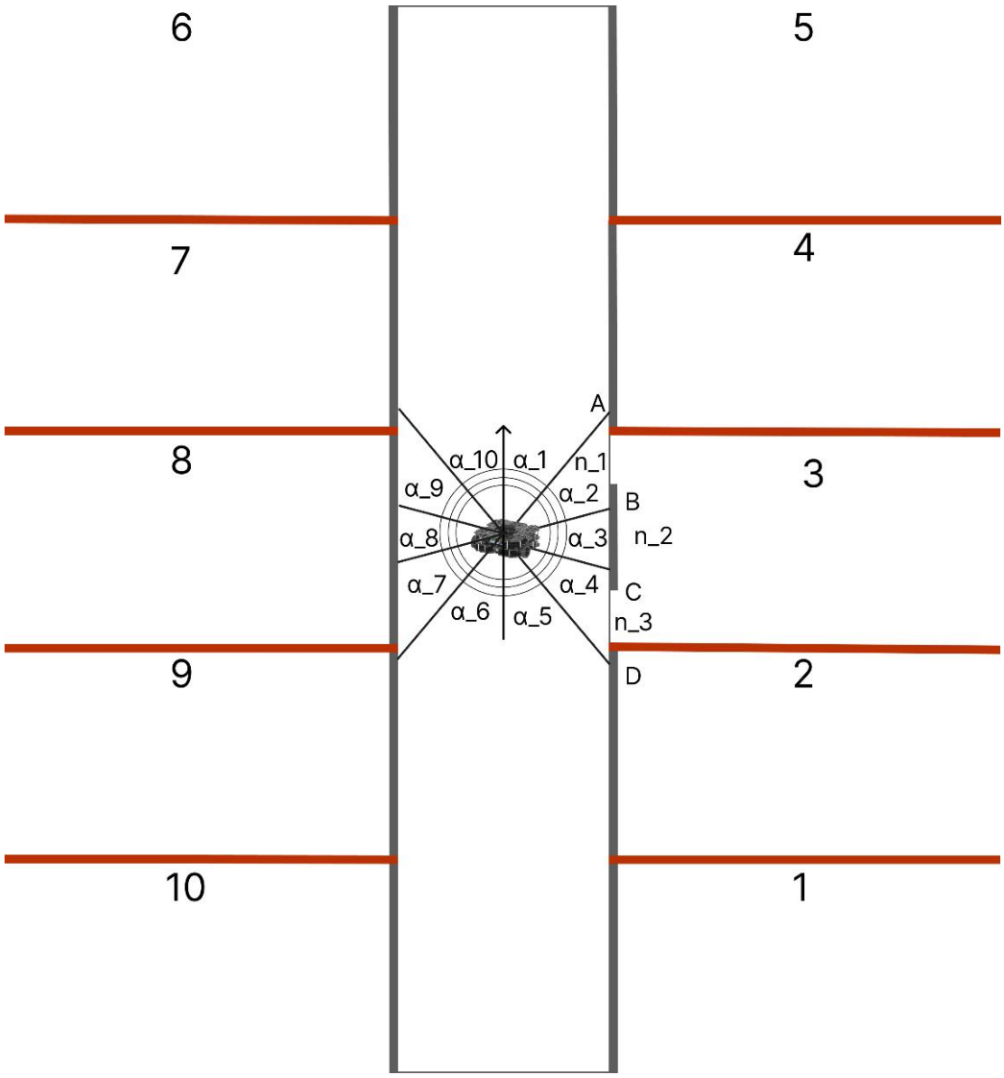


Рисунок 3.5 - Аномальний стан гаражних воріт

20) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Open) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Open) then (Door_State is Undefined)

21) If (Tag_Distance is Center) AND (S2_n is Closed) AND (S3_n is Open) AND (S4_n is Closed) then (Door_State is Undefined)

22) If (Tag_Distance is Approaching) AND (S2_n is Open) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Closed) AND (S2_delta is Steady) then (Door_State is Undefined)

23) If (Tag_Distance is Leaving) AND (S2_n is Closed) AND (S3_n is Closed) AND (S4_n is Open) AND (S4_delta is Decreasing) then (Door_State is Undefined)

24) If (Tag_Distance is Center) AND (S3_n is Mostly_Closed) AND (S3_delta is Increasing) then (Door_State is Undefined)

25) If (Tag_Distance is Center) AND (S3_n is Mostly_Open) AND (S3_delta is Decreasing) then (Door_State is Undefined)

Для тестувань системи використано інструмент MATLAB - Rule Viewer:

Проведено покрокове нечітке моделювання часової послідовності поведінки об’єкту, візуалізацію кожної точки моделювання показано на Рисунок 3.6.

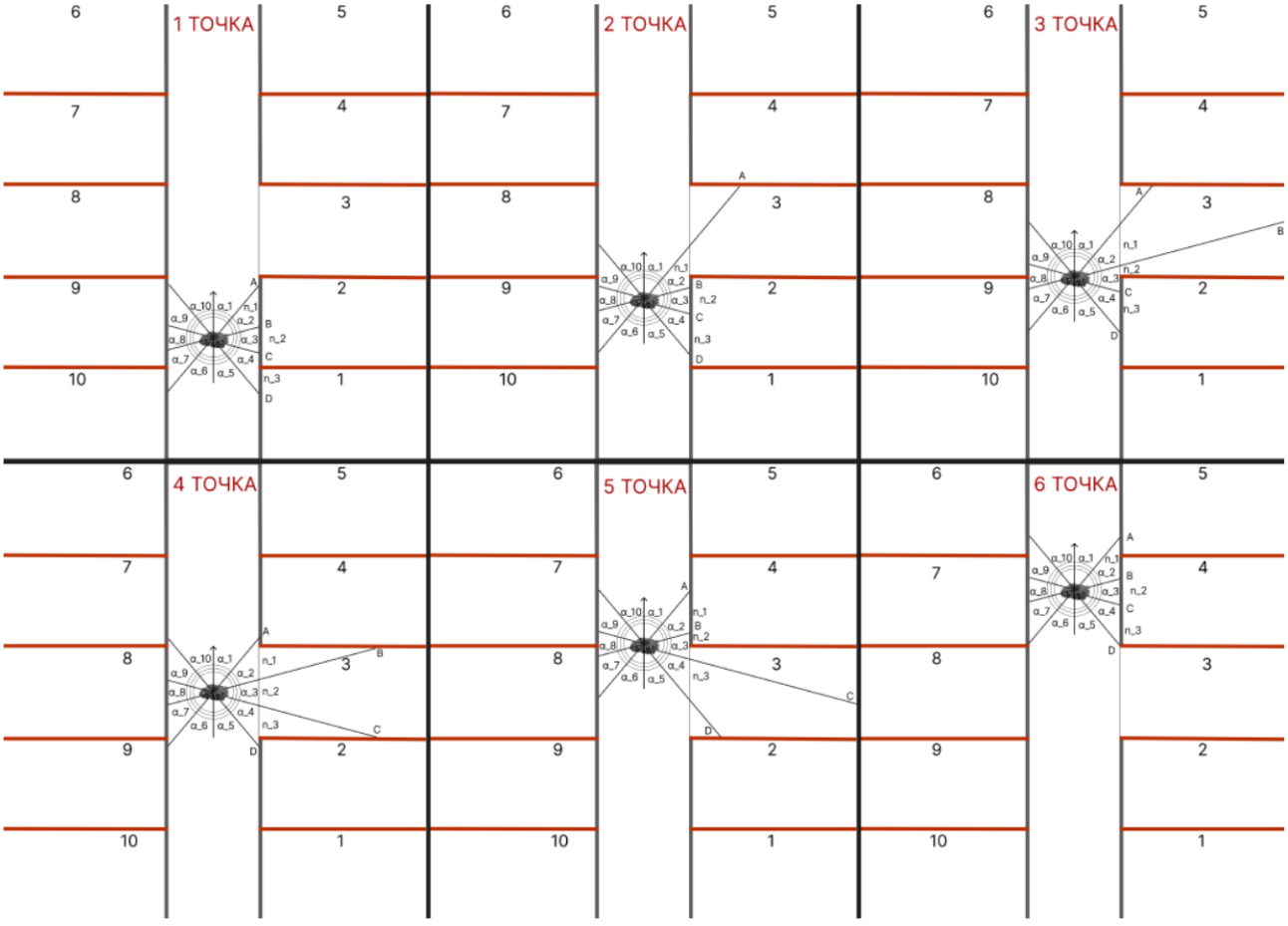


Рисунок 3.6 - Візуалізація моделювання системи

Результати покрокового моделювання наведено в Таблиця 3.6.

Таблиця 3.6 - План експериментів

N точки	S2_n	S3_n	S4_n	S2_delta	S3_delta	S4_delta	Tag_Distance	Door_State
1	0	0	0	0	0	0	-0.2	0.223
2	0.6	0	0	0	0	0	0.2	0.5
3	1	0.3	0	0.4	0	0	-0.9	0.5
4	0.9	1	0.9	-0.1	0.7	0	0	0.798
5	0	0.5	1	-0.9	-0.5	0.1	0.9	0.5
6	0	0	0	0	-0.5	-1	0	0.202

Опис результатів покрокового моделювання:

a) Точка 1 (Рисунок В.7, Рисунок 3.*6* “Точка 1”): робот знаходиться перед стіною, тому система фіксує статус - закрито (0.223).

b) Точка 2 (Рисунок В.8, Рисунок 3.*6* “Точка 2”): починається перехідна зона з частковою видимістю простору, що активує безпечний запобіжний стан - невизначено (0.5).

c) Точка 3 (Рисунок В.9, Рисунок 3.*6* “Точка 3”): передній сектор лідара вже фіксує ворота, але задній ще проходить стіну, тому алгоритм продовжує утримувати стан невизначено (0.5).

d) Точка 4 (Рисунок В.10, Рисунок 3.*6* “Точка 4”): усі датчики підтверджують ідеальне центрування, і контролер видає максимальний показник цільового статусу - відкрито (0.798).

e) Точка 5 (Рисунок В.11, Рисунок 3.*6* “Точка 5”): робот виїжджає з зони воріт, датчики фіксують змішану картину, що знову переводить систему в режим - невизначено (0.5).

f) Точка 6 (Рисунок В.12, Рисунок 3.*6* “Точка 6”): робот повністю повертається до руху вздовж наступної стіни, і статус стабілізується на базовому значенні - закрито (0.202).

Додатково протестовані сценарії:

Сценарій 1 - зачинені ворота. Робот знаходиться по центру перед зачиненим боксом. Усі сектори лідара фіксують що промені не проходять вглиб

гаражу [0 0 0 0 0 0 0], динаміка відсутня. Система підтверджує стан безпеки. Тестування зображено в додатку В (Рисунок В.13).

Сценарій 2 - виявлення відчинених воріт. Робот знаходиться по центру перед відчиненим боксом. Усі три сектори фіксують глибоке проникнення промінів вглиб воріт [0.9 0.9 0.9 0 0 0 0]. Система генерує сигнал тривоги. Тестування зображено в додатку В (Рисунок В.14).

Сценарій 3 - аномалія. Робот стоїть по центру, фіксується конфлікт даних - бокові сектори бачать відкритий простір, а центральний сектор бачить перешкоду [0.9 0.1 0.9 0 0 0 0]. Це неможлива ситуація для підйомних воріт, тому система блокує прийняття рішення і переходить у статус невизначеності. Тестування зображено в додатку В (Рисунок В.15).

Сценарій 4 - наближення до відкритих гаражних воріт. Робот тільки почав заїжджати в зону поточних воріт, передній сектор почав фіксувати відкритий простір, в цей час спостерігається стрімке зростання динаміки [0.8 0.1 0.1 0.7 0 0 -0.8]. Завдяки стрімкій динаміці, система починає зміщувати ймовірність у бік відкритого стану воріт ще на етапі наближення. Тестування зображено в додатку В (Рисунок В.16).

Сценарій 5 - переїзд між двома відкритими гаражами. Робот знаходиться між гаражами, передній сектор бачить наступний відчинений гараж, а задній сектор - попередній [0.8 0.1 0.8 0 0 0 0.8]. Центральні промені впираються в перегородку, але система ігнорує її та об'єднує зони в єдину відкриту зону. Тестування зображено в додатку В (Рисунок В.17).

3.4 Фізична модель системи

Фізична модель системи описує архітектуру апаратних модулів, які встановлені на мобільну платформу. Основна обробка масивів даних LiDAR та прийняття рішень за допомогою нечіткої логіки відбуваються на борту робота, але система є фрагментом інфраструктури IoT, статус воріт передається на

віддалений пульт охорони за допомогою брокера повідомлень MQTT через Wi-Fi.

Основою апаратної частини системи є платформа TurtleBot3 Waffle Pi. Ця мобільна платформа підтримує багато модулів та забезпечує маневреність зі встановленими на неї вертикальними стійками, які потрібні для роботи LiDAR.

Для виконання обчислень в системі використовується Raspberry Pi 4. Його обчислювальних потужностей достатньо для зчитування та аналізу даних з LiDAR. Також Raspberry Pi 4 підтримує передачу повідомлень через Wi-Fi.

RPLIDAR A1 використовується в системі для отримання метричних даних про стан воріт та орієнтації робота в просторі.

Керування механічною частиною забезпечує контролер OpenCR 1.0. Він відповідає за підтримання швидкості робота для забезпечення прямолінійного руху, також OpenCR 1.0 зчитує дані одометрії - це допомагає знати роботу своє положення відносно початку роботи.

Для слідкування за положенням робота відносно гаражів в системі використовується аналоговий датчик холла - KY-024, він зчитує напруженість магнітного поля від міток розташованих посередині кожних воріт.

Компоненти взаємодіють через дротові інтерфейси, RPLIDAR A1 підключено через UART, а OpenCR 1.0 за допомогою Micro-USB, це дозволяє передавати дані на високій швидкості без втрат.

Сенс елементів апаратного забезпечення системи наведено в Таблиця 3.. Фізичну модель зображено на Deployment Diagram, яка наведена в додатку А (Рисунок А.2).

Для побудови Deployment Diagram використано середовище Draw.io [19)].

Таблиця 3.7 - Компоненти апаратного забезпечення

Назва компоненту (англ.мова)	Пояснення призначення (укр.мова)
TurtleBot3 Waffle Pi	Базова мобільна платформа, фізичний носій усієї системи моніторингу.

Raspberry Pi 4	Головний обчислювальний модуль, який відповідає за обробку масивів даних LiDAR та запуск Python-алгоритму.
RPLIDAR A1	Сенсор дистанційного сканування. Передає масиви точок на Raspberry Pi через інтерфейс UART.
OpenCR 1.0	Спеціалізований контролер для керування двигунами та збору даних з датчиків руху.
KY-024 Linear	Сенсор для вимірювання напруженості магнітного поля. Використовується для зчитування магнітних міток біля воріт та визначення положення робота.

4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ПРОТОТИП СИСТЕМИ

4.1 Топологія та компоненти апаратної частини прототипу системи

Апаратна архітектура системи ієрархічна, завдання розділені на два рівні. Завдання високого рівня - обробка даних LiDAR, реалізація алгоритму нечіткої логіки та завдання реального часу - керування приводами. Загальну топологію апаратного забезпечення системи представлено на Рисунок 4.1.

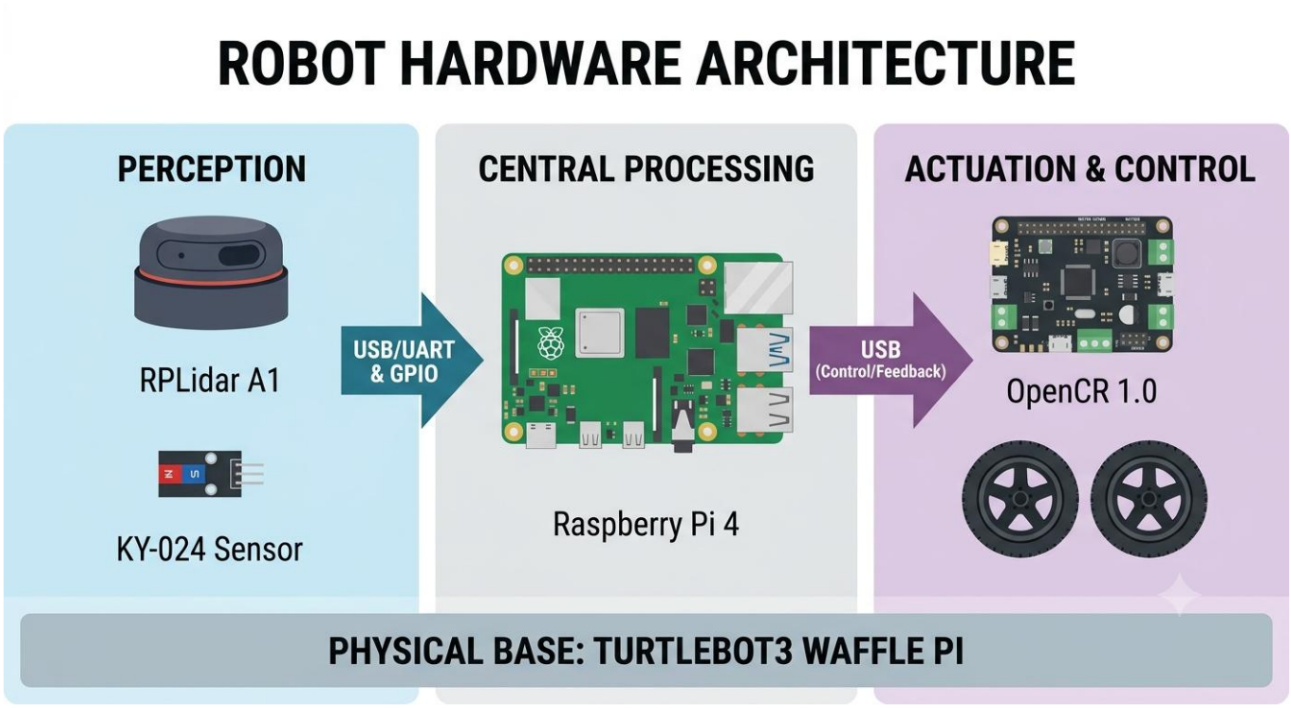


Рисунок 4.1 - Топологія апаратної частини прототипу системи

Візуалізацію топології апаратної частини прототипу системи створено за допомогою інструментів штучного інтелекту Gemini [26)].

Апаратна частина прототипу поділена на три основні модулі:

a) Модуль розпізнавання - RPLidar A1 та датчик магнітного поля KY-024. LiDAR займається збором масивів точок простору та передає їх на мікрокомп'ютер, використовуючи інтерфейс USB. Датчик Холла KY-024 зчитує напруженість магнітного поля від міток біля воріт, він підключається до портів загального призначення GPIO.

b) Обчислювальний модуль - працює на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4. Він виконує роль головного обчислювального ядра системи. За допомогою

нього здійснюється обробка хмар точок, які було отримано від LiDAR. Також Raspberry Pi 4 розраховує динаміку наближення та виконує алгоритм нечіткого виведення.

c) Модуль керування - в цей модуль входять спеціалізований контролер OpenCR 1.0 та виконавчі механізми базової платформи TurtleBot3 Waffle Pi. Контролер OpenCR зв’язаний з Raspberry Pi через інтерфейс USB, він приймає команди керування рухом від головного модуля для переміщення робота вздовж лінії гаражних боксів та забезпечує базовий апаратний зворотний зв'язок про статус виконання команд приводу.

Порти загального призначення Raspberry Pi 4 розраховані на 3.3 В, при подачі сигналу 5 В на піни є можливість незворотного пошкодження контролера. Модуль лінійного датчика Холла KY-024 підтримує живлення в діапазоні від 3.3 В до 5 В. Щоб не використовувати додаткових схем перетворювачів логічних рівнів, датчик буде підживлюватися від лінії 3.3 В мікрокомп'ютера. Це забезпечить безпеку для контролера. Також для фіксації магнітної мітки використовується цифровий вихід датчика, оскільки Raspberry Pi 4 не має вбудованого аналогово-цифрового перетворювача.

Загальна конфігурація фізичних підключень усіх апаратних компонентів до центрального мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 представлена в Таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 - Конфігурація фізичних підключень

Периферійний пристрій	Інтерфейс пристрою	Точка підключення на Raspberry Pi 4	Тип з'єднання / Протокол
KY-024 (VCC)	Живлення	Pin 1 (3.3V Power)	DC 3.3V
KY-024 (GND)	Заземлення	Pin 6 (Ground)	GND
KY-024 (D0)	Цифровий вихід	Pin 11 (GPIO 17)	Digital Input
KY-024 (A0)	Аналоговий вихід	Не підключено	Не використовується
RPLidar A1	UART (через адаптер)	USB Type-A Port	Serial Communication (USB 2.0)
OpenCR 1.0	Micro-USB	USB Type-A Port	Serial Communication (USB 2.0)

Офіційні схеми розташування виводів для мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 та сенсора KY-024, згідно з технічною документацією виробників наведено в додатку Г (Рисунок Г.1 та Рисунок Г.2).

4.2 Архітектура та компоненти програмної частини прототипу системи

Планується побудувати програму у вигляді єдиного застосунку, розробленого мовою Python. Програма складається з трьох ключових підсистем: збору даних, виведення та керування механізмами. Логічну структуру та взаємодію програмних компонентів системи наведено на Рисунок 4.2.

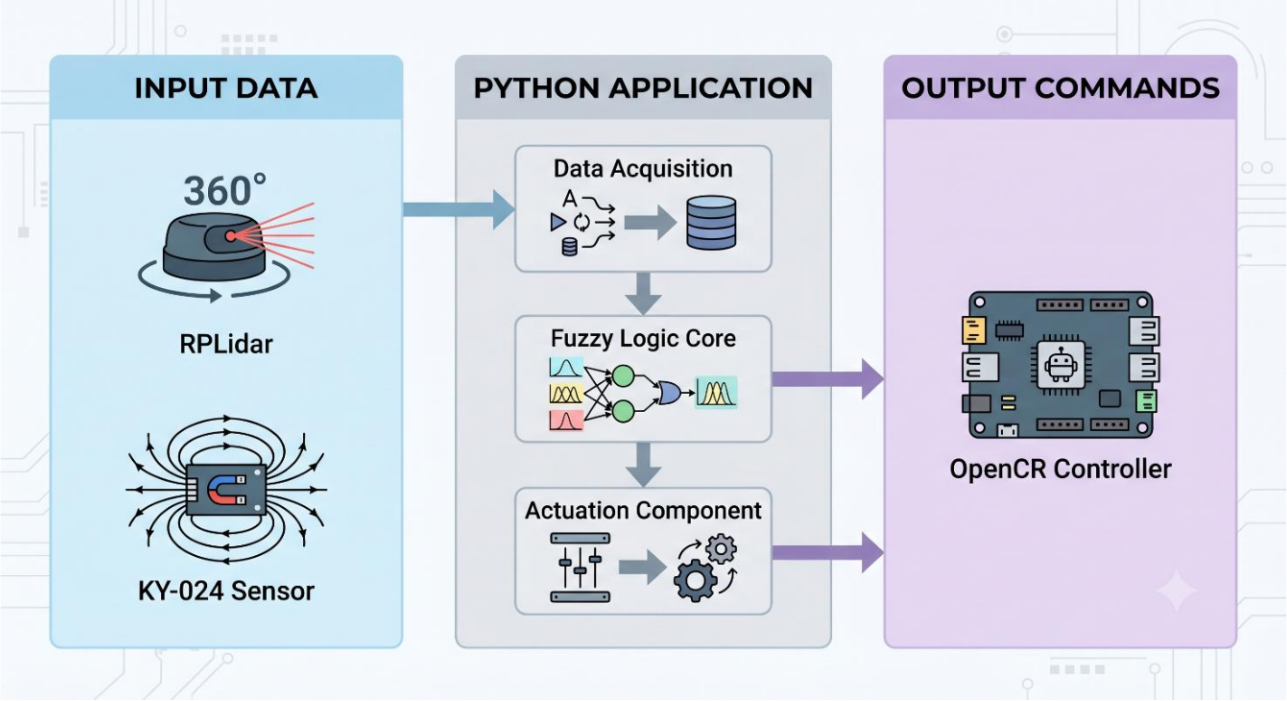


Рисунок 4.2 - Логічна структура програмних компонентів системи

Візуалізацію логічної структури та взаємодії програмних компонентів системи створено за допомогою інструментів штучного інтелекту Gemini [26)].

Модуль збору даних ініціалізує опитування сенсорів у режимі реального часу. Для роботи RPLidar A1 використовується бібліотека rplidar-roboticia. Ця бібліотека дозволяє зчитувати бінарні пакети через інтерфейс UART. Збір даних здійснюється за допомогою генератора iter_scans(), який автоматично формує масив вимірювань для одного повного оберту лідара. Він перетворює сирі дані на зручний формат хмари точок. Одночасно модуль виконує моніторинг

цифрового виводу GPIO, щоб отримати сигнал від магнітного датчика Холла KY-024, для цього використовується бібліотека RPi.GPIO [27)].

Модуль нечіткого логічного виведення є інтелектуальним ядром системи, що реалізує алгоритм керування на основі бази правил. Математичним апаратом для цього модуля є бібліотека scikit-fuzzy, вона створена для наукових розрахунків та систем нечіткої логіки в Python [28)]. Її використання дозволяє виконувати фазифікацію дистанції від лідара та статусу мітки, застосовувати операції імплікації та здійснювати точну дефазифікацію.

Модуль керування виконавчими механізмами забезпечує фізичний рух базової платформи TurtleBot3 на основі прийнятих рішень. Для зв'язку між Raspberry Pi 4 та платою контролера моторів OpenCR 1.0 застосовується бібліотека pyserial [29)]. Вона інкапсулює системні виклики до послідовних портів та дозволяє відправляти керуючі пакети до мікроконтролера на платі OpenCR.

4.3 Опис даних та бібліотек підтримки компонентів системи

Основний потік даних надходить від двох сенсорів, від RPLidar A1 та магнітного датчика Холла.

Лідар працює в режимі безперервного сканування і під час кожного оберту генерує масив точок у полярній системі координат, кожна точка масиву містить три базові параметри. Кут вимірювань від 0 до 360 градусів, дистанція до перешкод та якість сигналу. Для потреб нечіткого контролера цей масив даних фільтрується та агрегується у три ключові сектори сканування, вхідні змінні лідара.

KY-024 забезпечує позиціонування робота відносно міток. Датчик передає інформацію про напруженість магнітного поля, яка математично перетворюється на відносну відстань до центру воріт. Цей показник формує вхідну лінгвістичну змінну Tag_Distance.

Перелік та опис призначення бібліотек наведено в Таблиця 4.2

Таблиця 4.2 - Призначення та функції бібліотек

Назва бібліотеки	Призначення та функції в системі
rplidar-roboticia	Забезпечує встановлення послідовного з'єднання, ініціалізацію процесу сканування та коректний парсинг байтових пакетів у масиви відстаней і кутів.
scikit-fuzzy (skfuzzy)	Побудова системи нечіткої логіки. Відповідає за фазифікацію, обробку бази правил та дефазифікацію методом центру мас для отримання стану воріт.
RPi.GPIO	Стандартна бібліотека Raspberry Pi для опитування виводів мікрокомп'ютера, забезпечує безперервне зчитування сигналів із магнітного сенсора KY-024.
pyserial	Робота з послідовними портами. Застосовується для низькорівневої комунікації з лідаром та передачі фінальних команд керування на плату OpenCR колісної бази.

Використання цього набору бібліотек дозволило модульно розділити процеси збору даних, що робить архітектуру системи гнучкою для подальшого масштабування.

ВИСНОВКИ

Було вирішено завдання розробки прототипу системи керування мобільним роботом для моніторингу гаражних комплексів із застосуванням апарату нечіткої логіки. Запропоновано апаратну архітектуру на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 та контролера OpenCR, яка об'єднує дані лазерного далекоміра RPLidar A1 та магнітного датчика KY-024. Розроблено концептуальну та логічну модель системи на основі нечітких когнітивних карт у середовищі Mental Modeler. Для підготовки вхідних даних застосовано алгоритм нормалізації масивів лазерного сканування, який оцінює частку променів, що вільно проходять у цільових секторах. Спроєктовано логіко-математичну модель нечіткого контролера та сформовано комплексну базу правил. Проведено покрокове моделювання роботи системи в часі.

Особливістю розробленої системи з технічної точки зору є використання трапецієподібних функцій належності для формування зон нечутливості, що дозволило компенсувати апаратний шум сенсорів. Водночас деякі аспекти розробки є неповними та потребують подальшого уточнення, динаміка перехідних процесів при русі робота на високих швидкостях потребує додаткових польових досліджень на фізичному прототипі.

Для генерації блок-схем, були використані генеративні асистенти штучного інтелекту. Увесь отриманий матеріал був критично проаналізований та за потреби виправлений для забезпечення точної відповідності розробленій системі.

Основними шляхами покращення та подальшого розвитку системи є запровадження адаптивних нейро-нечітких мереж для автоматичного підлаштування функцій належності, а також інтеграція підсистеми комп'ютерного зору як каналу даних у випадках відмови магнітних міток або критичної зашумленості показників лідара.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1) Освітньо-професійна програма «Технології штучного інтелекту» першого (бакалаврського) рівня освіти за спеціальністю 126 Інформаційні системи та технології галузі знань 12 Інформаційні технології. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2022/08/opp_bak_126_tshi_23-24_pidpisi-1.pdf (Дата звернення: 21.05.2026)
2) Петренко Т.Г. Методичні матеріали до порядку та змісту підготовки, оформлення та захисту пояснювальної записки кваліфікаційної роботи. Харків: УкрДУЗТ, 2020. – 15 с.
1) Каргін А. О., Проніна О.І., П’ятикоп О.Є., Перцев Є.А. Технологія проєктування штучного інтелекту, що підтримує автономні розподілені системи. / ВІСНИК ХНТУ No 4(95), Ч. 3, 2025. с. 126-136, DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.3.14 (Дата звернення: 09.06.2026)
3) Erinle T. J., Akerele O. V., Rasheed A. A. Conceptual Design of IoT-Enabled Parking Lot Monitoring System using PIR Motion and Ultrasonic Sensors for Real-Time Occupancy Detection. Centre for Research, Innovation, and Development (CRID) 5th Biennial International Conference. 2025. - 11 c. URL: https://www.researchgate.net/publication/396186110_Conceptual_Design_of_IoT-Enabled_Parking_Lot_Monitoring_System_using_PIR_Motion_and_Ultrasonic_Sensors_for_Real-Time_Occupancy_Detection (Last accessed: 12.06.26)
4) Mobile Security Robotics vs Stationary CCTV. URL: https://quarerorobotics.com/blog/robotics-vs-cctv (Last accessed: 29.05.26)
5) Knightscope K5 robot. URL: https://www.uncrewed-systems.com/knightscope-k5-robot/ (Last accessed: 29.05.26)
6) 2D LiDAR. URL: https://www.lslidar.com/products/2d-lidar/ (Last accessed: 29.05.26)

7) LDRobot LD-06. URL: https://ardupilot.org/copter/docs/common-ld06.html (Last accessed: 29.05.26)
8) YDLIDAR X4 Lidar Datasheet. Doc#: 01.13.000001. Shenzhen: EAI Team, 2017. - 7 c.
9) RPLIDAR A1. URL: https://www.slamtec.com/en/lidar/a1 (Last accessed: 29.05.26)
10) LD-06. URL: https://github.com/Robot-Maker-SAS/LD06 (Last accessed: 29.05.26)
11) RPLIDAR A1 wiki. URL: https://www.waveshare.com/wiki/RPLIDAR_A1?srsltid=AfmBOorTqHlsZJmJRuPB29qYGVo2xwSqhcPYnsoft3AtVfKaGDuEFybu (Last accessed: 29.05.26)
12) Rplidar-roboticia. URL: https://github.com/Roboticia/RPLidar (Last accessed: 30.05.26)
13) RPLidar's documentation. URL: https://rplidar.readthedocs.io/en/latest/ (Last accessed: 30.05.26)
14) Service Robots. URL: https://ifr.org/service-robots (Last accessed: 30.05.26)
15) Types of robots. URL: https://www.telefonica.com/en/communication-room/blog/types-of-robots-classification-applications-and-examples/ (Last accessed: 30.05.26)
16) TurtleBot3. URL: https://www.turtlebot.com/turtlebot3/ (Last accessed: 30.05.26)
17) TurtleBot3 characteristics. URL: https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/features/ (Last accessed: 30.05.26)
18) NotebookLM. URL: https://notebooklm.google/ (Last accessed: 01.06.26)
19) Draw.io. URL: https://www.drawio.com/ (Last accessed: 01.06.2026).
20) Kosko B. Fuzzy cognitive map. Int. J. Man-Machine Studies. 1986, pp. 65-75.
21) Mental Modeler. URL: https://www.mentalmodeler.com (Last accessed: 03.06.26)

22) Fuzzy Logic Toolbox. URL: https://www.mathworks.com/help/fuzzy/index.html (Last accessed: 21.05.2026).
23) Sivanandam S., Sumathi S. and Deepa S. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 441 p.
24) Welcome to MATLAB. URL: https://matlab.mathworks.com/ (Last accessed: 04.06.2026)
25) Get Started with MATLAB. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html (Last accessed: 04.06.2026)
26) Gemini. URL: https://gemini.google.com/app (Last accessed: 04.06.2026)
27) RPi.GPIO. URL: https://pypi.org/project/RPi.GPIO/ (Last accessed: 04.06.2026)
28) Scikit-fuzzy. URL: https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/ (Last accessed: 05.06.2026)
29) Pyserial. URL: https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/ (Last accessed: 05.06.2026)

ДОДАТОК А

ДІАГРАМИ UML

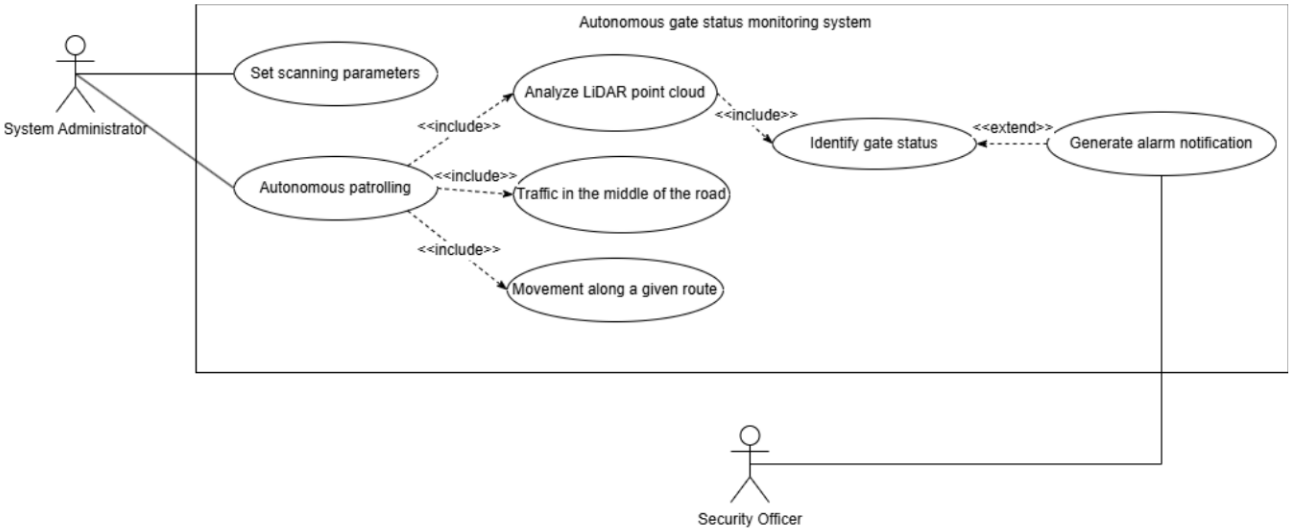


Рисунок А.1 - Use case системи моніторингу стану воріт

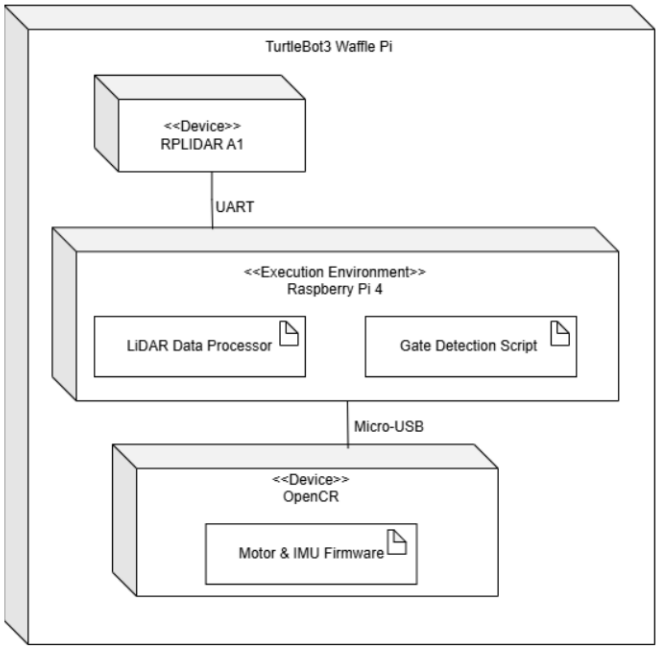


Рисунок А.2 - Deployment Diagram системи моніторингу стану воріт

ДОДАТОК Б

МОДЕЛЮВАННЯ В MENTAL MODELER

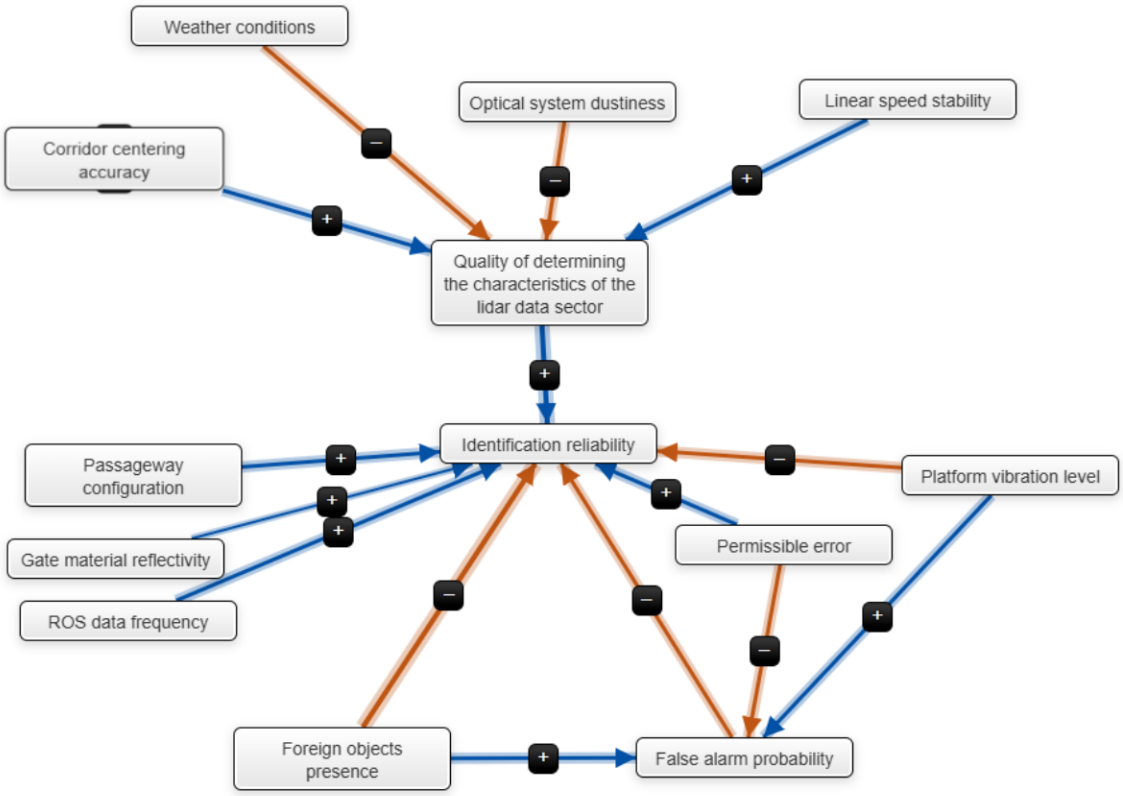


Рисунок Б.1 - Модель FCM системи моніторингу стану воріт

	Linear speed stability	Optical system dustiness	Foreign objects presence	Identification reliability	Gate material reflectivity	Passageway configuration	Corridor centering accuracy	Platform vibration level	Permissible error	False alarm probability	Weather conditions	ROS data frequency	Quality of determining the characteristics of the lidar data sector
Linear speed stability													0.7
Optical system dustiness													-0.6
Foreign objects presence				-0.9						0.8			
Identification reliability													
Gate material reflectivity				0.4									
Passageway configuration				0.5									
Corridor centering accuracy													0.8
Platform vibration level				-0.6						0.6			
Permissible error				0.7						-0.7			
False alarm probability				-0.8									
Weather conditions													-0.5
ROS data frequency				0.6									
Quality of determining the characteristics of the lidar data sector				0.9									

Рисунок Б.2 - Матриця впливу компонентів системи моніторингу стану воріт

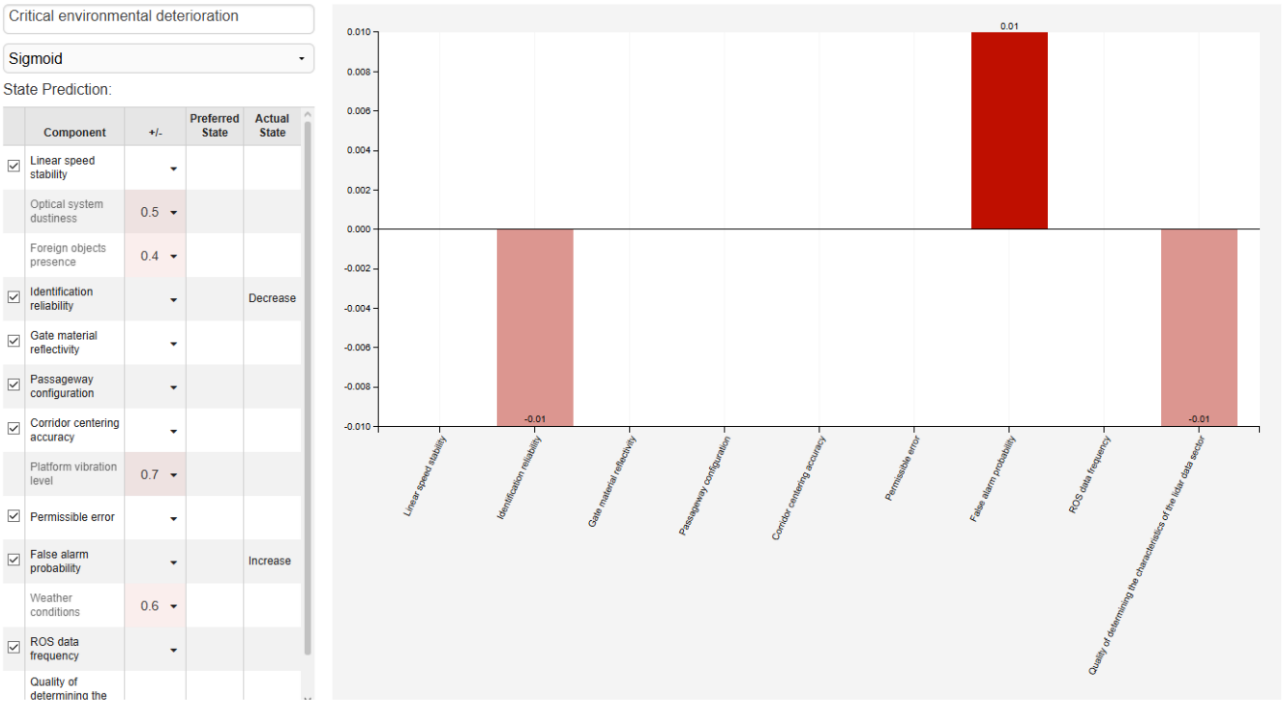


Рисунок Б.3 - Критичне погіршення умов середовища (Sigmoid Function)

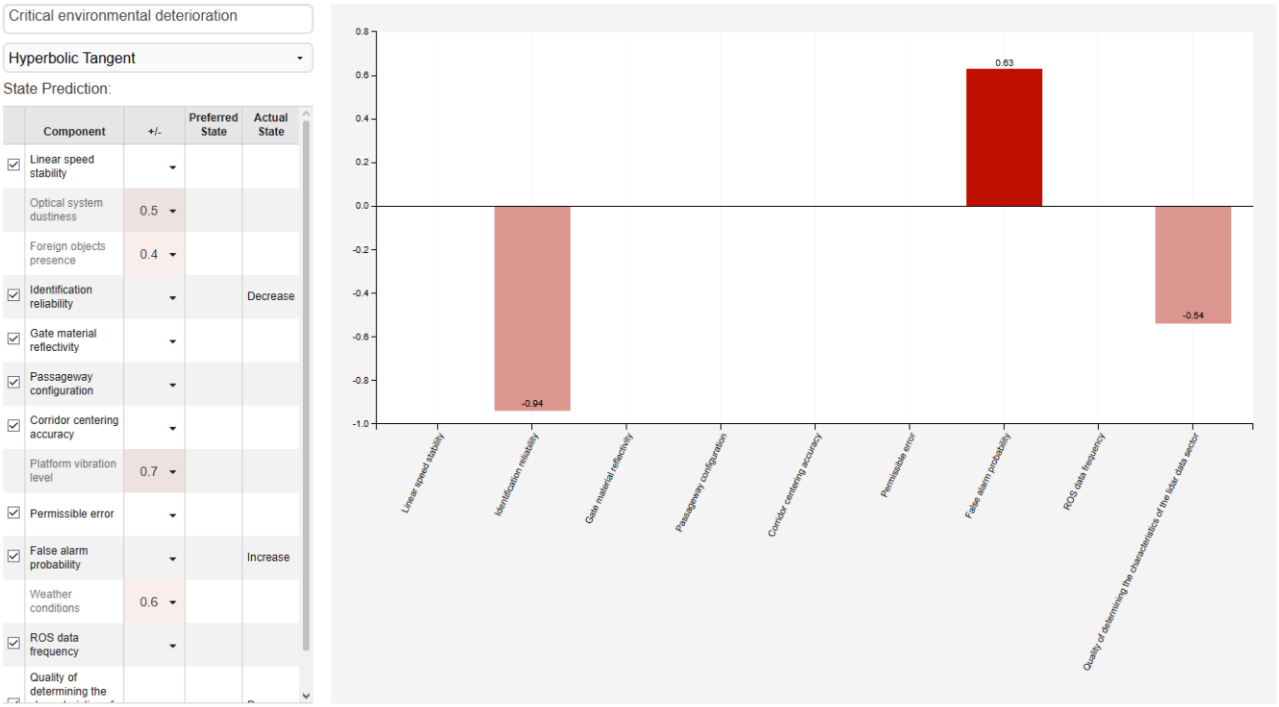


Рисунок Б.4 - Критичне погіршення умов середовища (Hyperbolic Tangent Function)

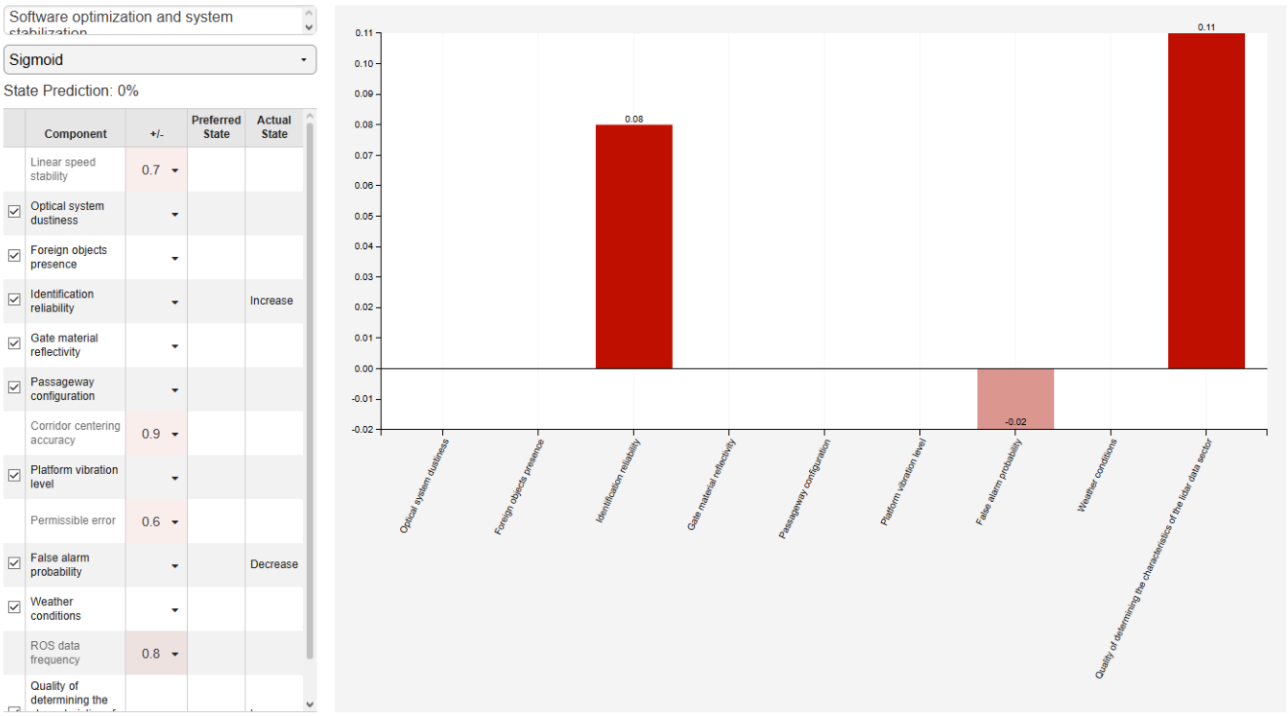


Рисунок Б.5 - Програмна оптимізація та стабілізація системи (Sigmoid Function)

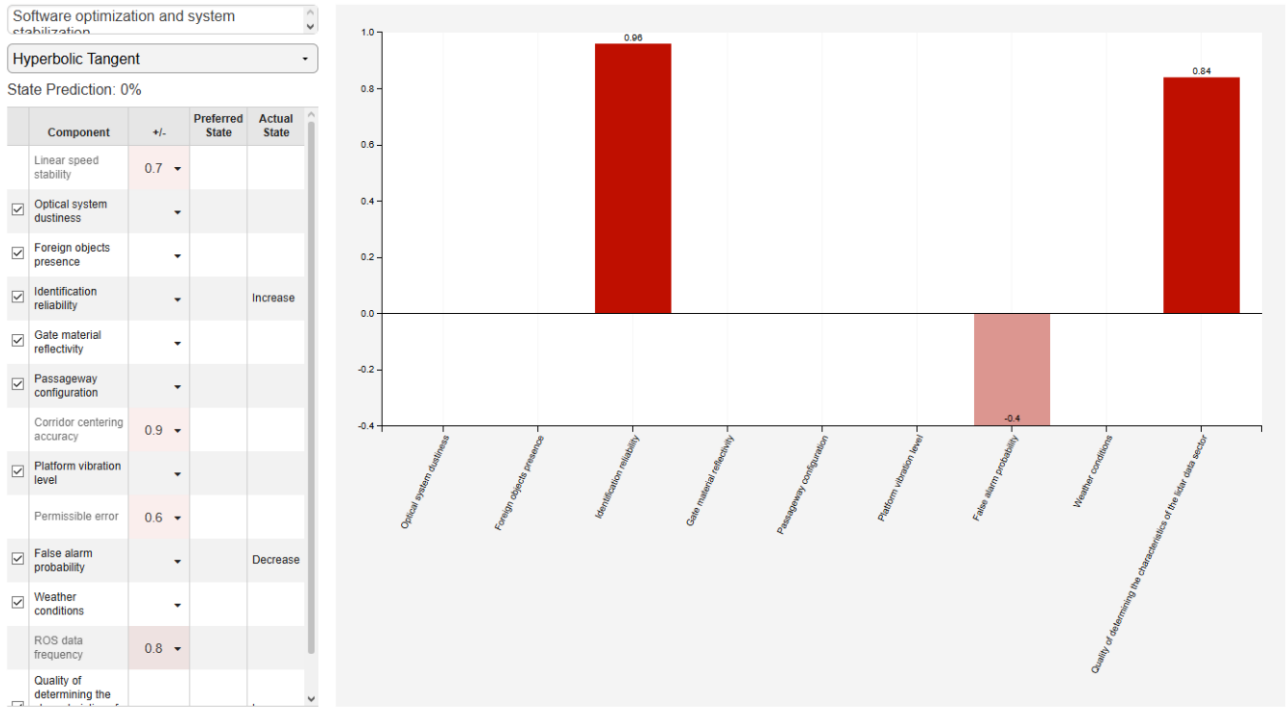


Рисунок Б.6 - Програмна оптимізація та стабілізація системи (Hyperbolic Tangent Function)

ДОДАТОК В

МОДЕЛЮВАННЯ В MATLAB

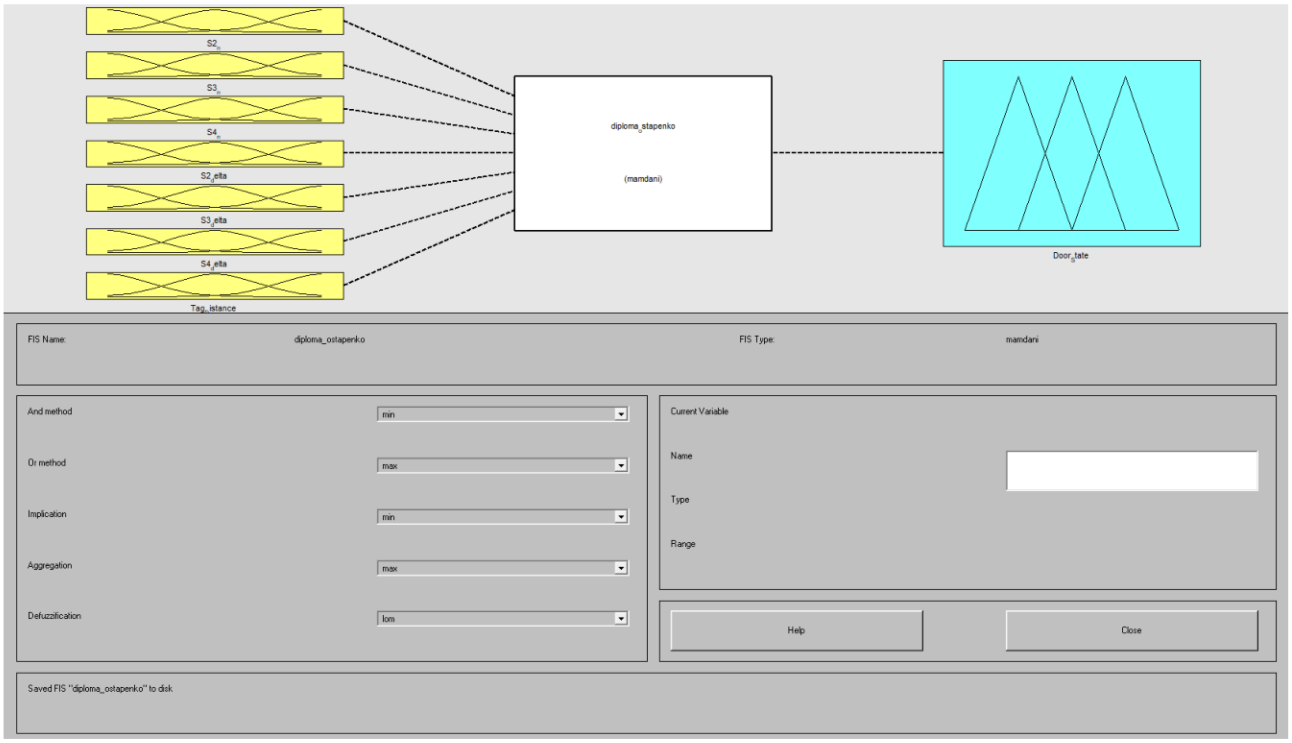


Рисунок В.1 - Basic FIS системи моніторингу стану воріт

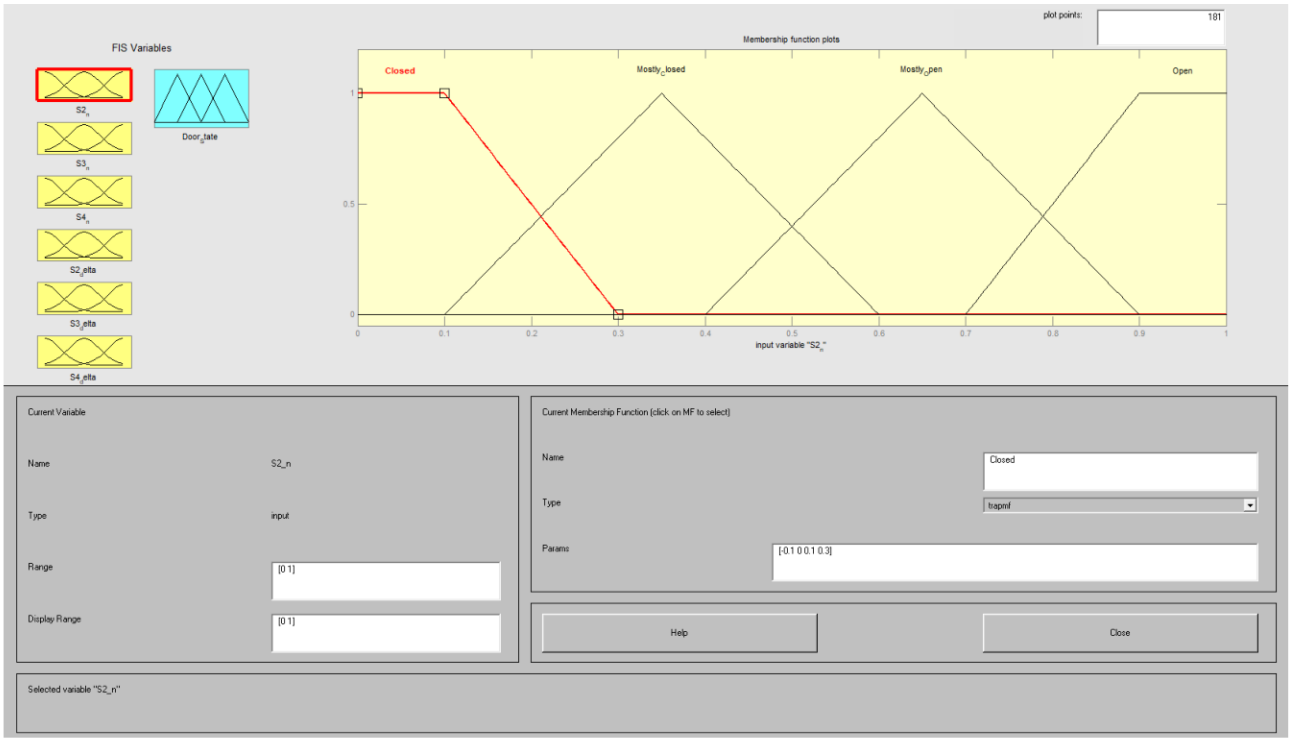


Рисунок В.2 - Membership Function змінних S2_n, S3_n, S4_n

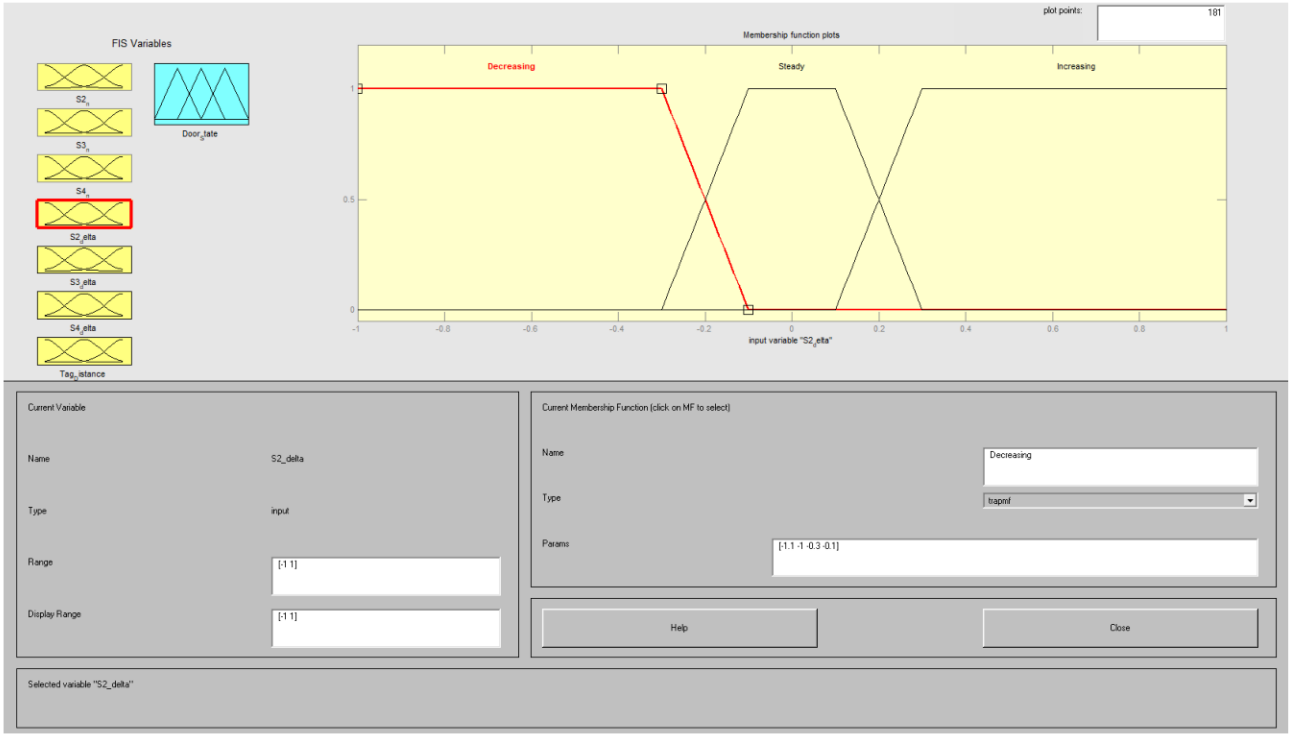


Рисунок В.3 - Membership Function змінних S2_delta, S3_delta, S4_delta

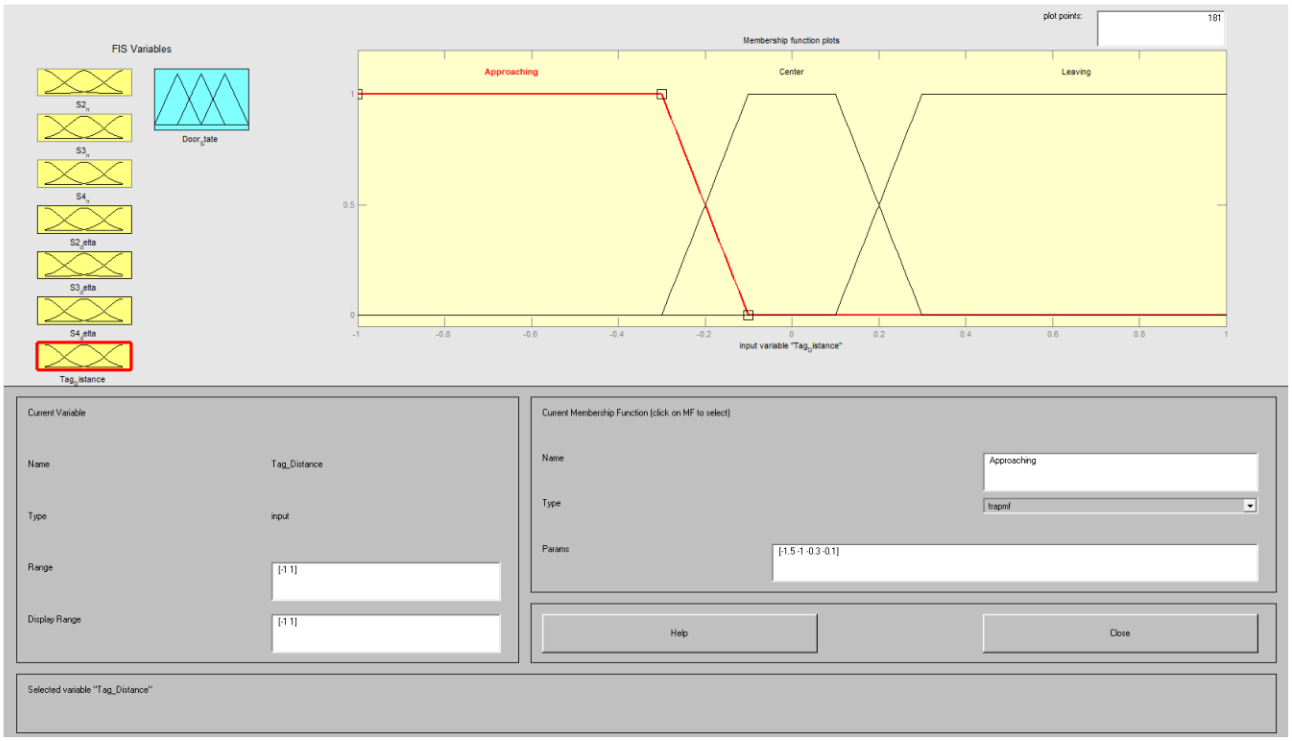


Рисунок В.4 - Membership Function змінної Tag_Distance

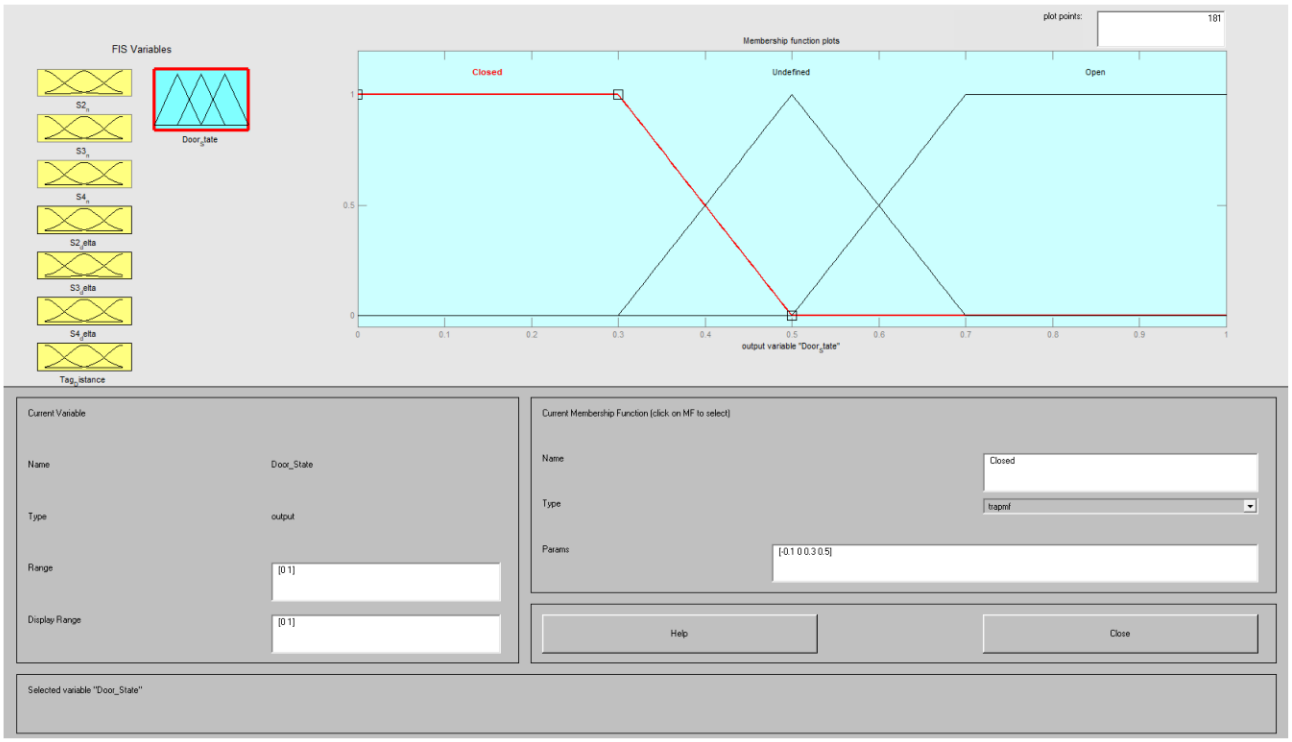


Рисунок В.5 - Membership Function змінної Door_State

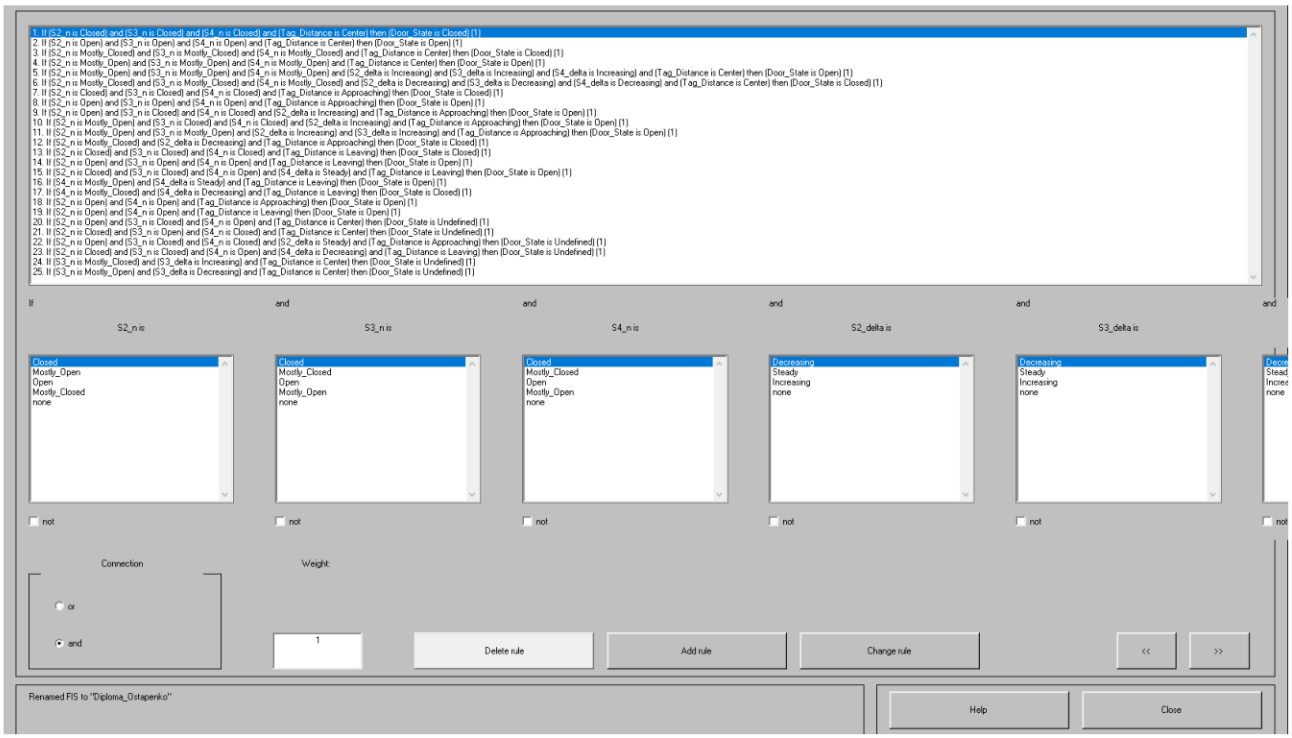


Рисунок В.6 - Rule системи моніторингу стану воріт

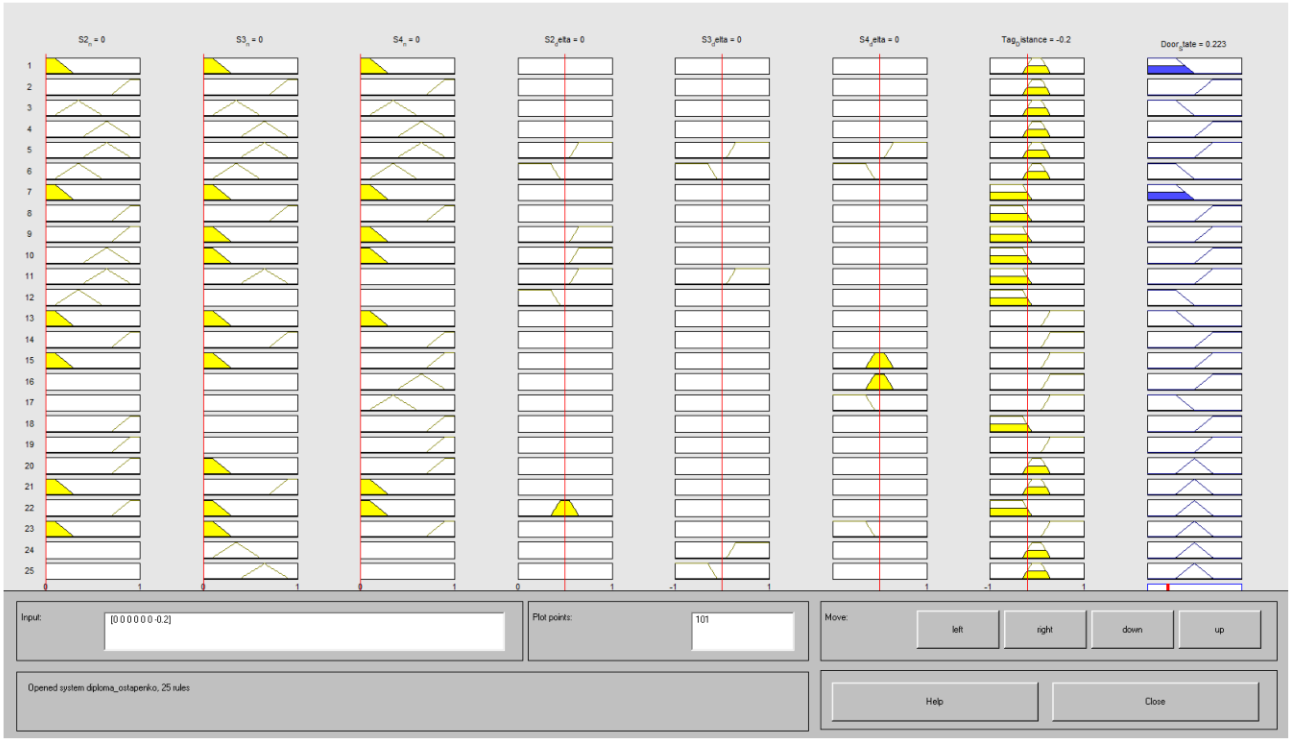


Рисунок В.7 - Точка 1 покрокового моделювання поведінки робота

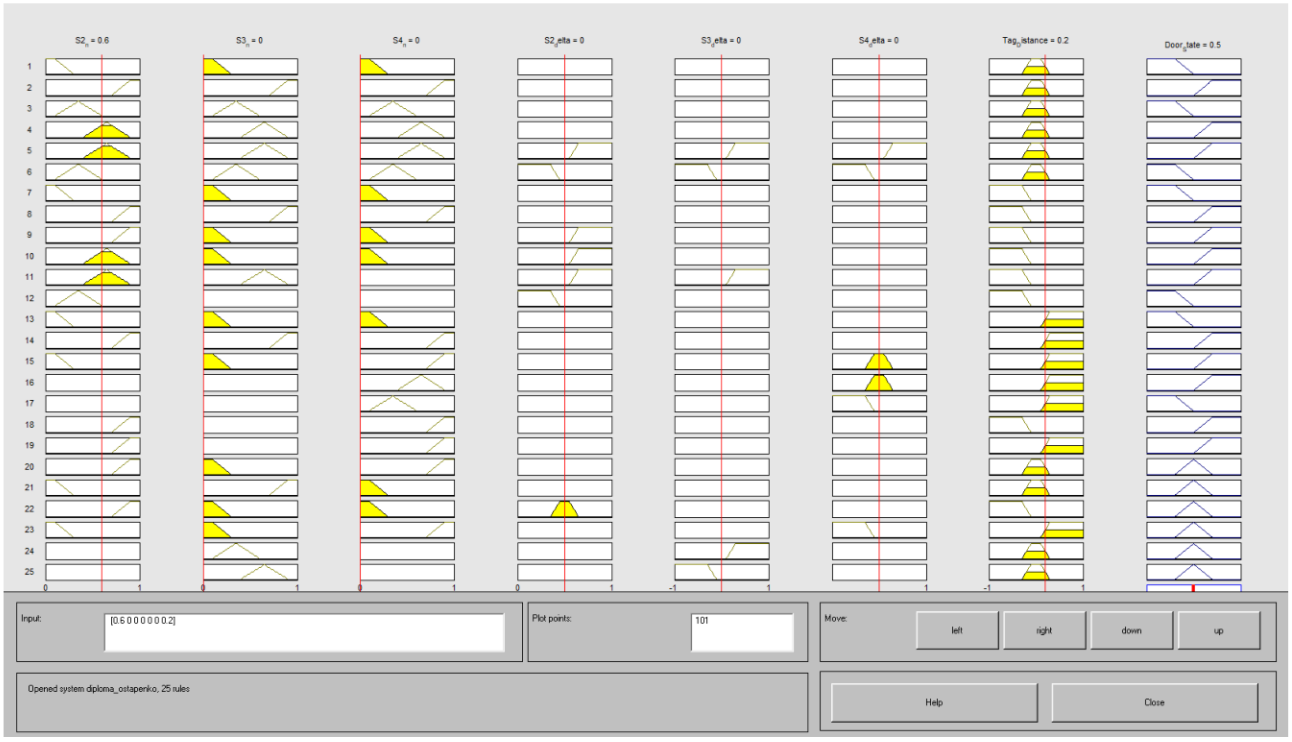


Рисунок В.8 - Точка 2 покрокового моделювання поведінки робота

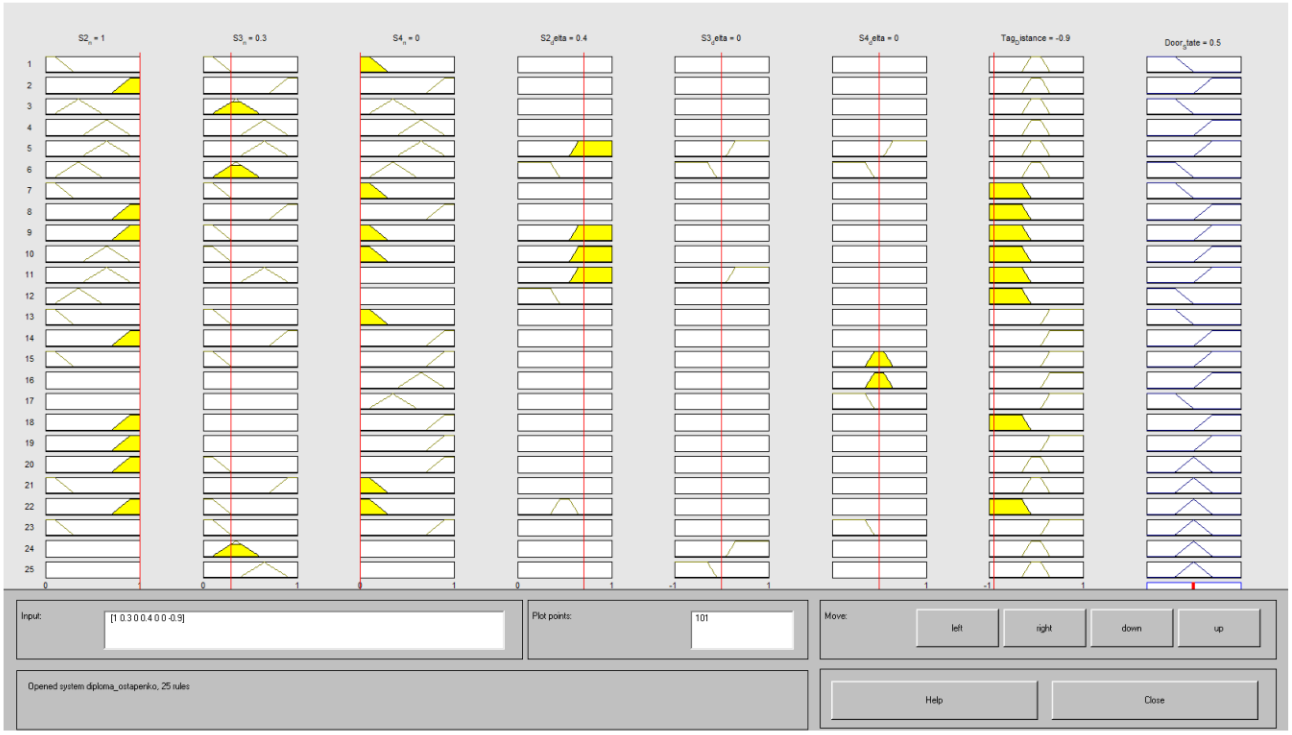


Рисунок В.9 - Точка 3 покрокового моделювання поведінки робота

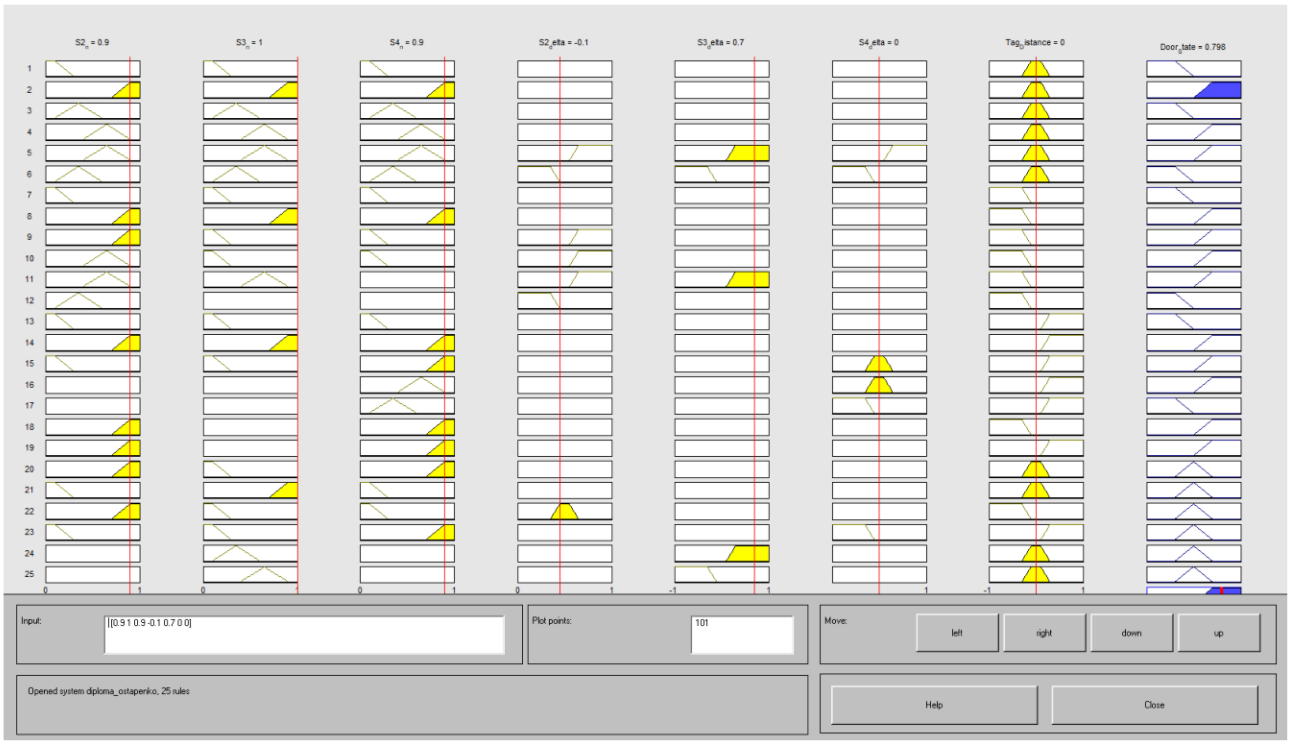


Рисунок В.10 -Точка 4 покрокового моделювання поведінки робота

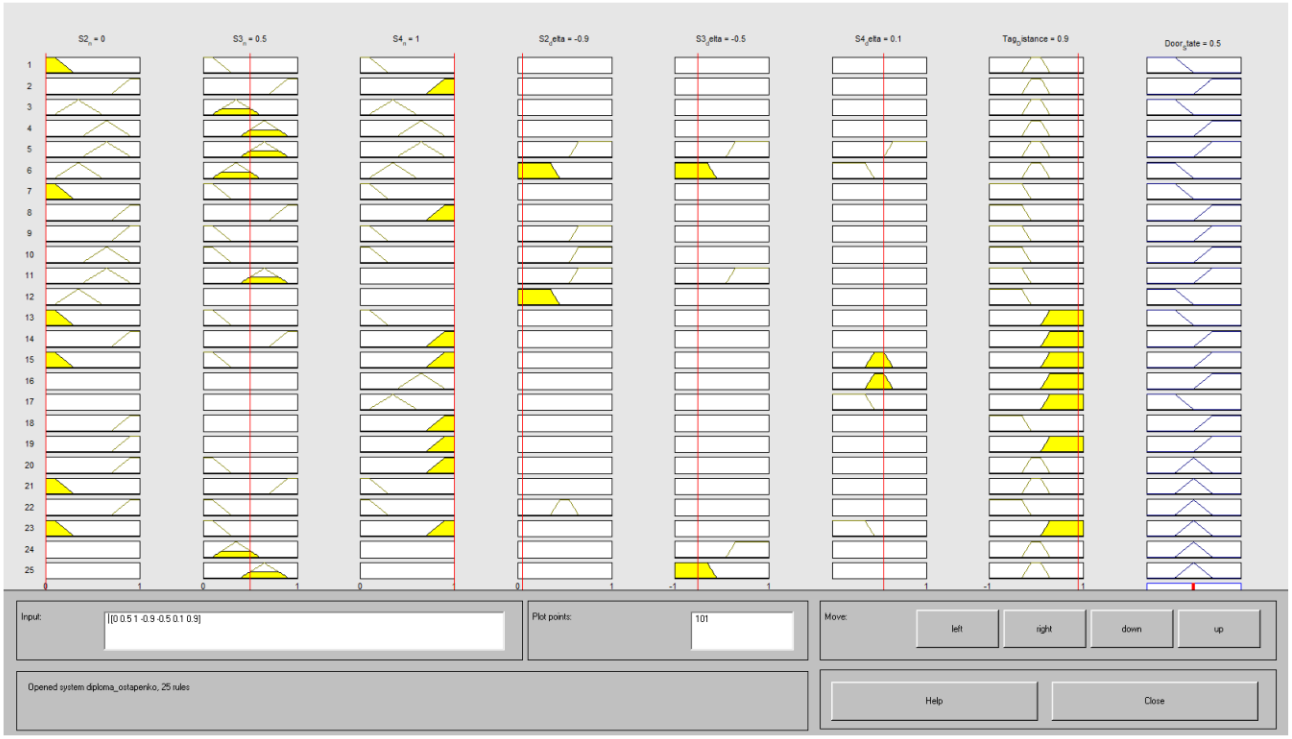


Рисунок В.11 -Точка 5 покрокового моделювання поведінки робота

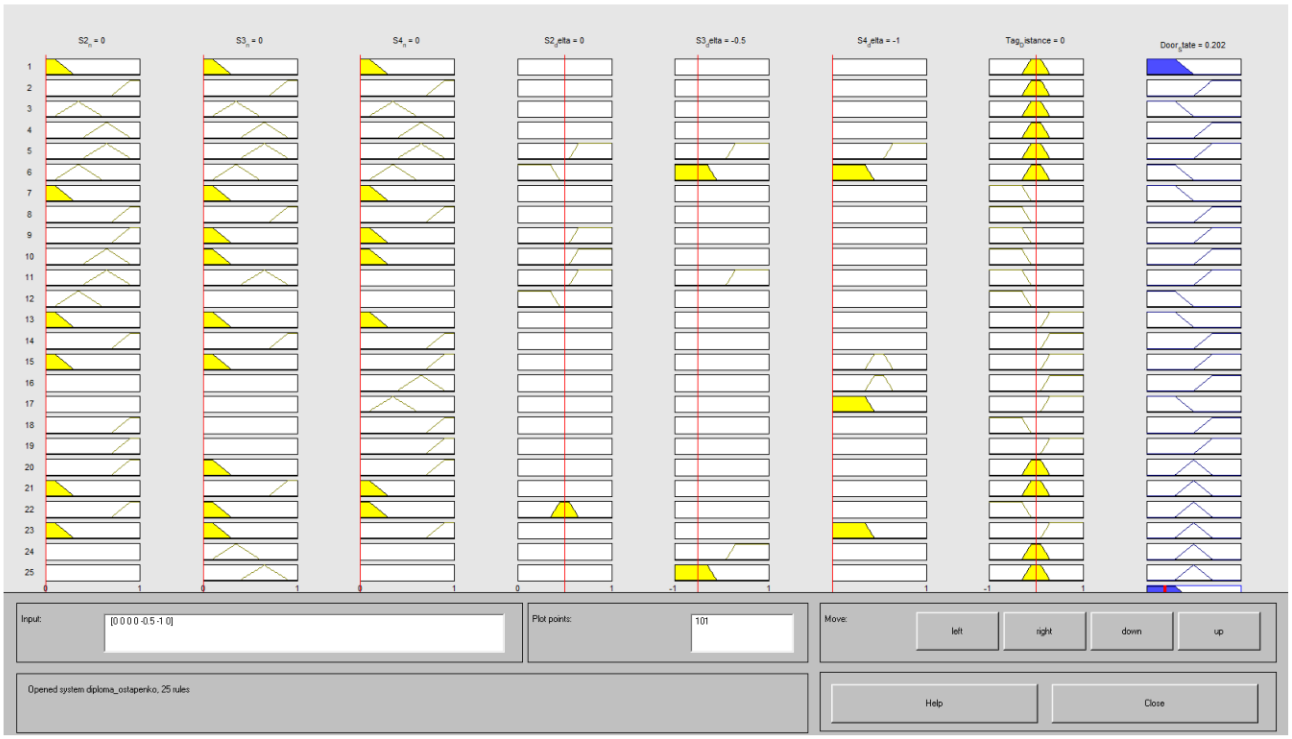


Рисунок В.12 - Точка 6 покрокового моделювання поведінки робота

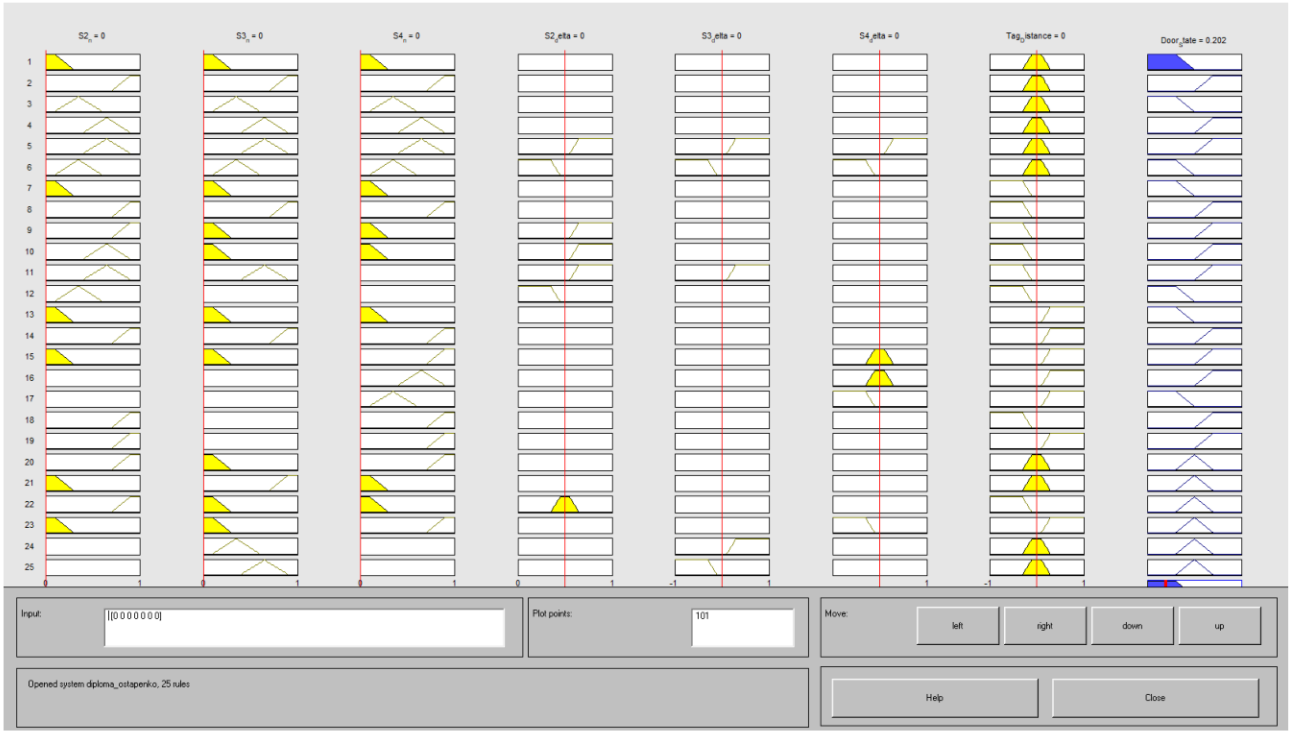


Рисунок В.13 - Сценарій зачинені ворота

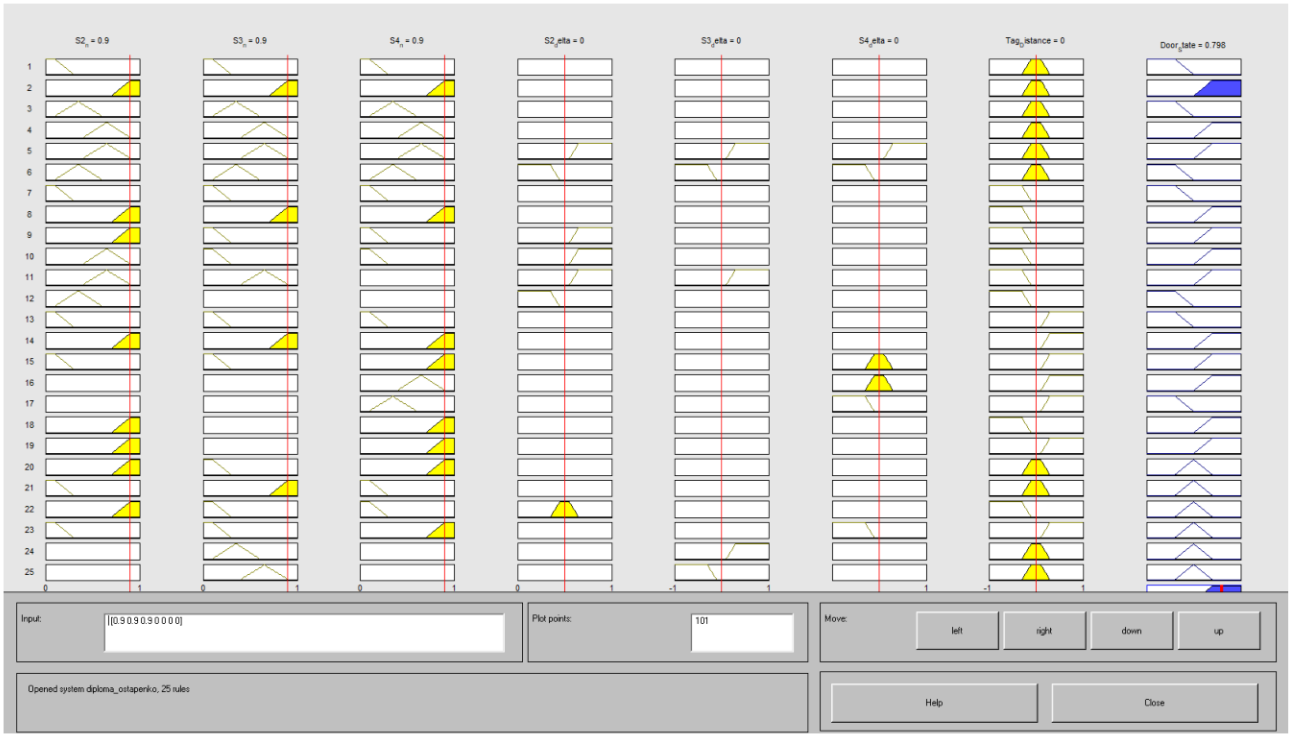


Рисунок В.14 - Сценарій відчинені ворота

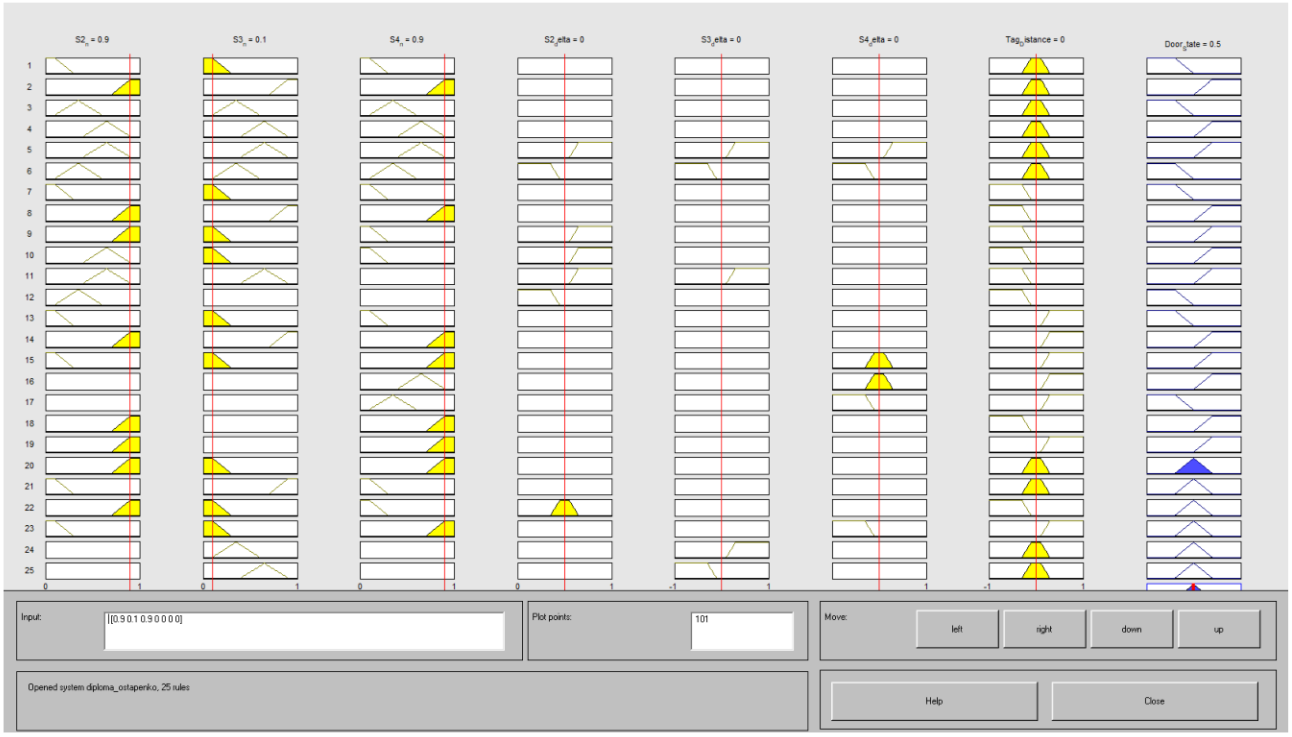


Рисунок В.15 - Сценарій аномалії при визначенні стану воріт

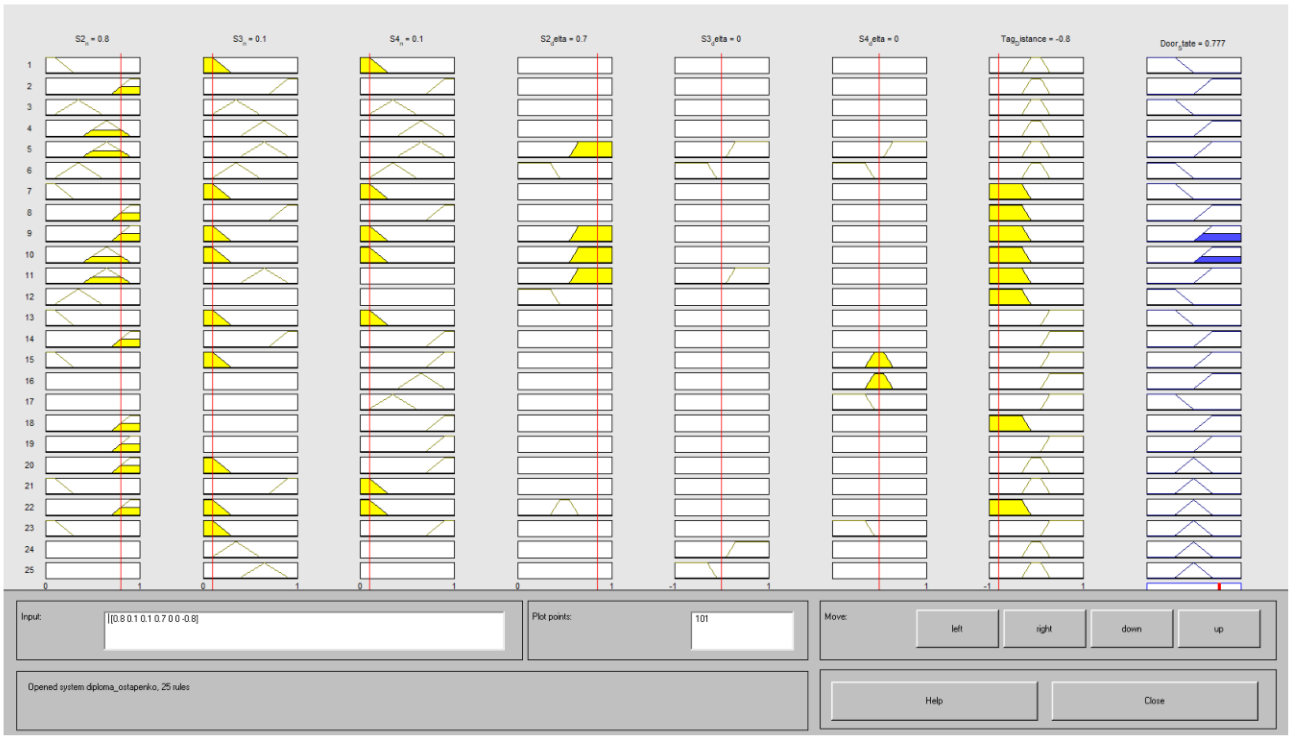


Рисунок В.16 - Сценарій наближення до відкритого боксу

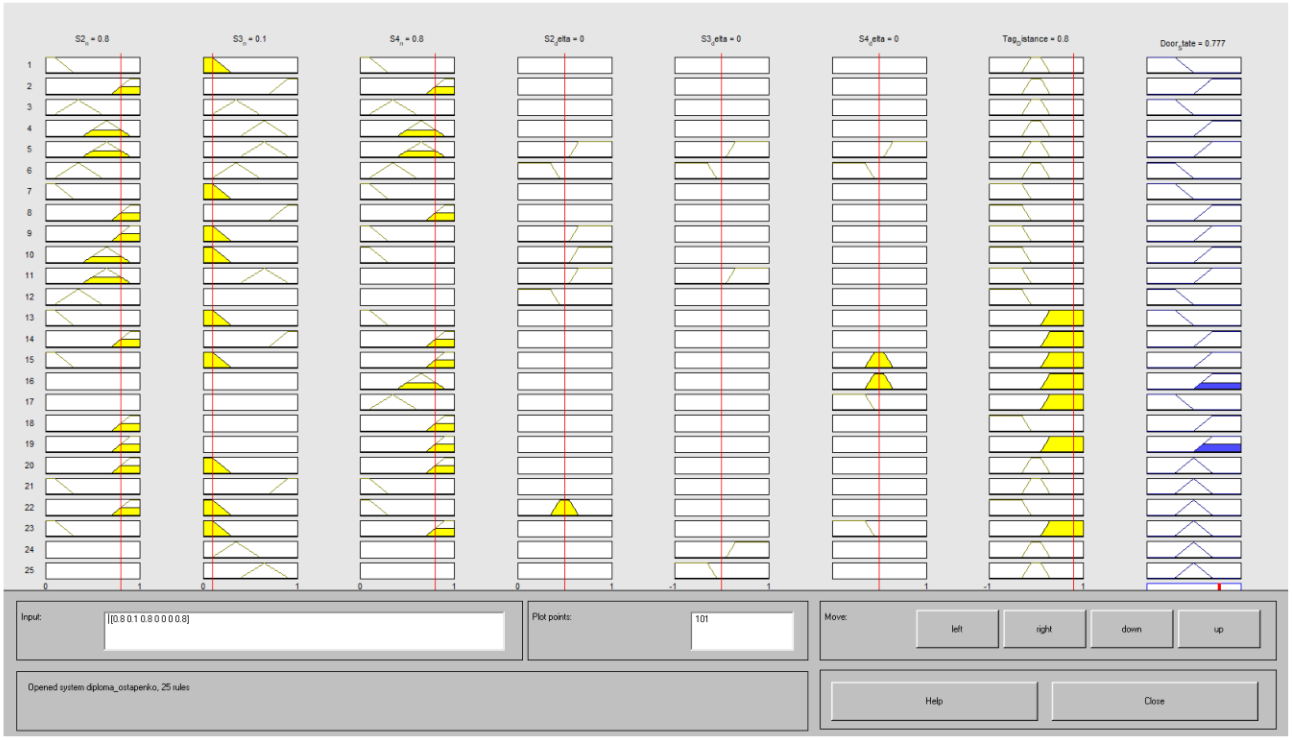


Рисунок В.17 - Сценарій переїзду між двома відкритими гаражами

ДОДАТОК Г

МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ

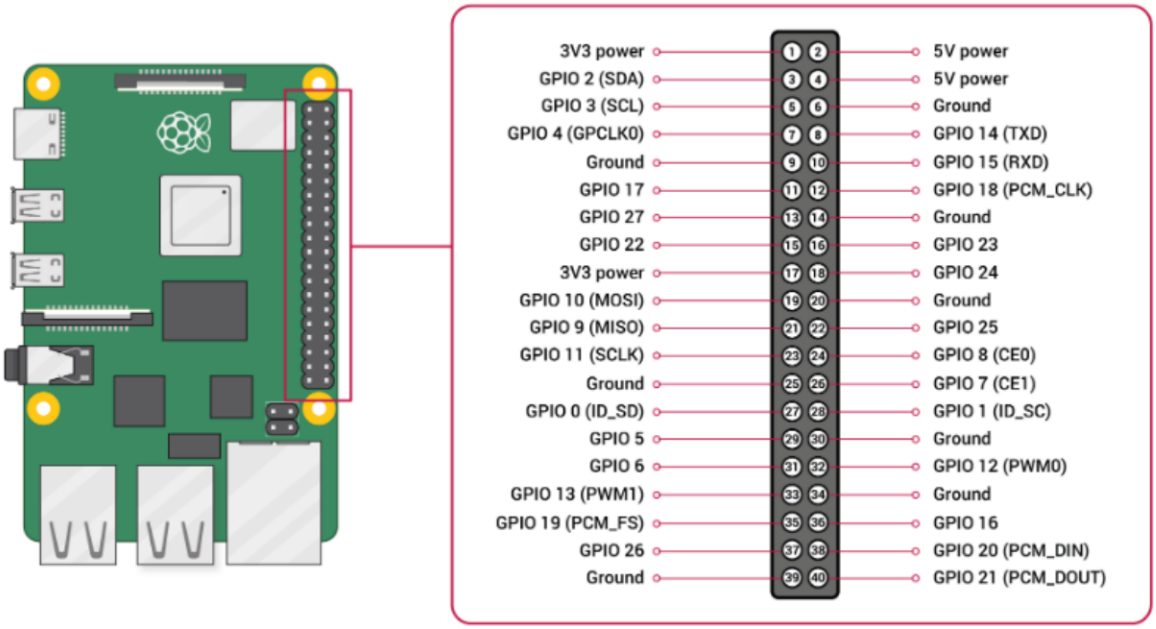


Рисунок Г.1 - Схема GPIO мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4

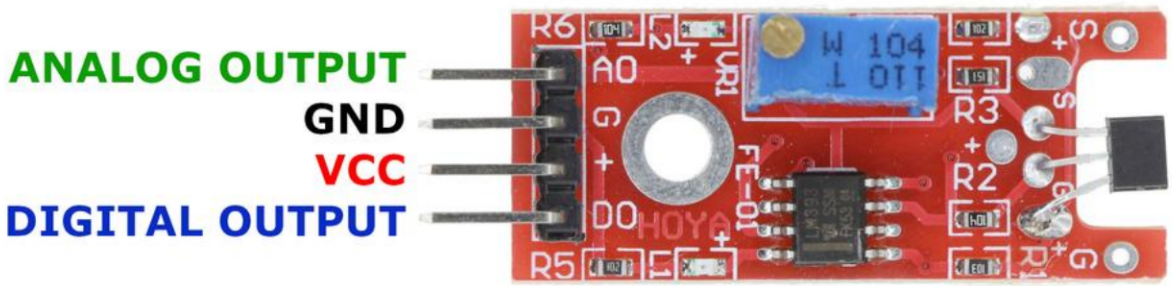
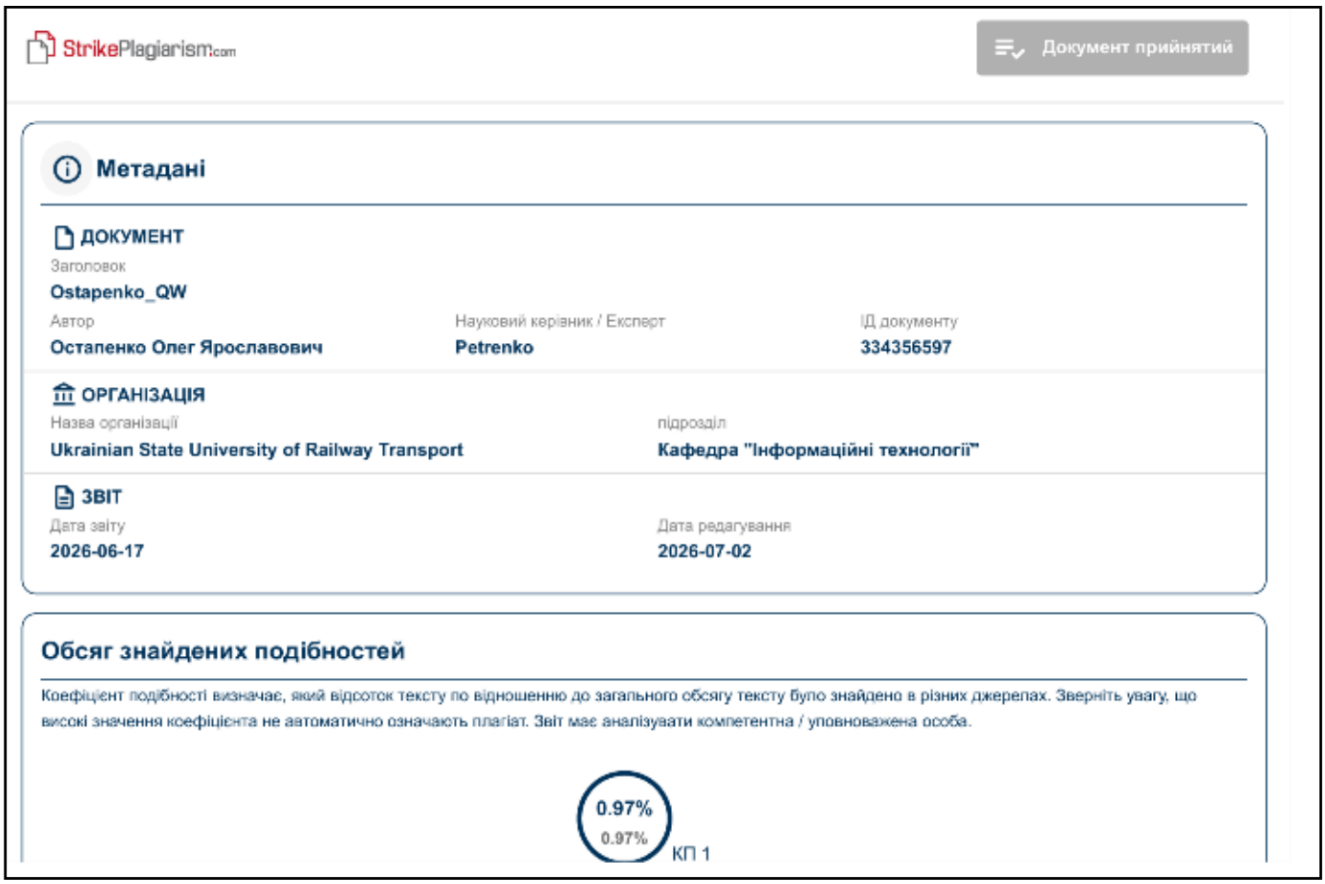


Рисунок Г.2 - Структурна схема виводів KY-024

ДОВІДКА ПРО ОЗНАКИ ПЛАГІАТУ
(збігів/ідентичності/схожості в текстах)
В ПОЯСНЮВАЛЬНІЙ ЗАПИСЦІ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧА ПЕРШОГО (БАКАЛАВРАТСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ПІБ студента	*Остапенко Олег Ярославович*
Тема роботи	Автономний гаражний комплекс: роботизована система моніторингу стану воріт
Сервіс перевірки на плагіат	StrikePlagiarism
Робота містить авторського тексту	99,03%
Перевірку виконала (ПІБ)	к.т.н, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій УкрДУЗТ Петренко Тетяна Григорівна
Дата, підпис	19.06.26