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: Автоматизована система залізничного переїзду

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)

Окольничий Кирило Максимович
(ПІБ)

Керівник Петренко Тетяна Григорівна
(ПІБ)
к.т.н, доцент, доцент кафедри ІТ УкрДУЗТ
(науковий ступінь, вчене звання, посада)
Рецензент Штомпель Микола Анатолійович
(ПІБ)
д.т.н., професор, професор кафедри «Транспортний зв'язок», УкрДУЗТ
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

Національна шкала	відмінно
Кількість балів:	99
Оцінка (ECTS)	A

м. Харків – 2026 рік

Лист оцінок кваліфікаційної роботи здобувача Окольничого К.М.

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти (прізвище в родовому відмінку та ініціали)
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*	**61 б.:**	**61 б.:**	**61 б.:**
(структура звіту - наявність обов'язкових розділів і підрозділів):	***49 б.***	***49 б.***	***49 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)	***8 б.***	***8 б.***	***8 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**.	**99 б**.	**99 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 ІТ,
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	Окольничого Кирила Максимовича (прізвище ім'я по батькові в родовому відмінку)
Тема кваліфікаційної роботи	Автоматизована система залізничного переїзду
Постановка завдання в стислій формі	Виконати проєктування апаратно-програмної системи, як фрагменту IoT, виконати аналіз предметної області, сформувати концептуальну, логічну та фізичну моделі системи та за певними сценаріями виконати моделювання системи за темою здобувача як нечіткої когнітивної карти та нечіткої логічної системи.
Джерела, які рекомендує керівник курсової роботи	Highway-Rail Crossing Handbook - Third Edition. https://highways.dot.gov/safety/hsip/xings/highway-rail-crossing-handbook-third-edition Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis. https://www.mdpi.com/2673-7590/5/1/24

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) Петренко Тетяна Григорівна

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 «Автоматизована система залізничного переїзду» 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 (ка) 4-го курсу
109-ТШІ-Д22 групи
Галузь знань 12 - Інформаційні технології
Спеціальність 126 - Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма - Технології штучного інтелекту)

Окольничий Кирило Максимович
(ПІБ)

Дата 23.06.2026

Підпис

м. Харків – 2026 рік

РЕФЕРАТ

Окольничий К.М. Автоматизована система залізничного переїзду. - На правах рукопису.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти: 60 сторінок, 24 рисунків, 9 таблиць, 22 джерел, 4 додатка.

Об’єктом дослідження є автоматизована система контролю залізничними переїздами із використанням технології LIDAR для автоматичного визначення інтервалу часу, на який переїзд буде закритий, світлова сигналізація буде включена, а шлагбауми не будуть відкритими.

Метою роботи є проєктування автоматизованої системи контролю залізничним переїздом із використанням LIDAR для визначення часу закриття переїзду Б під час руху поїзда від переїзду А до моменту повного проходження переїзду Б. На основі отриманих даних система обчислює тривалість закриття переїзду Б, забезпечуючи керування шлагбаумами, світловою сигналізацією та передаванням інформації диспетчеру.

Методами дослідження є аналіз обробки даних LIDAR-сенсорів, моделювання часових параметрів руху поїзда між двома переїздами та ухвалення рішень щодо автоматизованого керування переїзною інфраструктурою.

Були побудовані UML діаграми концептуальної, логічної та фізичної моделей системи. Апаратний прототип реалізовано на мікроконтролері ESP32 із застосуванням LIDAR-сенсорів та засобів бездротового зв'язку. Визначення часу закриття переїзду Б здійснено на основі нечіткої когнітивної карти (Fuzzy Cognitive Map, FCM), аналіз дав змогу встановити концепти, що визначають тривалість закриття переїзду, і обґрунтувати формування нечітких змінних для моделювання системи за допомогою нечіткого виведення в MATLAB.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ПЕРЕЇЗД, LIDAR, UML-ДІАГРАМИ, FCM, ЧАС ЗАКРИТТЯ ПЕРЕЇЗДУ, ESP32, WI-FI, MENTAL MODELER

ABSTRACT

Kyrylo Okolnychyi. Automated railway crossing system. - Manuscript rights.

Explanatory note to the qualification work of a first (bachelor's) level higher education applicant: 60 pages, 24 figures, 9 tables, 22 sources, 4 appendices.

The object of the study is an automated railway crossing control system using LIDAR technology to automatically determine the time interval for which the crossing will be closed, the traffic lights will be turned on, and the barriers will not be open.

The purpose of the work is to design an automated railway crossing control system using LIDAR to determine the closing time of crossing B during the movement of the train from crossing A to the moment of complete passage of crossing B. Based on the data obtained, the system calculates the duration of closing crossing B, ensuring control of the barriers, traffic lights and transmission of information to the dispatcher.

The research methods are the analysis of data processing of LIDAR sensors, modeling of the time parameters of train movement between two crossings and making decisions on automated control of the crossing infrastructure.

Had been built UML diagrams of the conceptual, logical, and physical models of the system. The hardware prototype is implemented on an ESP32 microcontroller using LIDAR sensors and wireless communication. The determination of the closing time of the crossing B is carried out on the basis of a fuzzy cognitive map (Fuzzy Cognitive Map, FCM), the analysis made it possible to establish concepts that determine the duration of the crossing closure, and to justify the formation of fuzzy variables for system modeling using fuzzy inference in MATLAB.

RAILWAY CROSSING, LIDAR, UML DIAGRAMS, FCM, CROSSING CLOSING TIME, ESP32, WI-FI, MENTAL MODELER

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 13
3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПЕРЕЇЗДУ 16
3.1 Концептуальна модель системи 16
3.2 Логічна модель системи. Моделювання в Mental Modeler 21
3.3 Логічна модель системи. Моделювання в MATLAB 27
3.4 Фізична модель системи 35
4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ПРОТОТИП СИСТЕМИ 38
4.1 Топологія та компоненти апаратної частини прототипу системи 38
4.2 Архітектура та компоненти програмної частини прототипу системи 41
4.3 Опис даних та бібліотек підтримки компонентів системи 44
ВИСНОВКИ 47
СПИСОК ПОСИЛАНЬ 49
ДОДАТОК А ДІАГРАМИ UML 52
ДОДАТОК Б МОДЕЛЮВАННЯ В MENTAL MODELER 53
ДОДАТОК В МОДЕЛЮВАННЯ В MATLAB 56
ДОДАТОК Г МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ 60

ВСТУП

Значна кількість дорожньо-транспортних пригод на залізничних переїздах виникає через недостатню автоматизацію систем. Тому актуальним є дослідження в напрямку вдосконалення системи сигналізації залізничного переїзду та використання технології LiDAR, що покращує виявлення наближення потяга, і рівень безпеки роботи залізничного переїзду.

Автоматизована система залізничного переїзду повинна забезпечувати контроль руху потяга між двома переїздами, автоматичне визначення часу закриття переїзду, вмикання світлової сигналізації та керування шлагбаумами. Система має фіксувати момент входження поїзда у ділянку віддалення, а також контролювати проходження потяга. На основі отриманих даних система автоматично визначає тривалість закриття переїзду. Технологія LIDAR може розглядатися як заміна або доповнення релейних кіл фіксації потяга, оскільки дозволяє з високою точністю визначати відстань до об’єктів, напрямок та параметри руху. Використання сенсорів дає можливість підвищити точність роботи системи та зменшити ймовірність помилкових спрацювань.

Проєктування системи передбачає визначення основних концептів предметної області та взаємозв’язків між ними. Важливими етапами є аналіз характеристик сенсорів, їх точності та можливості інтеграції в IoT-систему на базі мікроконтролера ESP32.

При проєктуванні також необхідно враховувати обмеження обчислювальних ресурсів контролерів, затримки передачі даних та вплив зовнішніх факторів на роботу сенсорів. Для обґрунтування архітектури системи застосовуються методи UML-моделювання, нечіткі когнітивні карти (FCM) та MATLAB. UML-діаграми використовуються для формалізованого опису структури системи, її компонентів та взаємозв’язків між ними. FCM-модель забезпечує аналіз причинно-наслідкових залежностей між факторами, що впливають на тривалість закриття залізничного переїзду, а MATLAB дозволяє виконувати моделювання та оцінку часу закриття переїзду.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є проєктування автоматизованої системи керування залізничними переїздами для визначення часу закриття переїзду Б під час руху потяга між переїздами А та Б із використанням технології LIDAR.

Основним завданням системи є моніторинг переміщення потяга за допомогою LIDAR-сенсорів, виконання аналізу даних і забезпечення формування керуючих сигналів для роботи світлової сигналізації і шлагбаумів. LIDAR, встановлений на переїзді А, фіксує початок руху потяга та передає сигнал до системи керування переїздом Б, тоді як інший LIDAR фіксує момент повного звільнення переїзду Б. На основі отриманих даних система автоматично визначає тривалість закриття переїзду та забезпечує підвищення безпеки руху. Технологія LIDAR може розглядатися і як інформаційна технологія заміни релейних кіл, коли використовується обробка хмари точок, що додатково дає змогу оцінювати швидкість і напрямок руху.

Для вирішення завдання в роботі необхідно реалізувати такі етапи:

1) Виконати аналіз предметної області та роботи залізничних переїздів;
2) Визначити основні вимоги до системи автоматизованого контролю за допомогою технології LIDAR у системі моніторингу руху потяга;
3) Обґрунтувати вибір апаратних засобів;
4) Побудова моделей системи з використанням UML для опису структури та поведінки;
5) Побудова FCM для аналізу зв’язків і впливу, що впливають на тривалість закриття переїзду;
6) Виконати моделювання роботи системи на основі FCM за заданими сценаріями та проаналізувати динаміку зміни станів концептів;
7) Виконати моделювання роботи системи з визначення часу закриття переїзду у середовищі MATLAB;
8) Сформулювати висновки щодо вдосконалення системи автоматизованого контролю залізничного переїзду.

2 ОПИС ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ

2.1 Опис предметної області

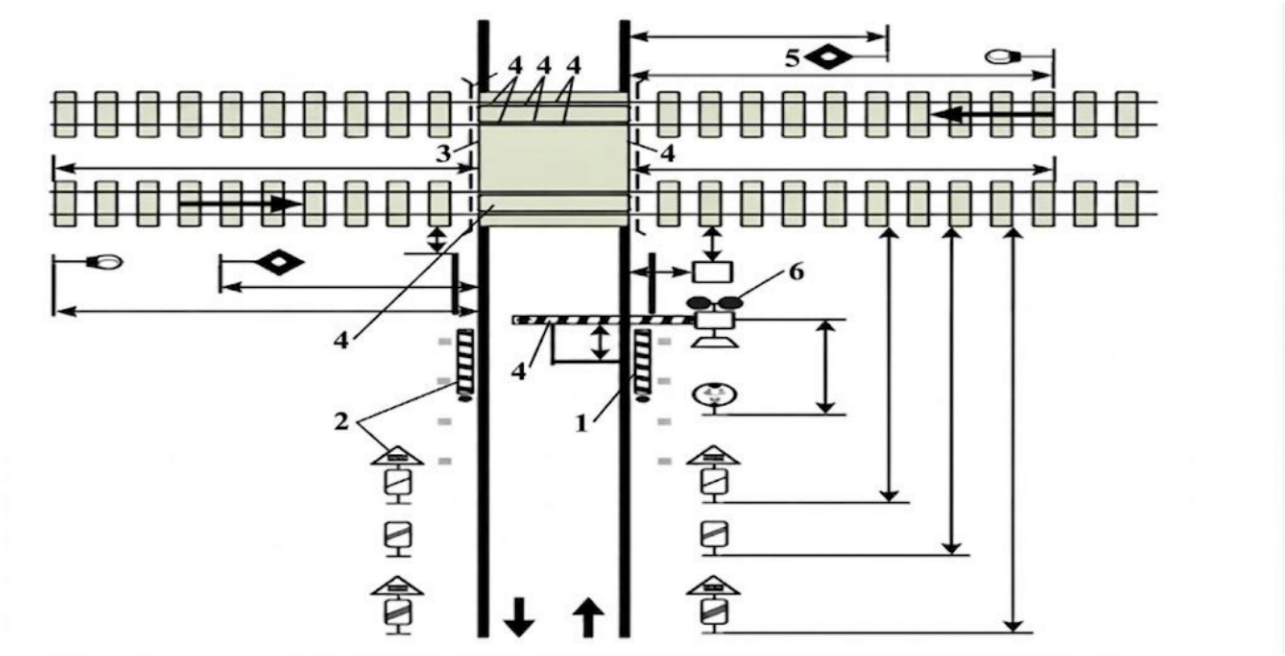
Опис предметної області в роботі зроблено відповідно до вимог [1-2].

Залізничний переїзд - це місце перетинання в одному рівні залізничної колії та автомобільної дороги. Переїзди облаштовуються в місцях з хорошою видимістю, причому кут перетину дороги із залізничною колією повинен становити не менше 60 градусів. За даними в Україні налічується понад 5574 залізничних переїздів, зокрема, обладнаних автоматичним сигналом переїзду автомагістралей 4191, з них із сигналістом 1441 [3]. Переїзди поділяються на чотири категорії [4]:

a) I категорія - обладнані шлагбаумами на всю ширину автомобільної частини та світлофорами, які мають пристрої сигналізації, централізації та блокування (пристрої СЦБ) або обслуговуються черговим;
b) II категорія - світлофори і два шлагбауми на півширини дороги;
c) III категорія - лише світлофор з двома червоними заборонними ліхтарями, без шлагбаумів;
d) IV категорія - без шлагбаумів і світлофорів, позначається лише дорожнім знаком у вигляді червоно-білого хреста.

Існуючі штатні системи виявлення поїздів регламентуються ДСТУ EN 50238-1:2018 «Залізничний транспорт. Сумісність між рухомим складом і системою виявлення поїзда» [5].

Предметна область, пов’язана з управлінням системою сигналізації на залізничному переїзді, містить різноманітні аспекти безпеки та комунікації на залізничних переїздах. Загальне улаштування та обладнання переїзду зі шлагбаумами наведено на (рис. 2.1).



1 - шлагбаум; 2 - огороджувальні стовпчики; 3 -дерев'яні бруси; 4 - колійні рейки; 5 - загороджувальний світлофор; 6 - переїзний світлофор із звуковою сигналізацією

Рисунок 2.1 - Улаштування та обладнання переїзду зі шлагбаумами [4]

Зона в межах переїзду називається небезпечною зоною. Для її огородження застосовують механізовані шлагбауми; світлофорну сигналізацію; рейкові кола ділянки наближення, довжина яких розраховується залежно від швидкості поїздів, як правило, повинно забезпечувати час сповіщення не менше 30-40 с до прибуття поїзда. Безпосередньо на переїзді укладаються залізобетонні плити або інше покриття, встановлюються огороджувальні стовпчики, перила, водовідвідні лотки, дорожні знаки, наноситься суцільна осьова лінія [4].

Під час вступу першої колісної пари поїзда на ділянку наближення відбувається шунтування рейкового кола. Альтернативою рейковим колам є лічильники осей, які фіксують проходження колісних пар у контрольних точках і визначають зайнятість ділянки за різницею кількості осей, що зайшли на ділянку та вийшли з неї [4]. Рейкові кола розташовуються не лише безпосередньо на переїзді, а й на підходах до нього та після переїзду. Це необхідно для завчасного закриття переїзду перед наближенням поїзда та автоматичного відкриття після повного звільнення небезпечної ділянки хвостом состава.

Інформація про стан переїзду одночасно передається на найближчу станцію через систему диспетчерського контролю, що дозволяє черговому контролювати працездатність обладнання та стан переїзної установки в режимі реального часу. У разі аварійної ситуації можливе ручне ввімкнення загороджувальної сигналізації для примусової зупинки поїзда [4].

Після виявлення поїзда система послідовно активує засоби переїзної сигналізації, вмикаються червоні миготливі сигнали переїзних світлофорів [4].

Опускання брусів автоматичних шлагбаумів здійснюється не миттєво, а після витримки часу тривалістю 14-16 секунд. Затримка передбачена для того, щоб транспортні засоби, які вже перебувають на переїзді в момент увімкнення сигналізації, мали достатньо часу для залишення небезпечної ділянки [4].

Після проходження поїзда система контролює звільнення переїзду за допомогою кодування сигналу «вслід» поїзду. Коли рейкові кола фіксують повне звільнення контрольованої ділянки, шлагбауми автоматично підіймаються у вертикальне положення. Після завершення процесу вимикаються світлова сигналізації, що свідчить про відкриття переїзду для руху транспорту [4].

Робота переїзної автоматики ґрунтується на принципі захисної відмови (fail-safe): за будь-якої несправності, зникнення живлення, система переходить у найбезпечніший стан, тобто переїзд залишається або переводиться в закритий стан. Цей принцип забезпечує безпеку руху, проте призводить до додаткових необґрунтованих закриттів переїзду [4].

Даний підхід не завжди забезпечує повну надійність, оскільки рейкові кола можуть помилково фіксувати звільнення ділянки. Чутливість шунтування рейкового кола залежить від стану рейок, особливо через забруднення, іржі, опору баласту та погодних умов, через що ділянка може помилково фіксуватися як зайнята або, навпаки, як вільна.

Наведений опис стосується наявних систем залізничної автоматики. Предметом кваліфікаційної роботи є не самі системи комплексу пристроїв сигналізації, централізації та блокіровок (СЦБ), а інформаційна технологія

обробки даних та прийняття рішень, яка дозволяє удосконалити процес виявлення поїзда та інших перешкод.

2.2 Огляд підходів до вирішення завдання

Забезпечення безпеки на залізничних переїздах усе помітніше зміщується у бік оптично-сканувальних технологій, серед яких провідну роль відіграє LiDAR. Принцип роботи цього сенсора полягає у випромінюванні лазерних імпульсів та вимірюванні часу їхнього повернення після відбиття від об'єктів, що дозволяє формувати точну тривимірну карту контрольованого простору. Така здатність працювати із слабкою залежністю від рівня природного освітлення та погодних умов робить LiDAR особливо привабливим для критичних інфраструктурних об'єктів, де від надійності залежить життя [6].

Практичним прикладом застосування LiDAR-технології на залізничних переїздах у Європі є спільна розробка литовського системного інтегратора Belam та американської компанії Cepton Technologies, реалізована у 2021 році на одному з найзавантаженіших переїздів у Литві. У межах цього проєкту розгорнуто інтелектуальну сигналізаційну систему Helius Smart Lidar на основі сенсорів серії Vista-P90, причому під час підготовки тестування різних типів сенсорів, у тому числі мікрохвильових радарів, підтверджено, що саме рішення Helius Smart Lidar має найвищі показники надійності та безпеки і працює стабільно у будь-який час доби за різних погодних умов. За даними розробників, після інсталяції на завантаженому переїзді у Європі система обробила понад 15000 проходжень поїздів, а сукупна точність виявлення перешкод перевищила 99,9%. Досягнута точність дозволила підвищити категорію безпеки переїзду, унаслідок чого дозволена швидкість поїздів через переїзд зросла майже удвічі, а вимога обов'язкової повної зупинки автотранспорту перед перетином колії була скасована [7].

У дослідженні [8] описано систему виявлення та відслідковування об'єктів у зоні залізничного переїзду на базі 3D-LiDAR із 16-ма каналами та граничної

IoT-платформи: обробка точкової хмари виконується безпосередньо поблизу датчика, що зменшує затримку реакції та дозволяє у реальному часі передавати на поїзд попередження про потенційну колізію. Компанія Neuvition пропонує комплексне рішення для безпеки рейкового транспорту, у якому LiDAR-сенсори Titan виявляють сторонні об'єкти на ділянці колії на відстані до 600 м, працюють із точністю до 2 см та відповідають жорстким галузевим вимогам щодо вібрації, електромагнітної сумісності й температурного діапазону [9].

LiDAR було запропоновано як заміна (або доповнення) використання рейкових кіл для виявлення самого поїзда, оскільки класичні системи фіксують поїзд лише у фіксованій точці колійної ділянки та не враховують характеристик руху, тоді як радарне або LiDAR-рішення позбавлене цього обмеження; за результатами моделювання у середовищі PTV Vissim (програмне забезпечення для моделювання дорожнього руху) запропонований метод дозволяє скоротити час закриття переїзду на 68,6% без зниження рівня безпеки [10].

Технічна можливість використання саме LiDAR-сенсорів Cepton Vista-P90, котрі належать до серії промислових LiDAR Vista-P, для фіксування поїздів у зонах наближення та віддалення обумовлена характеристиками цієї технології [11]:

1) Максимальна дальність виявлення до 200 м за відбивної здатності об’єкта 30%;
2) Поле зору (горизонтальне × вертикальне) 90 градусів × 27 градусів;
3) Щільність точкової хмари близько 315000 точок за секунду;
4) Частота кадрів конфігурується програмно засобами Cepton SDK, задається тривалість кадру в мікросекундах;
5) Напруга живлення 10-15 В, типове енергоспоживання 12 Вт;
6) Конструкція на основі технології Micro Motion Technology (MMT), котра безфрикційна, бездзеркальна, без обертових частин, що забезпечує стабільність параметрів (поле зору, кутова роздільна здатність, щільність точкової хмари та точність вимірювання відстані) і високу надійність за різних погодних умов.

Наведені характеристики свідчать, що сенсори класу Vista-P90 технологічно придатні для виявлення поїзда у зонах наближення та віддалення. Достатня дальність (до 200 м) і висока щільність точкової хмари дозволяють фіксувати появу состава на відстані та відстежувати його траєкторію, а отже оцінювати швидкість і напрям руху. Оскільки поїзд рухається за заздалегідь визначеною траєкторією, для залізничних застосувань доцільно встановлювати стаціонарні сенсори на придорожніх опорах збоку від колії, що оглядають критичні ділянки [12]. При задачі виявлення поїзда фактично змінюється лише орієнтація сенсора, межі контрольованих зон і алгоритм фонового віднімання точкової хмари. Таким чином клас сенсорів Cepton Vista-P90 технологічно цілком здатен виконувати й функцію виявлення рухомого поїзда у зонах наближення та віддалення.

Попри переваги, LiDAR має й обмеження, які слід ураховувати під час проєктування. Ефективна дальність і точність вимірювань знижуються за густого туману, сильного снігу або зливи через розсіювання та поглинання лазерного випромінювання. Коректна робота потребує початкового калібрування й постійного фонового віднімання точкової хмари, і достатніх обчислювальних ресурсів для опрацювання значного потоку точок. Сенсор є чутливим до забруднення оптичного вікна та потребує захисту від прямого засвічення, а також залежить від наявності стабільного живлення й каналу передавання даних.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПЕРЕЇЗДУ

3.1 Концептуальна модель системи

У кваліфікаційній роботі запропоновано підхід LiDAR-моніторингу, що охоплює не один, а два послідовні переїзди, а саме А та Б. Передбачено використання сенсорів Cepton Vista-P90: по два на кожному переїзді, розміщені у зонах наближення та віддалення. Сенсори встановлюються на придорожніх опорах збоку від колії і орієнтуються вздовж колійної ділянки. Така топологія дозволяє відстежувати траєкторію поїзда вздовж усієї контрольованої ділянки й використовувати дані з одного переїзду для випереджального керування суміжним переїздом.

Ключовим елементом підходу є використання інформації з переїзду А для керування переїздом Б. Послідовність роботи системи така:

a) Сенсор LiDAR у зоні віддалення переїзду А фіксує проходження хвостової частини поїзда, що інтерпретується як повне звільнення першої небезпечної ділянки й одночасно як підтвердження руху состава у напрямку переїзду Б;
b) На підставі сигналу сенсору LiDAR переїзду А система розраховує не тільки час, починаючи з якого треба закрити переїзд, але і час, впродовж якого переїзд Б буде закритий;
c) Переїзд Б переходить у закритий стан ще до фактичного входження поїзда в його зону контролю, що зменшує час реакції та виключає затримки закриття;
d) Відкриття переїзду Б відбувається лише після того, як сенсор LiDAR у його зоні віддалення зафіксує проходження останнього вагона, чим гарантується повне звільнення колії.

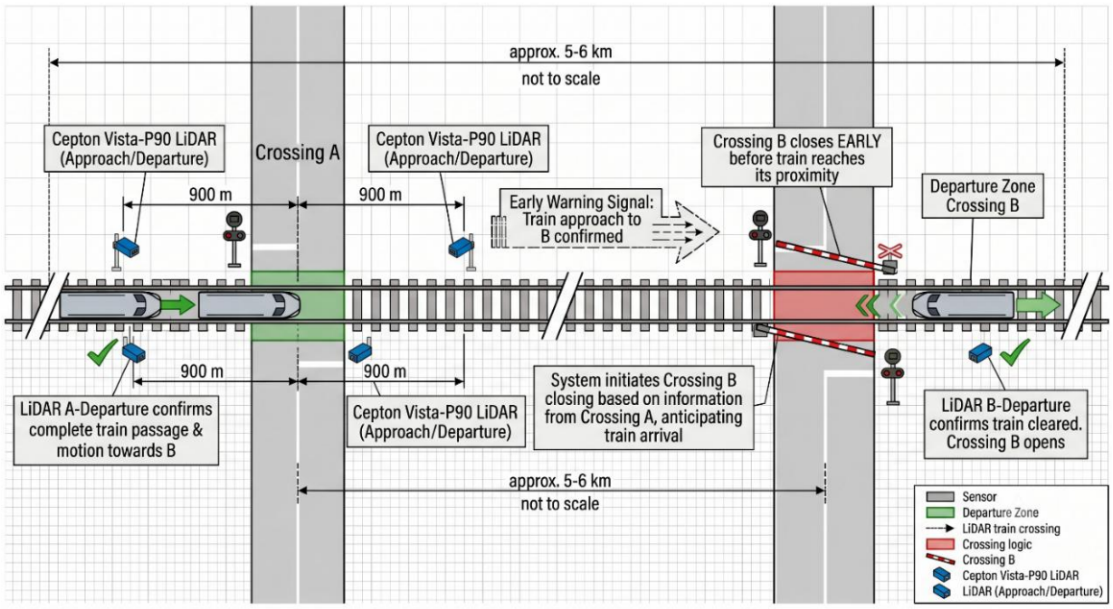


Рисунок 2.2 - Схема системи випереджального закриття суміжного переїзду Б за LiDAR даними моніторингу переїзду А [13]

На рис. 2.2 наведено просторову схему двох послідовних переїздів А та Б, рознесених на відстань близько 5-6 км, схема подана без дотримання масштабу. Кожен переїзд обладнано двома LiDAR сенсорами Cepton Vista-P90, встановленими на придорожніх опорах збоку від колії у зонах наближення та віддалення, приблизно за 900 м від переїзду. Описана послідовність наведена для напрямку руху від А до Б. Для зустрічного напрямку схема працює дзеркально: сигналом випереджального закриття переїзду А слугує фіксація звільнення зони переїзду Б, при цьому функціональні ролі сенсорів визначаються поточним напрямком руху поїзда, оскільки конфігурація сенсорів на обох переїздах симетрична.

Автоматизована система, що пропонується в роботі, визначає стан переїзду у реальному часі та працює на упередження. Система автоматично виконує виявлення поїздів, розрахунок часу на який буде закрито переїзд, керування шлагбаумами та сигналізацією. Роль людини полягає у спостереженні за роботою системи за потреби, прийнятті рішень у нестандартних ситуаціях та

переході на ручне керування за потреби. Таким чином, система реалізує автоматизоване керування із можливістю контролю та втручання оператора.

Для отримання даних у запропонованій системі використовується LiDAR-сенсор Cepton Vista-P90. Сенсор передає сформовану хмару точок через мережевий інтерфейс Ethernet на основі Волоконно-Оптичних Ліній Зв'язку (ВОЛЗ) на комп'ютер, який виконує функції центрального вузла обробки. На цьому етапі здійснюється аналіз інформації з метою визначення моменту появи поїзда в контрольованій зоні, проходження хвостової частини состава та оцінювання швидкості. Результати обробки перетворюються у повідомлення та передаються до виконавчого контролера ESP32, що керує шлагбаумами й світловою сигналізацією.

Обмін інформацією між переїздами та автоматизованим робочим місцем диспетчера організовано за архітектурою, у якій програмні компоненти виконуються на різних пристроях і взаємодіють між собою через локальну мережу шляхом обміну даними. Телеметричні дані та службові події надходять до диспетчерського пункту, а команди керування передаються до виконавчих пристроїв. Відомості про стан переїздів, часові характеристики подій та результати роботи системи накопичуються в базі даних для подальшого аналізу.

Особливістю запропонованого підходу є використання накопичених даних про тривалість закриття переїздів для підтримки диспетчерських рішень. Така інформація дозволяє оцінювати вплив переїздів на пропускну спроможність дільниці та враховувати його під час організації руху поїздів. Наприклад, у разі попутного слідування кількох поїздів з невеликим часовим інтервалом система або диспетчер може прийняти рішення не відкривати переїзд між проходженнями составів. Це дає змогу скоротити кількість циклів спрацювання переїзної автоматики та зменшити затримки руху автомобільного транспорту.

Інформація про фактичний час закриття переїзду є також корисною під час планування колійних і ремонтних робіт. За наявності обмежень руху або проведення технологічних операцій тривалість закриття може відрізнятися від штатного режиму роботи. Отримані статистичні дані дозволяють завчасно

оцінити можливі наслідки для автомобільного руху та використовувати їх під час погодження графіків робіт із зацікавленими службами й органами місцевого самоврядування.

Проєктована автоматизована система керування залізничним переїздом (Automated Railway Crossing Control System, ARCCS) призначена для забезпечення безпечної взаємодії залізничного, автомобільного транспорту у зоні перетину залізничної колії з автомобільною дорогою. Оператором системи є черговий, який через автоматизоване робоче місце здійснює спостереження поточного стану переїзду, може здійснювати ручне втручання у разі виникнення аварійних ситуацій.

Виявлення наближення поїзда до зони переїзду реалізується за допомогою сенсора LIDAR, який формує тривимірну хмару точок, що використовується для оцінювання відстані до об’єкта, його швидкості та напрямку руху. Безпосередньо обробка даних від LiDAR не є частиною кваліфікаційної роботи. Автоматизована система керування переїздом отримує від модуля обробки даних від LiDAR певні дані, що потрібні для визначення часу закриття переїзду (тип об’єкту, напрямок руху, швидкість). Після спрацювання сигналізації та приводу шлагбаумів виконується додатковий контроль споживаного струму в силових колах виконавчих механізмів. Це дає змогу підтвердити фактичне спрацювання обладнання та виявити часткові або приховані відмови, які не фіксуються за логічними сигналами керування.

Опис акторів системи наведено у табл. 3.1, опис прецедентів (варіантів використання) - у табл. 3.2.

Таблиця 3.1 - Актори системи

Ім’я актора системи	Пояснення призначення
Duty Officer	Черговий залізничної станції, який спостерігає за станом переїзду, отримує інформаційні повідомлення, має повноваження переводити систему в режим ручного керування
Train	Об'єкт залізничного транспорту, наближення та проходження якого через зону контролю є основним джерелом вхідних подій

Таблиця 3.2 - Варіанти використання системи

Варіант використання	Пояснення призначення
Supervise crossing state	Загальний контроль за станом переїзду, перегляд інформації про положення потяга
Manual crossing control	Дії чергового з примусового керування шлагбаумами та сигналізацією переїзду у нештатних ситуаціях
View event log	Доступ чергового до архіву подій
Automatic crossing control	Автоматичне керування переїздом, а саме отримання сигналу від LiDAR А, обчислення часу закриття за нечіткою моделлю, активація сигналізації, опускання шлагбауму, очікування проходження поїзда, фіксація LiDAR Б, відкриття переїзду
Detect train	Виявлення поїзда біля переїзду
Detect train departure	LiDAR фіксує момент відправлення поїзда з ділянки віддалення переїзду
Detect train passing	Фіксація LiDAR моменту звільнення потягом дільниці переїзду, що ініціює відкриття переїзду
Measure train speed	Вимірювання швидкості поїзда LiDAR
Receive delay data	Отримання інформації про поточну затримку поїзда від графіка руху
Calculate transit time	Розрахунок часу проїзду полос наближення та віддалення переїзду
Calculate closing time	Обчислення часу закриття переїзду
Control crossing signaling	Автоматичне ввімкнення/вимкнення світлової сповіщувальної сигналізації переїзду
Control barrier	Автоматичне опускання та підіймання шлагбаумів із дотриманням часових витримок
Verify equipment power consumption	Вимірювання споживаного струму в силових колах сигналізації та приводу шлагбаума для підтвердження фактичного ввімкнення/вимкнення обладнання
Detect malfunction	Спрацьовує у разі розбіжності відмова світлової сигналізації чи заклинювання шлагбаума
Notify duty officer	Формування та передача аварійного повідомлення
Emergency crossing lock	Примусове утримання шлагбаумів у закритому стані
Activate signaling	Подача напруги на сповіщувачі світлової сигналізації
Deactivate signaling	Зняття напруги зі сповіщувачів світлової сигналізації
Close barrier	Команда на опускання шлагбаума з контролем положення
Open barrier	Команда на підіймання шлагбаума з контролем положення
Test signaling equipment	Короткочасне ввімкнення сигналізації у тестовому режимі для перевірки справності

Use case Diagram наведена на рис.А.1.

3.2 Логічна модель системи. Моделювання в Mental Modeler

Першим етапом моделювання FCM в Mental Modeler (MM) є виділення концептів системи автоматизованого керування залізничним переїздом. Було виділено 14 концептів та діапазони вимірювання кожного концепту (табл.3.3) [13, 14].

Таблиця 3.3 - Компоненти FCM

Назва компоненту	Пояснення призначення
Distance	Визначає відстань між переїздами, вимірюється в діапазоні від 3000 до 6000 м
Train approach	Наближення потяга, що розраховується за послідовними вимірюваннями LiDAR, вимірюється в діапазоні 0-200 м
Train direction	Напрямок руху потяга (наближення / віддалення), вимірюється в як - 1 та +1
Train speed	Швидкість руху потяга, вимірюється в діапазоні 0-120 км/год
Weather conditions	Визначає погодні умови (опади, туман, обмерзання), що впливає на якість роботи, вимірюється в діапазоні 0-100%
Ambient temperature	Впливає на роботу електромеханічних приводів та LiDAR, вимірюється в діапазоні від -40 до +50°C
LIDAR signal quality	Показник достовірності інформації, отриманої від LiDAR, що оцінюється за інтенсивністю повернутого сигналу, кількістю відбиттів і рівнем шуму, вимірюється в діапазоні 0-100%
Signaling status	Стан світлової сигналізації переїзду - увімкнено(1)/вимкнено(0)
Barrier position	Фактичне положення шлагбаума - піднято(1)/у русі(0)/опущено(-1)
False detection rate	Показник, що характеризує частоту помилкових виявлень, за яких фіксується наявність або наближення потяга за його фактичної відсутності, вимірюється в діапазоні 0-100%
Signaling activation delay	Часовий інтервал між фіксацією наближення потяга та фактичним увімкненням сповіщувальної сигналізації, вимірюється 0-40 с
Equipment wear level	Ступінь технічного зносу елементів виконавчого обладнання (шлагбаумів, приводів, сигнальних пристроїв), вимірюється в діапазоні 0-100%
Equipment malfunction level	Показник технічного стану системи, що формується на основі якості сигналу LIDAR, частоти хибних спрацювань та накопиченого зносу, вимірюється в діапазоні 0-100%
Crossing closure time	Момент прийняття системою рішення про закриття переїзду до відкриття, від 0 до 20 хвилин, перевищення 20 хвилин ситуація класифікується як нештатна, і потребує втручання оператора

FCM використовується при проєктуванні ARCCS для моделювання причинно-наслідкових зв'язків між параметрами зовнішнього середовища,

станом обладнання та результуючим часом закриття переїзду. Модель дозволяє оцінити, як зміна окремих факторів (компонентів FCM) впливає на цільовий показник системи, а це час, на який буде закрито переїзд. Це дає змогу на етапі проєктування виявити критичні зв'язки, обґрунтувати вибір порогових значень.

Другим етапом формування FCM за допомогою середовища MM, використовуючи концепти системи автоматизованого керування залізничним переїздом, як компоненти FCM, є візуальне створення FCM. Процес побудови також передбачає визначення, які концепти впливають один на одного та здійснити первинну оцінку вагомості зв’язків.

Вагомість кожного зв’язку характеризується числовим значенням у межах від -1 до 1, яке відображає вплив одного компонента на другий і використовується для побудови матриці вагомості зв’язків. Під час корегування оцінок зв’язків на основі аналізу структури та принципів функціонування автоматизованої системи контролю залізничного переїзду, було виявлено слабко обґрунтовані впливи, які не відповідають реальній системі.

У результаті FCM-схема (рис.Б.1) та матриця ваг зв’язків (рис.Б.2), яка відображає зв’язок між концептами.

Наступним етапом моделювання є тестування, сформовано 2 ситуації:

1) Ситуація 1 - потяг рухається до переїзду в умовах гарної видимості та температури навколишнього середовища, система має зберегти штатне спрацювання за рахунок внутрішніх компенсаційних зв'язків та мінімально допустимий час утримання залізничного переїзду в закритому стані: Distance (1), Weather Conditions (0,71), Ambient Temperature (0,71), LIDAR Signal Quality (0,74):
    a) Результат з функцією активації Hyperbolic Tangent (рис.Б.3) - Signaling Status (0,79), Barrier Position (0,59) сигналізація переїзду увімкнена, що підтверджує своєчасне спрацювання, Train Approach (0,80), Train Direction (0,49), Train Speed (0,46) вказують на наявність та динаміку руху потяга в контрольованій зоні, цільовий концепт Crossing Closure

Time отримав високе позитивне значення (0,71), що відповідає очікуваному швидкому часу закриття залізничного переїзду;

b) Результат з функцією активації Sigmoid (рис.Б.4) - при тих самих вхідних значеннях концепти приймають істотно менші значення впливу та концентруються близько нуля Train Approach (0,09), Train Direction (0,04), Signaling Status (0,02), Signaling Activation Delay (0,07), Equipment Wear Level (0,04), Train Speed (0,04), Crossing Closure Time (0,01), Barrier Position (0), False Detection Rate (-0,01), що якісно суперечить очікуваній реакції системи при гарних погодних і температурних умов; виконавчі концепти зберігають позитивне спрямування;

c) Висновок - обидві функції активації дають узгоджений результат, але Hyperbolic Tangent забезпечує динамічний діапазон значень і чіткіше розрізнення станів, і підтверджується адекватність моделі штатному режиму роботи системи ARCCS з урахуванням часу закриття переїзду;

2) Ситуація 2 - поєднання несприятливої погоди, екстремальної температури критичний стан системи з визначення часу. Початкові значення: Distance (1), Weather Conditions (-0,74), Ambient Temperature (-0,82), LIDAR Signal Quality (-0,27):

a) Результат з функцією активації Hyperbolic Tangent (рис.Б.5) - Signaling Status (-0,11), Barrier Position (-0,10) обидва набувають від'ємних значень, фіксується неспроможність системи активувати переїздну сигналізацію, Signaling Activation Delay (0,45) зростає, що відображає затримку прийняття рішення, Train Approach (0,25) залишається додатним, але слабка швидкість виявлення потягу, тоді як Train Direction (-0,19) та Train Speed (-0,48), система с похибкою визначає поїзд та його швидкість, False Detection Rate (-0,54), Equipment Wear Level (-0,59), Equipment Malfunction Level (-0,57) та Crossing Closure Time (-0,72), що відповідає некоректному прогнозуванню часу закриття переїзду та порушенню очікуваного режиму роботи системи;

b) Результат з функцією активації Sigmoid (рис.Б.6) - при тих самих вхідних значеннях більшість концептів від'ємні, проте їхні модулі настільки малі, що в умовах наближення до критичних сценаріїв модель втрачає здатність чітко розрізняти різні стани системи, що зменшує її практичну ефективність для діагностики;
c) Висновок - обидві функції активації ідентифікують критичну ситуацію, але Hyperbolic Tangent забезпечує більше розрізнення станів щодо визначення часу очікуваного закриття переїзду, що підтверджує адекватність FCM-моделі для ARCCS.

Аналіз метрик FCM моделі (табл.3.4) проведено відповідно підходу [15], підтвердив збалансованість моделі, помірну складність та відповідність логікі роботи ARCCS. Модель містить 14 концептів і 27 причинно-наслідкових зв’язків, що забезпечує рівень деталізації без ускладнення структури. Зовнішні фактори впливають на проміжні компоненти, а цільовим показником, тобто вихідним, виступає час, на який буде закрито переїзд.

Задля визначення впливовості компонентів використовується метрика «центральність» (рис.Б.7). Центральність компонентів показує їхню важливість у моделі та відображає сумарний вплив вхідних і вихідних зв’язків. Чим більша центральність, тим важливіший компонент для формування результативних показників системи. Аналіз центральності показав, що найбільший вплив у системі мають концепти LIDAR signal quality, False detection rate, Signaling activation delay, Equipment malfunction level, Signaling status - значення центральності цих компонентів було виділено червоним кольором в таблиці, а значення центральності цільового компоненту - зеленим (табл. 3.4). Значення зв’язності 1,93 та щільності 0,148 свідчать про оптимальний рівень взаємозв’язків між компонентами, де модель залишається придатною для інтерпретації. Низьке значення індексу ієрархії (0,045) характеризує модель як демократичну, тобто таку, де цільовий компонент визначається сукупним впливом декількох важливих факторів, а не домінуванням одного концепту. Це

підвищує робастність моделі та забезпечує її адекватну реакцію на різні режими роботи й можливі відмови обладнання. Загалом отримані показники підтверджують, що розроблена FCM-модель є придатною для моделювання процесів функціонування автоматизованого залізничного переїзду.

Таблиця 3.4 - Метрики FCM

Показник FCM	Пояснення	Результат відповідно сформованої FCM
N (Компонентів)	Кількість компонентів у FCM	14
C (Зв'язків)	Кількість зв'язків (вказує на ступінь взаємодії між компонентами в FCM)	27
N1 (Передавачів або впливаючих компонентів)	Кількість компонентів, які впливають на інші компоненти системи, але не мають впливу інших компонентів	4
N2 (Приймачів або компонентів які мають вплив інших компонентів)	Кількість компонентів, на які впливають інші компоненти системи	1
N3 (Звичайні компоненти)	Кількість компонентів, що впливають та перебувають під впливом інших компонентів	9
Центральність	Абсолютне значення концептуальної важливості всієї моделі або окремого компоненту (чим вище значення суми абсолютних значень вагів вхідних та вихідних зв’язків, тим більше значення центральності моделі чи аналогічно індивідуальна вага компоненту в моделі)	0,88+2,7+1,78+1,96+ +0,44+3,69+2,72+1,31+ +3,52+3,45+2,26+ +2,82+1,99+3,16 = =32,68
Зв’язність (C/N)	Кількість зв'язків поділена на кількість компонентів (чим нижче показник C/N, тим нижче ступінь пов’язаності в системі)	$\frac{27}{14} = 1{,}93$
Складність моделі (N2/N1)	Співвідношення компонентів-приймачів до компонентів-передавачів (позначає ступінь роздільної здатності і є мірою ступеня досягнення результатів керуючих сил, вища складність свідчить про більше складне системне мислення)	$\frac{1}{4} = 0{,}25$
Щільність моделі	Відношення кількості визначених зв’зків між компонентами до максимальної кількості можливих зв’зків між компонентами (вища щільність свідчить про більшу прозорість керування компонентами системи)	$\frac{C}{N(N-1)} = \frac{27}{14(14-1)} = 0{,}148$

Індекс ієрархії*	Індекс позначення демократичного (рівної вагомості всіх концептів) або ієрархічного погляду на систему (вагомості концептів ієрархічно пов'язані) - від демократичного сприйняття - оцінка 0 до ієрархічного сприйняття - оцінка 1	$Od_i = \sum^{N}_{k=1} a_{ik} = 16,34$ $\mu_{od} = \frac{16,34}{14} = 1,16$ $\sigma^2_{od} = \frac{(0,88-1,16)^2+(1,39-1,16)^2}{14} = 0,739$ $h = \frac{12* 0,739}{14^2-1} = 0,045$

3.3 Логічна модель системи. Моделювання в MATLAB

На основі аналізу предметної області та FCM моделі системи в підрозділі 3.2 було розроблено нечітку логічну систему в середовищі MATLAB з використанням Fuzzy Logic Toolbox для реалізації знаходження часу, на який буде закрито переїзд Б. На кожному переїзді передбачено встановлення двох сенсорів LiDAR: першого на початку ділянки наближення та другого в кінці ділянки віддалення. Стартовим сигналом для системи керування переїздом Б є зафіксований сенсором LiDAR у кінці ділянки віддалення переїзду А в момент звільнення контрольованої зони хвостовою частиною поїзда. Подія визначається на основі аналізу зміни параметрів хмари точок. Система аналізує три основні вхідні параметри: швидкість руху поїзда, поточну затримку в русі та розрахунковий час проходження ділянок наближення й віддалення переїзду Б. На основі сформованої бази нечітких правил система виконує процедури фазифікації, нечіткого виведення та дефазифікації.

Для побудови нечіткої логічної моделі обрано метод нечіткого виведення за моделлю Mamdani, оскільки він найкраще відповідає експертному характеру задачі керування залізничним переїздом. У даному підході рішення формуються у вигляді лінгвістичних правил типу «ЯКЩО-ТО», що забезпечує їх інтерпритованість та придатність до експертного аналізу. На відміну від методу Sugeno, який зазвичай потребує аналітичного задання вихідних функцій, модель Mamdani дозволяє отримувати числове значення як результат дефазифікації вихідного значення. Лінгвістичні змінні та база правил дозволяють безпосередньо описувати поведінку системи природною мовою. Наприклад: «якщо швидкість низька, затримка коротка і час проїзду середній, то час закриття переїзду середній». Результат кожного правила можна легко пояснити й перевірити. Це критично для safety-critical систем, де важливо обґрунтувати, чому саме система вирішила закрити переїзд на певний час [16].

Перевагою моделі Mamdani є стійка поведінка вихідного сигналу завдяки перекриттю функцій належності та використанню центроїдної дефазифікації, що

зменшує вплив шумів вимірювання LiDAR та похибок оцінювання затримки. Окрім цього, реалізація повністю підтримується інструментами Fuzzy Logic Toolbox, що спрощує моделювання та верифікацію [16].

Процес побудови моделі включав визначення структури вхідних і вихідних змінних та їх термів, обґрунтування моделі нечіткого виведення, формування бази нечітких правил і верифікацію роботи в Rule Viewer.

Загальний вигляд побудованої нечіткої системи у редакторі Basic FIS Editor наведено в Додатку В (рис. В.1).

Побудована система містить три вхідні лінгвістичні змінні - Speed, Delay та TransitTime, і одну вихідну змінну ClosingTime. Усі функції належності задано у трапецієподібній формі (trapmf). Вхідні змінні формуються на основі даних, отриманих від сенсорів LiDAR та результатів їх обробки.

Вхідна змінна Speed (швидкість поїзда) задана на універсальному множині значень від 20 до 120 км/год, що охоплює швидкість всіх типів поїздів, а саме від маневрових і вантажних поїздів до пасажирських і швидкісних. Швидкість не задається оператором, а оцінюється за послідовними вимірюваннями положення поїзда сенсором LiDAR, що дозволяє визначити переміщення об'єкта між кадрами і обчислити миттєву швидкість. Графічне представлення змінної Speed наведено на рис. В.2.

Вхідна змінна Delay (затримка в русі) задана в діапазоні від 0 до 10 хв і характеризує додатковий час, на який поїзд відхиляється від графіка руху. Оскільки переїзд Б закривається випереджально за сигналом від переїзду А, прогнозне вікно закриття будується відносно планового графіка. Поїзд, який запізнюється відносно графіка, робить прогноз прибуття менш точним, чим більша затримка, тим сильніше розходження між часом прибуття, тоді система додає додатковий резерв часу на закриття переїзду, щоб компенсувати цю невизначеність. Діапазон до 10 хв обрано як такий, що покриває типові експлуатаційні відхилення. Графічне представлення змінної Delay наведено на рис. В.3.

Вхідна змінна TransitTime (час за який поїзд проїде ділянки наближення та віддалення переїзду) задана в діапазоні від 0 до 220 с і характеризує розрахунковий час проходження поїздом ділянки наближення та ділянки віддалення переїзду загальною довжиною 1800 м. Значення обчислюється автоматично за виразом (3.1):

$$\text{TransitTime} = \frac{L_{\text{набл}} + L_{\text{відд}}}{v}, \quad (3.1)$$

де (Lнабл + Lвідд) = 1800 м - сумарна довжина контрольованих ділянок, v - оцінена швидкість руху.

TransitTime обчислюється за швидкістю, що є окремою вхідною змінною, але довжина смуг наближення й віддалення на переїздах відрізняється, тому однакова швидкість на різних переїздах дає різний час проходження.

Графічне представлення змінної TransitTime наведено на рис. В.4.

Вихідна змінна ClosingTime (час, на який буде закрито переїзд) це результуючий час, протягом якого автоматизована система утримує переїзд Б у закритому стані, заданий у діапазоні від 0 до 20 хв. Перевищення позначки 20 хв трактується як нештатна ситуація: настільки тривале закриття не може бути обґрунтоване штатним рухом поїзда й може свідчити про збій вимірювання, аварійну зупинку состава в зоні або помилку оцінювання, тому в цьому разі система передає керування оператору. Графічне представлення вихідної змінної ClosingTime наведено на рис. В.5.

Нечітка логічна система забезпечує адаптивне визначення часу закриття переїзду Б з урахуванням поточного стану руху поїзда та невизначеності, характерної для реальних умов експлуатації. Використання трьох вхідних змінних дозволяє враховувати як динамічні характеристики руху поїзда, так і можливі відхилення від графіка.

Завдяки нечіткому виведенню рішення формується не на основі жорстко заданих порогових значень, а шляхом комплексної оцінки всіх факторів, що забезпечує плавну зміну вихідного параметра та підвищує надійність роботи системи. Отримане значення ClosingTime використовується для формування керуючого впливу на виконавчі механізми переїзду та визначає тривалість

утримання шлагбаума у закритому положенні до моменту безпечного проходження поїзда через контрольовану ділянку.

Інформацію про вхідні та вихідні нечіткі змінні наведено в (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Вхідні та вихідні змінні нечіткої логічної системи

Назва нечіткої змінної або терму	Пояснення призначення
Speed	Швидкість поїзда (км/год)
Low_speed	Визначення швидкості руху маневрових та вантажних поїздів
Medium_speed	Визначення швидкості руху приміських та звичайних пасажирських поїздів
High_speed	Визначення швидкості руху швидкісних пасажирських поїздів
Delay	Затримка поїзда у хвилинах, що показує додатковий час, на який поїзд відхиляється від графіка руху
Short_delay	Використовується для незначного відхилення від графіка,
Medium_delay	Використовується для помірної затримки
Long_delay	Використовується для суттєвого відхилення від графіка
TransitTime	Показує розрахунковий час, протягом якого поїзд проходить полосу наближення та полосу віддалення переїзду
Short	Описує, що поїзд швидко проходить полоси наближення і віддалення
Medium	Описує типову експлуатаційну ситуацію, що відповідає стандартним нормам облаштування переїздів полоси по 900 м, поїзд із середньою швидкістю
Long	Описує ситуацію тривалого знаходження поїзда у контрольованій зоні, через низьку швидкість, подовжені полоси наближення/віддалення або поєднання цих факторів
ClosingTime	Результуючий час, протягом якого автоматизована система утримує переїзд у закритому стані
Very_small_time	Характеризує мінімальне закриття для швидкого поїзда без затримки
Small_time	Характеризує невеликий достатній час закриття переїзду для штатних швидких ситуацій
Medium_time	Характеризує типовий експлуатаційний режим закриття переїзду, що зустрічається у більшості реальних ситуацій

Large_time	Характеризує подовжене закриття переїзду, наприклад при повільному поїзді, наявності затримки, довгого проходження ділянок
Very_large_time	Характеризує максимально можливий час закриття переїзду при повільному поїзді, наявності довгих затримок та довгого проходження ділянок переїзду

Усі вхідні змінні нечіткої системи формуються на основі даних сенсорів LiDAR, які забезпечують вимірювання швидкості проходження поїзда через контрольні зони. Значення швидкості руху поїзда визначається шляхом обробки послідовних вимірювань положення об’єкта в контрольних зонах, TransitTime розраховується як похідна величина на основі оціненої швидкості та відстані контрольованих ділянок, а Delay формується на основі затримки поїзда до графіку руху поїздів. Нечіткі терми, наведені в (табл. 3.5), відображають лінгвістичну інтерпретацію цих обчислюваних параметрів у складі нечіткої логічної системи, яка використовує дані LiDAR як джерело вхідної інформації для прийняття рішень щодо обчислення часу на який буде зачинено переїзд.

База налічує 27 правил нечіткого виведення за моделлю Mamdani, що відповідає повному декартовому добутку термів трьох вхідних змінних (3×3×3) (рис. В.6):

1) Якщо Speed = High_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Very_small_time - швидкий поїзд без затримки на ділянках;
2) Якщо Speed = High_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Small_time - швидкий поїзд, але більша територія переїзду;
3) Якщо Speed = High_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Small_time - швидкий поїзд на довгих ділянках переїзду;
4) Якщо Speed = High_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Small_time - швидкий поїзд з помірною затримкою на коротких ділянках переїзду;

5) Якщо Speed = High_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Small_time - ситуація з помірною затримкою для швидкого поїзда;
6) Якщо Speed = High_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Medium_time - затримка швидкого поїзда на довгих ділянках переїзду;
7) Якщо Speed = High_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Small_time - швидкий поїзд із суттєвою затримкою на коротких ділянках переїзду;
8) Якщо Speed = High_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Medium_time - велика затримка швидкого поїзда;
9) Якщо Speed = High_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Large_time - швидкий поїзд із великою затримкою на довгих ділянках переїзду;
10) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Small_time - приміський поїзд без затримки на коротких ділянках переїзду;
11) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Small_time - штатний рух приміського поїзда за графіком;
12) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Medium_time - приміський поїзд без затримки на довгих ділянках переїзду;
13) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Small_time - приміський поїзд з помірною затримкою на коротких ділянках переїзду;
14) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Medium_time - центральний типовий випадок;

15) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Large_time - помірна затримка приміського поїзда на довгих ділянках переїзду;
16) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Medium_time - велика затримка приміського поїзда на коротких ділянках переїзду;
17) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Large_time - велика затримка у штатних умовах для середньої швидкості;
18) Якщо Speed = Medium_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Large_time - приміський поїзд із великою затримкою на довгих ділянках переїзду;
19) ЯКЩО Speed = Low_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Small_time - повільний поїзд без затримки швидко проходить короткі ділянки переїзду;
20) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Medium_time - повільний поїзд за графіком;
21) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Short_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Large_time - повільний поїзд на подовжених ділянках довго перебуває в зоні переїзду;
22) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Medium_time - повільний поїзд із помірною затримкою на коротких ділянках переїзду;
23) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Large_time - повільний поїзд із помірною затримкою;
24) ЯКЩО Speed = Low_speed & Delay = Medium_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Large_time - повільний поїзд із помірною затримкою на довгих ділянках переїзду;

25) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Short, ТО ClosingTime = Large_time - повільний поїзд із суттєвою затримкою навіть на коротких ділянках переїзду;
26) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Medium, ТО ClosingTime = Large_time - повільний поїзд із великою затримкою;
27) Якщо Speed = Low_speed & Delay = Long_delay & TransitTime = Long, ТО ClosingTime = Very_large_time - найгірша комбінація: усі три фактори максимально несприятливі, що означає максимальний час закриття переїзду.

Повне покриття простору входів гарантує, що для будь-якої комбінації виміряних параметрів існує визначене правило, тобто система не має «прогалин» і завжди формує детермінований вихід. Структура правил є монотонною, а саме час закриття зростає зі зниженням швидкості, збільшенням затримки та подовженням часу проходження, що відповідає фізиці процесу й виключає суперечливі рішення.

Для перевірки працездатності моделювання в MATLAB було зроблено 3 тестові набори сценаріїв:

a) Сценарій №1 найгірший, оскільки час, на який буде закрито переїзд, буде становити 18,4 хвилини, всі фактори тут найнесприятливіші водночас, а саме за низькою швидкістю руху 30 км/год поїзд найдовше перебуває в зоні, значна затримка відносно графіка 9 хвилин змушує систему резервувати максимальний запас часу, а тривалість проходження контрольних ділянок становить - 216 секунд (1800 м за швидкості 30 км/год), і це додатково подовжує закриття (рис.В.7);
b) Сценарій №2 найкращий, оскільки час, на який буде закрито переїзд, буде становити 1,24 хвилини, бо всі фактори найсприятливіші, а саме висока швидкість руху поїзда 110 км/год означає миттєвість звільнення зон, затримки немає, і мінімальний час проходження ділянок 58 секунд (рис.В.8);

c) Сценарій №3 типовий, оскільки час, на який буде закрито переїзд, буде становити 9,61 хвилини, бо всі параметри системи знаходяться у середніх термах, а саме помірна швидкість руху 60 км/год - характерна для приміських поїздів, помірна затримка 5 хв і середній час проходження контрольних ділянок 108 секунд (рис.В.9).

3.4 Фізична модель системи

Фізична модель системи ARCCS будується за ієрархічною організацією, у якій функції збору, обробки та використання даних розподілена між трьома групами апаратних вузлів, об'єднаних єдиною дротовою мережею Ethernet: центральним вузлом на базі персонального комп'ютера, обчислювальними вузлами сенсорів LiDAR та виконавчими вузлами на базі мікроконтролерів ESP32. Загальну топологію наведено на рис. 4.1, а перелік апаратних компонентів - у табл. 3.6.

Центральним вузлом системи є персональний комп'ютер автоматизованого робочого місця чергового. Він виконує роль панелі спостереження за станом переїздів і забезпечує можливість ручного втручання в керування, а також може виконувати обробку хмари точок LiDAR. Усі інші компоненти системи з'єднуються з комп'ютером дротовим інтерфейсом Ethernet.

Кожен сенсор LiDAR Cepton Vista-P90 підключається до окремого крайового вузла. Передбачено реалізацію на базі Raspberry Pi 5 із локальною обробкою хмари точок та передачею результатів (виявлення поїзда і швидкість) на ESP32.

Виконавчий рівень реалізовано на мікроконтролері ESP32, установленому поблизу залізничного переїзду для керування переїзною сигналізацією та шлагбаумами. Оскільки ESP32 не має готового інтерфейсу Ethernet (вбудованими є лише модулі Wi-Fi та Bluetooth), для його під'єднання до мережі застосовується додатковий модуль-адаптер Ethernet (наприклад, SPI-контролер W5500 або PHY-мікросхема LAN8720). Керування виконавчими пристроями

здійснюється сигналами цифрових виходів (GPIO) та широтно-імпульсної модуляції (PWM). Для контролю фактичного спрацювання обладнання застосовується датчик струму ACS712, увімкнений у силові кола приводу шлагбаума та світлової сигналізації.

Окремо враховано, що напруга в мережі живлення залізничного обладнання не збігається з рівнями напруги, допустимими для Raspberry Pi 5 чи ESP32. Тому для під'єднання живлення кожного вузла застосовуються відповідні адаптери живлення, що формують стабілізовані рівні 5 В та 3,3 В. [13, 14]. Детальніше у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Компоненти апаратного забезпечення прототипу ARCCS

Назва компоненту	Пояснення призначення
APM on Duty	Центральний вузол: панель спостереження та ручного втручання в керування, обробка хмари точок LiDAR
LiDAR Sensor	Оптико-електронний далекомір, що сканує зони наближення та віддалення переїзду й формує хмару точок для виявлення поїзда та оцінювання його швидкості
Raspberry Pi 5	Одноплатний комп'ютер із вбудованими інтерфейсами Ethernet; виконує обробку хмари точок поблизу сенсора та передає результати - виявлення поїзда й оцінену швидкість
ESP32	Мікроконтролер керування переїздом: приймає результати обробки, формує сигнали для шлагбаума й сигналізації, зчитує датчик струму. Обробки хмари точок не виконує
ACS712	Вимірювальний модуль на ефекті Холла з гальванічною розв'язкою; формує аналоговий сигнал 0-5 В, пропорційний струму в силових колах сигналізації та приводу шлагбаума
Power Supply Unit	Блок живлення, що формує необхідні стабілізовані рівні напруги, узгоджуючи їх із напругою мережі живлення залізниці
Barrier Actuator	Електромеханічний привід стріли шлагбаума, що керується ESP32
Light Signaling	Світлофорні червоні миготливі ліхтарі для автотранспорту, встановлені з обох сторін переїзду

На діаграмі розгортання (рис. А.2) показано взаємодію апаратних компонентів прототипу ARCCS, де є такі зв'язки:

1) Суцільні лінії з підписами протоколів зв'язку позначають інформаційні (керуючі та комунікаційні) канали між компонентами системи, через лінії передаються цифрові дані, керуючі сигнали та результати вимірювань;

2) Пунктирні лінії від Power Supply Unit позначають лінії електричного живлення, по яких подається напруга до всіх компонентів системи;

Пунктирні лінії силових кіл, що проходять через ACS712 позначають замкнуті силові кола виконавчих пристроїв (привід шлагбаума та світлова сигналізація), які фізично проходять через датчик струму ACS712, оскільки ACS712 виконує функцію верифікації спрацювання обладнання.

Deployment Diagram наведена на рис.А.2.

4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ПРОТОТИП СИСТЕМИ

4.1 Топологія та компоненти апаратної частини прототипу системи

У підрозділі 4.1 конкретизовано фізичну реалізацію прототипу системи ARCCS, архітектуру якого на концептуальному рівні представлено діаграмою розгортання UML (рис. А.2) та узагальнено в табл. 3.6. На відміну від діаграми розгортання, що відображає логічні зв’язки між компонентами та протоколи взаємодії, тут основну увагу приділено фізичній топології та реальній організації апаратних з’єднань. Загальну розподілену архітектуру прототипу, яка охоплює апаратний і програмний рівні, наведено на рис. 4.1.

Розроблений прототип реалізує лише окрему складову проєктованої інформаційної технології, мета якої - заміщення традиційних релейно-контактних кіл керування переїзною сигналізацією сучасними апаратно-програмними засобами збору, обробки даних і прийняття рішень. На рис. 4.1 виділено три рівні: центральний вузол на базі персонального комп’ютера; крайові обчислювальні вузли сенсорів LiDAR; виконавчі вузли на базі ESP32, що безпосередньо керують обладнанням переїзду. Усі рівні об’єднано дротовою мережею Ethernet.

Сенсор Cepton Vista-P90 виводить дані через інтерфейс Cepton, від якого штатний кабель-пігтейл розгалужується на двопровідний джгут живлення (червоний +12 В, чорний GND) і стандартний роз’єм RJ45 Ethernet, тому самостійне розпаювання рознімача не потрібне. Протокол передавання даних специфіковано в документі Cepton Sensor Communication Specifications [17]:

a) Дані передаються UDP-пакетами по IPv4 на порт 8808 (за замовчуванням broadcast 255.255.255.255);
b) Структура пакета містить 24-байтний заголовок із сигнатурою STDV та до 144 точок по 10 байт;
c) Структура точки: X (int16), Y (uint16), Z (int16) у кроках 0,5 см; reflectivity (uint8); відносний час (uint8); laser_id (uint8); прапори (uint8);

d) Орієнтація: X - вліво/вправо, Y - вперед, Z - вниз/вгору;
e) INFO-пакети 2 рази на секунду (стан, температура, версія прошивки).

Принципово важливо, що обробка хмари точок виконується не на виконавчому мікроконтролері ESP32, а на більш потужнішому вузлі - крайовому одноплатному комп'ютері Raspberry Pi 5 або на персональному комп'ютері. Декодування сирого UDP-потоку (прослуховування порту 8808, перевірка сигнатури STDV у заголовку, ітерація по масиву точок і масштабування координат множенням на 0,005 для отримання метричних значень) реалізується засобами комплекту розробника cepton_sdk, а для візуального контролю потоку на етапі пусконалагодження застосовується програмне середовище CeptonViewer [18].

Передбачено варіант організації вузла, який відрізняється розподілом обчислювального навантаження. Кожен сенсор LiDAR обслуговує Raspberry Pi 5, що локально обробляє хмару точок і передає в мережу лише компактні результати - подію виявлення та оцінену швидкість поїзда; це зменшує навантаження на магістральний канал і затримку доставлення результатів до виконавчого вузла.

Алгоритм фільтрації та обробки хмари точок, що виконується на Raspberry Pi 5 або на персональному комп'ютері, складається щонайменше з кількох послідовних етапів:

1) Виділення області інтересу (ROI) у геометричних межах колії за координатами X (бічне зміщення) та Y (поздовжня відстань від сенсора);
2) Відсікання точок підстилаючої поверхні через RANSAC-апроксимацію площини землі або фіксований поріг за координатою Z;
3) Відкидання шумових точок із прапорами Noise/Saturated/Blocked у заголовку Cepton;
4) Тимчасова фільтрація через ковзне середнє по кількох послідовних кадрах для усунення хибних спрацювань від снігу, дощу чи комах;

5) Кластеризація груп точок у дискретні об’єкти з оцінюванням їхньої траєкторії та швидкості за різницею координат між кадрами.

Обчислювальна складність цих етапів і потреба буферизації кількох кадрів визначають вимоги до продуктивності крайового вузла; саме тому обробку винесено на Raspberry Pi 5 або персональний комп’ютер, а не на ESP32, обчислювальних ресурсів якого для цього недостатньо.

Виконавчий вузол на базі ESP32 під’єднується до мережі через адаптер Ethernet (W5500 або LAN8720), приймає результати обробки й команди та формує керуючі сигнали для приводу шлагбаума й світлової сигналізації через виходи GPIO та канали PWM. Контроль фактичного спрацювання здійснює датчик струму ACS712. Оскільки рівні напруги мережі живлення залізничного обладнання не відповідають допустимим для Raspberry Pi 5 та ESP32, живлення вузлів забезпечується окремими адаптерами-перетворювачами, що формують стабілізовані 5 В та 3,3 В.

Передавання даних від крайових вузлів LiDAR до персонального комп’ютера або до виконавчого ESP32 бездротовими каналами є неможливим через обмежену дальність: радіус дії Wi-Fi не перевищує 100 м, а Bluetooth - 10 м, тоді як відстань між суміжними переїздами А та Б становить близько 5-6 км. З огляду на це обмін даними в системі побудовано на дротовому з’єднанні Ethernet. У межах одного переїзду вузли об’єднуються короткими сегментами «мідної» витої пари, а магістральне з’єднання ділянки А-Б, що перевищує граничну довжину сегмента 100 м, реалізується волоконно-оптичними лініями або через проміжні комутатори. Оптичне з’єднання додатково забезпечує несприйнятливість каналу до електромагнітних завад тягового струму, що є суттєвою перевагою в умовах залізниці.

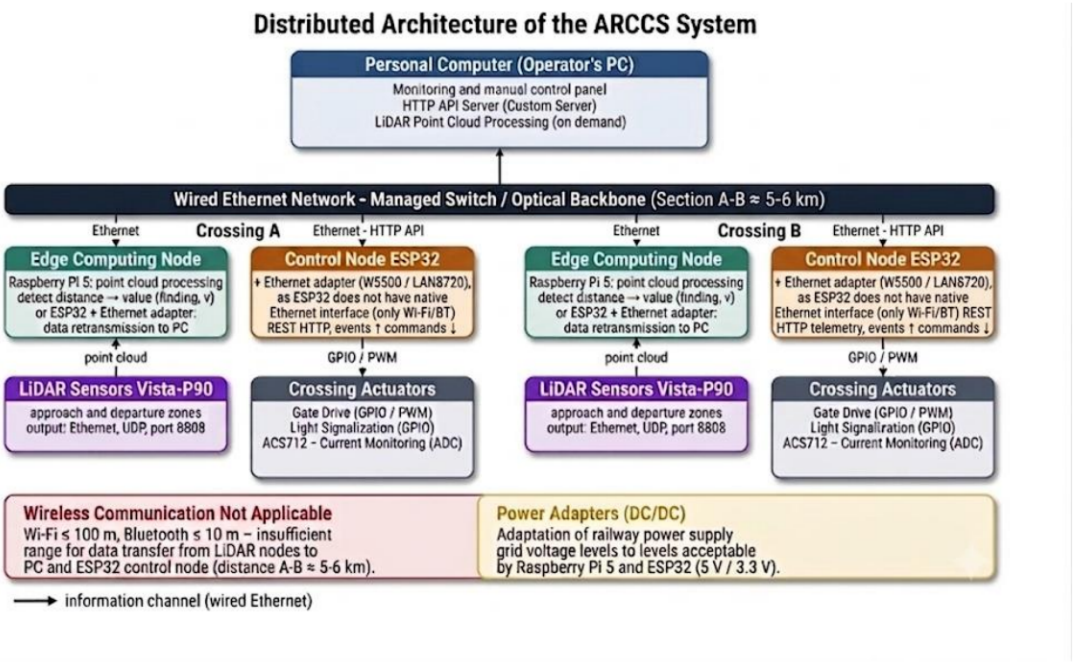


Рисунок 4.1 - Розподілена архітектура системи [13]

На рис.Г.1 та рис.Г.2 наведено макетну реалізацію спрощеного фрагмента апаратної частини прототипу системи ARCCS, виконану в середовищі Fritzing. Схема демонструє ключовий принцип взаємодії центрального мікроконтролера ESP32 з датчиком струму ACS712 та імітатором виконавчого пристрою - електродвигуном постійного струму, що моделює привід шлагбаума. Світлодіод із струмообмежувальним резистором імітує одну секцію червоної миготливої сигналізації переїзду. Живлення силового кола здійснюється від батарейного блоку з двох елементів АА, що замінює стабілізований блок живлення.

4.2 Архітектура та компоненти програмної частини прототипу системи

Прототип системи ARCCS реалізовано за розподіленою архітектурою, у якій програмні компоненти виконуються на різних обчислювальних пристроях - персональному комп’ютері, одноплатному комп’ютері Raspberry Pi 5 та мікроконтролері ESP32. Взаємодія між компонентами здійснюється через локальну мережу за допомогою стандартизованих мережевих протоколів обміну даними. Розподіл програмних компонентів за обчислювальними пристроями та їх місце у загальній структурі системи наведено на рис. 4.1.

Архітектура системи характеризується розподілом функцій між окремими вузлами, що забезпечує незалежність програмних модулів, можливість їх окремого оновлення та масштабування. Кожен компонент виконує визначений набір функцій і взаємодіє з іншими компонентами через мережевий інтерфейс.

Під компонентом програмної частини прототипу системи розуміється окремий програмний модуль, встановлений на одному з обчислювальних пристроїв системи. У складі прототипу виділено такі компоненти:

a) Модуль обробки хмари точок, встановлений на крайовому вузлі Raspberry Pi 5. Компонент забезпечує отримання даних від LiDAR-сенсора Cepton Vista-P90, декодування потоку точок із використанням бібліотеки cepton_sdk, попередню фільтрацію та кластеризацію просторових даних. Результатом роботи модуля є визначення факту виявлення поїзда, оцінювання його швидкості та формування керуючих параметрів для системи керування переїздом;
b) Автоматизоване робоче місце чергового (Operator_Client), розгорнуте на персональному комп’ютері. Компонент забезпечує відображення поточного стану переїзду, отримання інформації про рух поїзда, стан виконавчих пристроїв та можливість формування команд ручного керування;
c) Модуль керування переїздом, установлений на виконавчому ESP32 - відповідає за приймання команд керування, виконання алгоритму роботи світлової сигналізації та шлагбаума, контроль стану виконавчих механізмів, зчитування даних із датчика струму ACS712 та формування вихідних сигналів GPIO/PWM для керування обладнанням.

Обмін даними між компонентами системи здійснюється через локальну мережу з використанням прямих мережевих з’єднань між програмними модулями. Кожен компонент передає та отримує дані відповідно до визначених функцій без використання додаткового проміжного вузла маршрутизації. Модуль обробки LiDAR передає результати аналізу просторових даних до

модуля керування переїздом ESP32, який на основі отриманої інформації виконує процедури закриття або відкриття переїзду. ESP32, у свою чергу, передає інформацію про поточний стан виконавчих пристроїв та діагностичні параметри до автоматизованого робочого місця чергового.

На рівні програмної взаємодії використовується модель обміну повідомленнями між клієнтськими компонентами системи. Передача даних організована через структуровані повідомлення, які містять інформацію про тип події, часову мітку, параметри руху поїзда та стан обладнання. Такий підхід дозволяє забезпечити узгоджену роботу розподілених компонентів без використання додаткового проміжного вузла маршрутизації.

На персональному комп'ютері реалізовано функції автоматизованого робочого місця чергового та логіки обробки службових повідомлень системи. Компонент Operator_Client отримує результати роботи LiDAR-модуля, відображає поточний стан переїзду та формує команди ручного керування у разі необхідності втручання оператора.

Взаємодію між програмними компонентами прототипу ARCCS наведено на рис. 4.2. На схемі показано потоки даних між LiDAR-модулем на Raspberry Pi 5, програмним інтерфейсом чергового Operator_Client та модулем ESP32.

Згенерований за допомогою Gemini рисунок 4.2, відображає архітектуру системи.

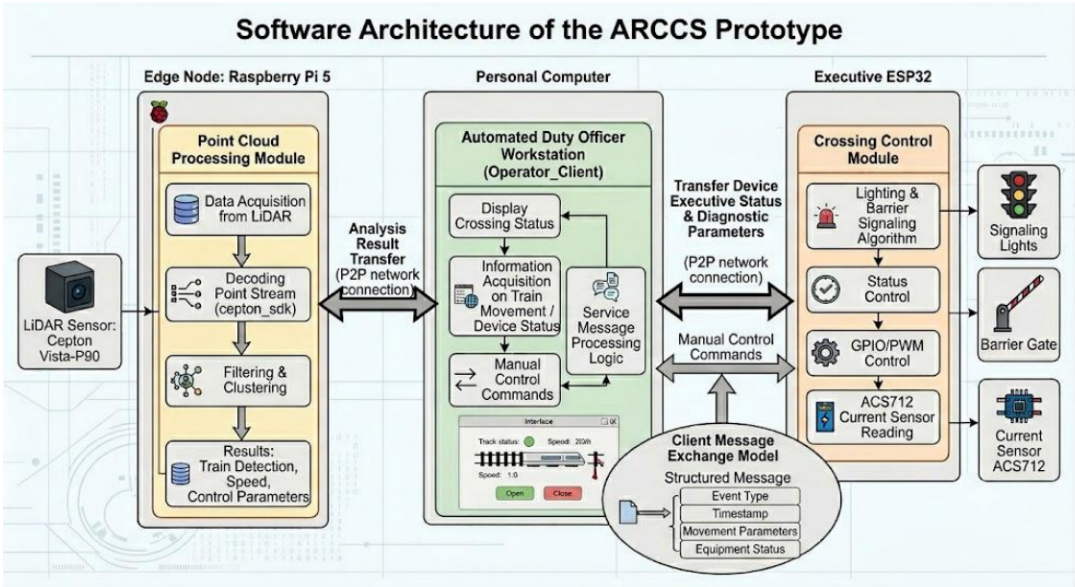


Рисунок 4.2 - Архітектура прототипу системи ARCCS [13]

4.3 Опис даних та бібліотек підтримки компонентів системи

Прототип системи ARCCS оперує даними різних типів: оптико-електронного сканування, які надходять від LiDAR сенсора Cepton Vista-P90, та електричними вимірюваннями струму, що формує датчик ACS712.

Узагальнений перелік даних, які прототип отримує від обладнання, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Дані, які прототип системи отримує від обладнання

Обладнання	Дані / параметр	Формат	Призначення
Лідар Vista-P90	Хмара точок (координати X, Y, Z)	UDP, порт 8808; int16/uint16, крок 0,5 см	Виявлення поїзда та швидкості
Лідар Vista-P90	Інтенсивність відбиття, прапори точки	uint8	Фільтрація шумів, оцінка якості сигналу
Лідар Vista-P90	INFO-телеметрія (стан, t°, версія прошивки)	службові пакети, 2 Гц	Контроль працездатності сенсора
Датчик ACS712	Струм у силових колах	аналоговий сигнал у діапазоні 0-5 В код АЦП 0-4095	Верифікація спрацювання, виявлення відмов

Основним джерелом вхідних даних є тривимірне сканування, що надходить від сенсора LiDAR Vista-P90. Принципово важливо, що сенсор не повідомляє готового результату - де саме перебуває об’єкт і з якою швидкістю він рухається; натомість сенсор передає так звану сиру хмару точок, тобто великий набір окремих точок простору, які він «бачить» лазерним променем. Виявлення поїзда та визначення його швидкості виконується пізніше програмними засобами на крайовому вузлі або на персональному комп’ютері. Спосіб передавання описано в технічній документації виробника - Cepton Sensor Communication Specifications [17].

Дані передаються невеликими порціями - UDP-пакетами протоколу IPv4 на визначений мережевий порт 8808. Кожен пакет складається з двох частин -

24-байтного заголовка та масиву точок. Заголовок починається зі службової мітки-сигнатури STDV, за якою приймальний вузол розпізнає, що отримав «свій» пакет саме від сенсора LiDAR, а не сторонні дані. Після заголовка розміщується масив із не більш ніж 144 точок, де кожна точка займає 10 байт. Детальну побудову пакета, призначення та розмір кожного поля наведено в табл. 4.2, складеній на основі [13, 14, 17, 18].

Таблиця 4.2 - Структура UDP-пакета точок лідара Vista-P90

Поле	Розмір	Тип	Призначення
Signature	4 байти	char[4]	Сигнатура «STDV», за якою ESP32 ідентифікує пакет
Version	1 байт	uint8	Версія протоколу передачі даних
Reserved	3 байти	-	Зарезервовано
Timestamp	8 байт	uint64	Час формування пакета, мкс
Serial number	4 байти	uint32	Серійний номер лідара
Points count (N)	2 байти	uint16	Кількість точок у пакеті, до 144
Reserved	2 байти	-	Зарезервовано
X	2 байти × N	int16	Поперечна координата, крок 0,5 см
Y	2 байти × N	uint16	Поздовжня дальність, крок 0,5 см
Z	2 байти × N	int16	Висотна координата, крок 0,5 см
Reflectivity	1 байт × N	uint8	Коефіцієнт відбиття поверхні (0-255)
Relative time	1 байт × N	uint8	Відносний час знімання точки в межах кадру
Laser id	1 байт × N	uint8	Ідентифікатор лазерного променю
Flags	1 байт × N	uint8	Прапорці Valid / Noise / Saturated / Blocked

Координати X, Y, Z передаються в цілочисельному форматі з кроком квантування 0,5 см, тому для отримання метричних значень кожну координату масштабують множенням на коефіцієнт 0,005. Окрім потоку точок, сенсор двічі на секунду надсилає службові INFO-пакети з відомостями про власний стан, температуру та версію прошивки. У результаті обробки отримуються похідні дані - факт виявлення поїзда та його швидкість, які обчислюються на основі зміни координат кластера між послідовними кадрами.

Для підтримки роботи сенсорів і компонентів прототипу використовуються програмні бібліотеки та засоби наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Бібліотеки підтримки компонентів прототипу ARCCS

Бібліотека	Призначення
cepton_sdk	Декодування UDP-пакетів Vista-P90 та доступ до хмари точок
CeptonViewer	3D-візуалізація хмари точок під час пусконалагодження
Ethernet (W5500, LAN8720)	Мережевий стек, відкриття з'єднань через адаптер Ethernet
analogRead (ACS712)	Зчитування АЦП та обчислення струму за формулою (4.1)

Дані від датчика струму ACS712 опрацьовуються на виконавчому ESP32: аналоговий сигнал датчика подається на 12-бітний АЦП (0-4095 відліків), а перерахунок у струм I (A) виконується за формулою (4.1):

$$I = \frac{V_{out} - \frac{V_{cc}}{2}}{S}, \quad (4.1)$$

де Vout - напруга на виході ACS712, В;

Vcc/2 - напруга зміщення нуля;

S - чутливість (0,185 В/А для ACS712-5A, 0,100 В/А для 20A, 0,066 В/А для 30A).

Датчик ACS712 у силовому колі застосовується для моніторингу справності обладнання на основі вимірювання струму навантаження. Для приводу шлагбаума у стані OFF струм має дорівнювати 0 А, а його перевищення понад 0,1 А свідчить про несправність; у стані ON робочий струм становить 0,8-2,0 А, а перевищення 3 А вказує на заклинювання механізму. Для сигнальних ліхтарів у стані OFF струм не повинен перевищувати 0,05 А, а в стані ON фіксуються пульсації 0,2-0,5 А з частотою близько 1 Гц [13, 14].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано проєктування автоматизованої системи керування залізничним переїздом із використанням технології LiDAR. Завдання роботи полягало у формуванні концептуальної, логічної та фізичної моделей системи, моделюванні за визначеними сценаріями у вигляді нечіткої когнітивної карти та нечіткої логічної системи, а також розробці апаратно-програмного прототипу для визначення часу закриття переїзду Б з урахуванням умов руху поїзда від переїзду А до моменту повного звільнення переїзду Б.

Побудовано нечітку логічну систему за алгоритмом Mamdani у середовищі MATLAB із використанням Fuzzy Logic Toolbox. Модель містить три вхідні змінні (Speed, Delay, TransitTime) та одну вихідну змінну (ClosingTime), а також базу з 27 нечітких правил. Розроблена система дозволяє проводити експериментальні дослідження впливу різних факторів на тривалість закриття переїзду, протягом якого активуються світлова сигналізація та шлагбауми перебувають у закритому стані. Отримані результати можуть бути використані для подальшого уточнення алгоритмів керування окремими підсистемами.

Виконано аналіз предметної області та огляд сучасних підходів до вирішення задачі, на основі якого обґрунтовано доцільність застосування LiDAR Cepton Vista-P90 у зонах наближення та віддалення двох послідовних переїздів А і Б з реалізацією випереджального керування переїздом Б на основі даних, отриманих із переїзду А.

Частини роботи, зокрема підрозділи 4.1-4.3, а також окремі фрагменти розділів 2 і 3, були підготовлені із застосуванням інструментів штучного інтелекту (Gemini та Claude) для генерації та структуризації текстових матеріалів, а також пошуку довідкової інформації щодо LiDAR Cepton Vista-P90 і компанії Cepton. Усі отримані дані були проаналізовані, звірені з першоджерелами технічної документації та за необхідності скориговані здобувачем.

Частина рішень у роботі представлена на концептуальному рівні та потребує подальшого уточнення. Зокрема, обробка хмари точок описана на рівні використання UDP-передачі та бібліотеки cepton_sdk без повної програмної реалізації на граничному вузлі. Алгоритми фільтрації подані концептуально без детального оцінювання обчислювального навантаження на Raspberry Pi 5. Прототип ARCCS реалізовано за розподіленою мережевою архітектурою, у якій програмні компоненти виконуються на різних пристроях (Raspberry Pi 5, ESP32 та ПК) і взаємодіють між собою через локальну мережу шляхом обміну даними між вузлами системи.

Подальший розвиток системи передбачає реалізацію повноцінного алгоритму обробки хмари точок LiDAR Vista-P90 на граничному вузлі Raspberry Pi 5 із виділенням області інтересу (ROI), застосуванням RANSAC, часової фільтрації та кластеризації об’єктів.

Перспективним напрямом є вдосконалення логіки керування шлагбаумом шляхом введення проміжного стану «у русі», що підвищить точність відображення поточного стану переїзду та загальну інформативність системи моніторингу.

Доцільним є також розширення апаратного прототипу до повної конфігурації двох переїздів А і Б із використанням чотирьох LiDAR-сенсорів для практичної перевірки алгоритму випереджального керування переїздом Б на основі даних з переїзду А.

Додатковим напрямом удосконалення є розширення нечіткої когнітивної моделі шляхом введення нових концептів, пов’язаних із динамікою руху поїздів, що дозволить підвищити точність оцінювання тривалості закриття переїзду та покращити аналітичні можливості моделі.

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.
3) Today and History. URL: https://www.uz.gov.ua/en/about/general_information/history/ (Last accessed: 30.05.2026).
4) А. Б. Бойнік, С. В. Кошевий, О. А. Абакумов. Автоматична переїзна сигналізація: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Системи автоматики на перегонах». Харків: УкрДУЗТ, 2012. - 62 с. URL: http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/5393 (Дата звернення 21.05.2026)
5) Golder A. et al. Automated Railway Crossing System: A Secure and Resilient Approach. URL: https://doi.org/10.36227/techrxiv.23939685.v1 (Last accessed: 30.05.2026)
6) Kulkarni S., Patange V., Pawar B. Railway Gate Automation System Using Lidar Technology. URL: https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24NOV207 (Last accessed: 15.06.2026)
7) Belam and Cepton Establish Partnership to Enable Safety at High-traffic Railway Level Crossings URL: https://www.cepton.com/announcements/belam-and-cepton-establish-partnership-to-enable-safety-at-high-traffic-railway-level-crossings (Last accessed: 21.05.2026).
8) Wisultschew Cr. et al. 3D-LIDAR Based Object Detection and Tracking on the Edge of IoT for Railway Level Crossing. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062220 (Last accessed: 21.05.2026).

9) LiDAR Solutions for Rail Safety. Neuvition Inc. URL: https://www.neuvition.com/media/lidar-solutions-for-rail-safety.html (Last accessed: 21.05.2026).
10) Zawodny M. et al. A New Form of Train Detection as a Solution to Improve Level Crossing Closing Time. URL: https://doi.org/10.3390/s23146619 (Last accessed: 21.05.2026).
11) LIDAR sensors Cepton's Vista-P60/P90. URL: https://www.top-electronics.com/public/attachments/Medewerkers%20TOP%20NL%20-%2081%20afbeeldingen/DATASHEETS/Cepton/Vista-Edge-product-brief_0904.pdf (Last accessed: 30.05.2026).
12) Dias S. et al. Deterministic Light Detection and Ranging (LiDAR)-Based Obstacle Detection in Railways Using Data Fusion. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/6/3118 (Last accessed: 21.05.2026).
13) Gemini. URL: https://gemini.google.com/app?hl=ua (Last accessed: 21.05.2026).
14) Claude ai. URL: https://claude.ai/ (Last accessed: 21.05.2026).
15) Окольничий К. Розумна система керування освітленням у тунелі. Тези 85-й студентської науково-технічної конференції .СНТК-2025, с.121-123. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/tezi-sntk-85_2025.pdf (Дата звернення: 27.05.2026)
16) Sivanandam S., Sumathi S. and Deepa S. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 441 p.
17) Cepton Sensor Communication Specifications. URL: https://developer.cepton.com/doc/data_format (Last accessed: 27.05.2026).
18) Cepton Viewer User Guide. URL: https://developer.cepton.com/doc/viewer_guide (Last accessed: 27.05.2026).
19) Visual paradigm. URL: https://www.visual-paradigm.com/ (Last accessed: 21.05.2026).
20) Fuzzy Cognitive Map. Mental Modeler. URL: https://www.mentalmodeler.com (Last accessed: 21.05.2026).

21) Welcome to MATLAB. URL: https://matlab.mathworks.com/ (Last accessed: 27.05.2026).
22) Fritzing. URL: https://fritzing.org/ (Last accessed: 27.05.2026).

ДОДАТОК А

ДІАГРАМИ UML

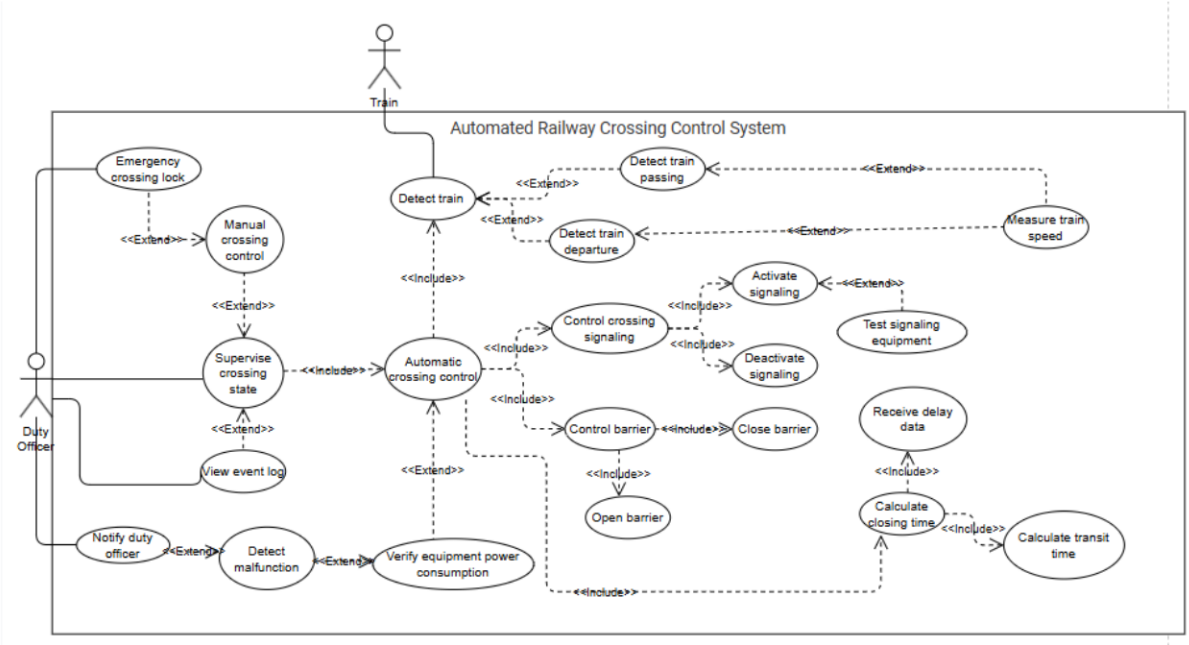


Рисунок А.1 - Use case Diagram ARCCS [19]

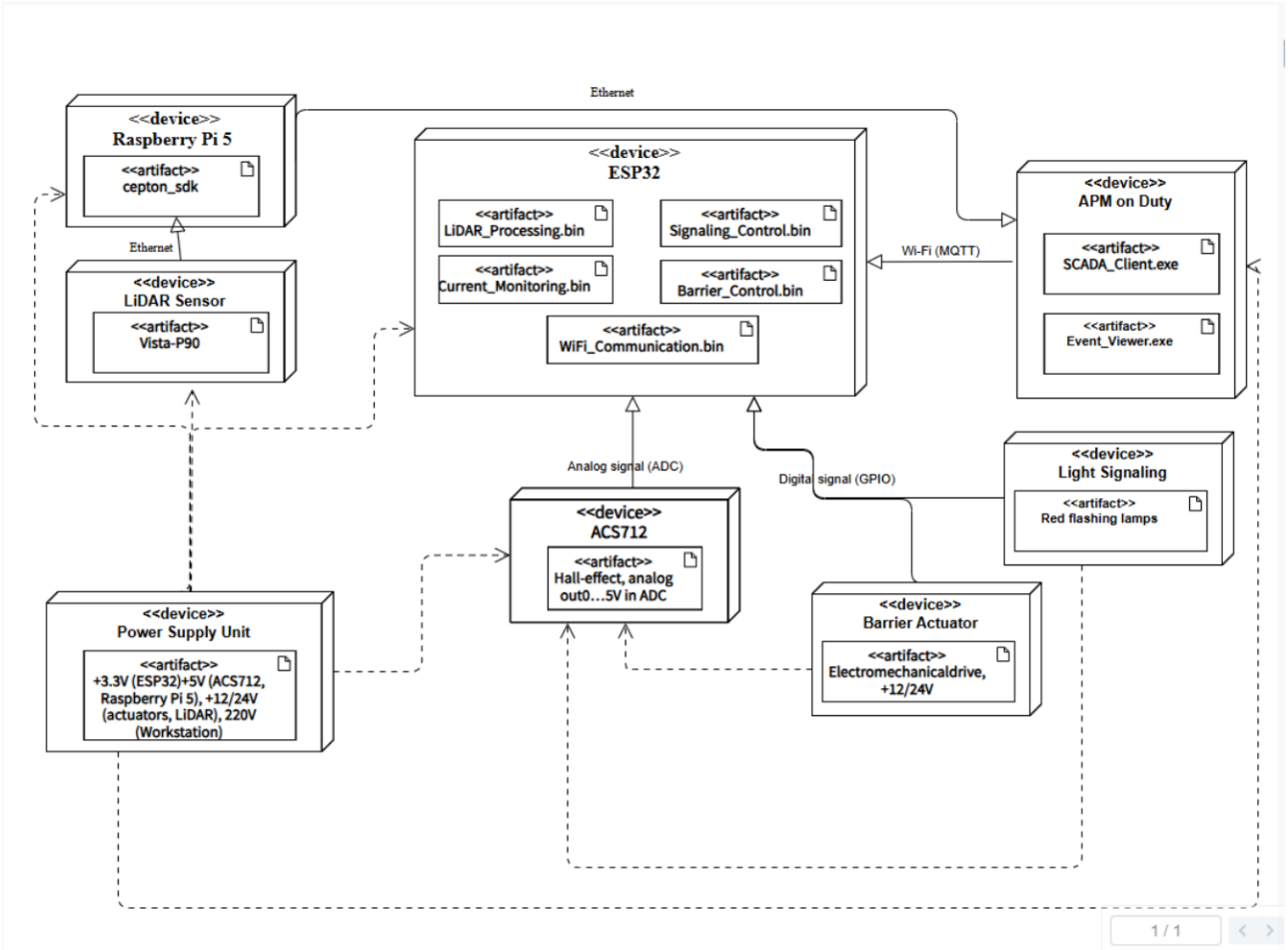


Рисунок А.2 - UML Deployment Diagram ARCCS [19]

ДОДАТОК Б

МОДЕЛЮВАННЯ В MENTAL MODELER

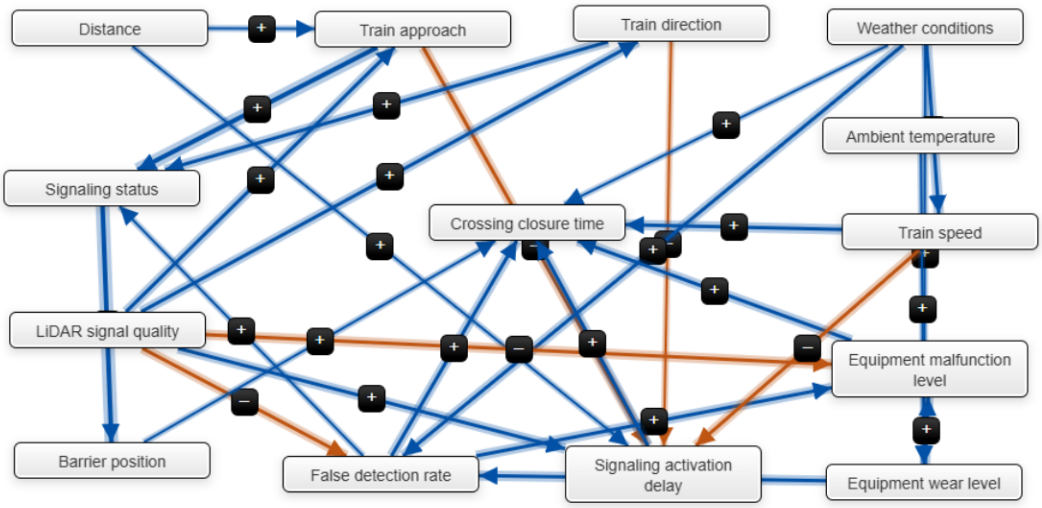


Рисунок Б.1 - FCM-схема ARCCS [20]

	Distance	Train approach	Train direction	Weather conditions	Ambient temperature	LiDAR signal quality	Signaling status	Barrier position	False detection rate	Signaling activation delay	Equipment wear level	Equipment malfunction level	Train speed	Crossing closure time
Distance		0.48								0.4				
Train approach							0.86			-0.53				
Train direction							0.61			-0.44				
Weather conditions									0.59		0.42		0.7	0.25
Ambient temperature											0.44			
LiDAR signal quality		0.83	0.73						-0.74	0.75		-0.64		
Signaling status								0.86						
Barrier position														0.45
False detection rate							0.39					0.68		0.5
Signaling activation delay														0.64
Equipment wear level									0.62			0.78		
Equipment malfunction level														0.72
Train speed										-0.69				0.61
Crossing closure time														

Рисунок Б.2 - Матриця зв’язків ARCCS [20]

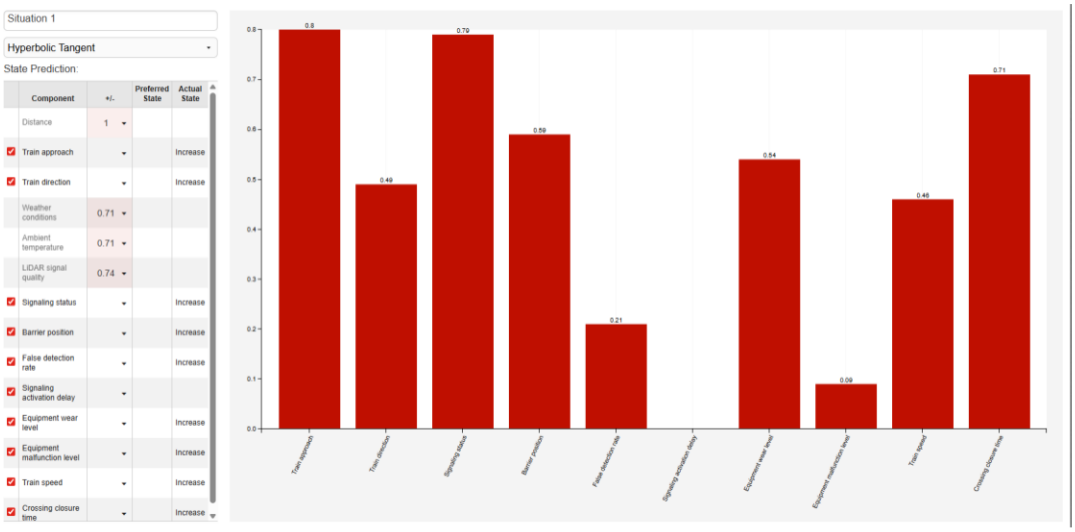


Рисунок Б.3 - Моделювання ситуації 1 (Hyperbolic Tangent Function) [20]

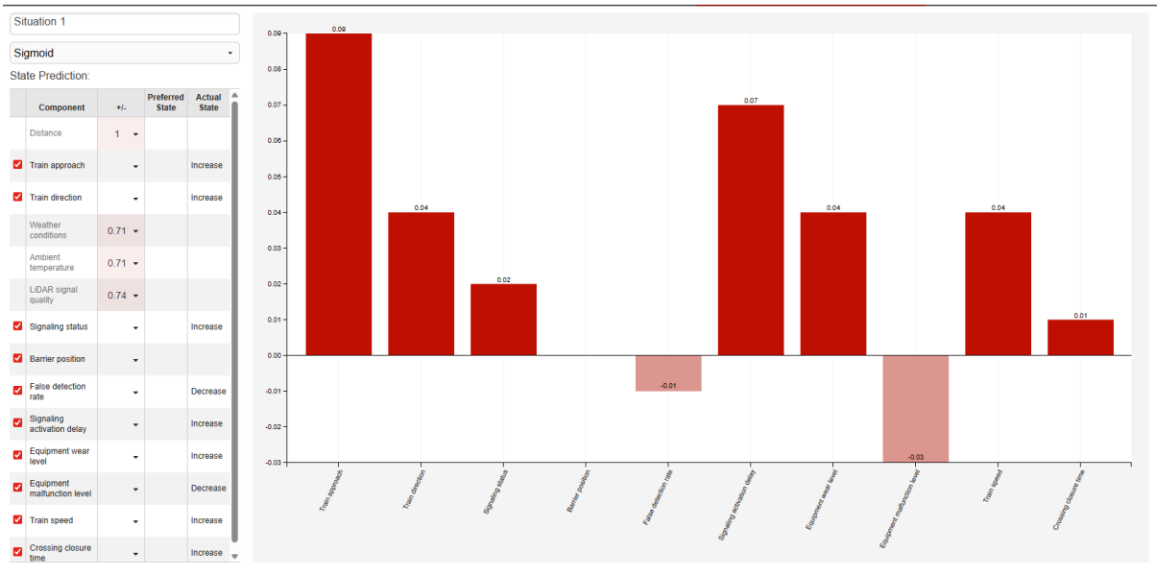


Рисунок Б.4 - Моделювання ситуації 1 (Sigmoid Function) [20]

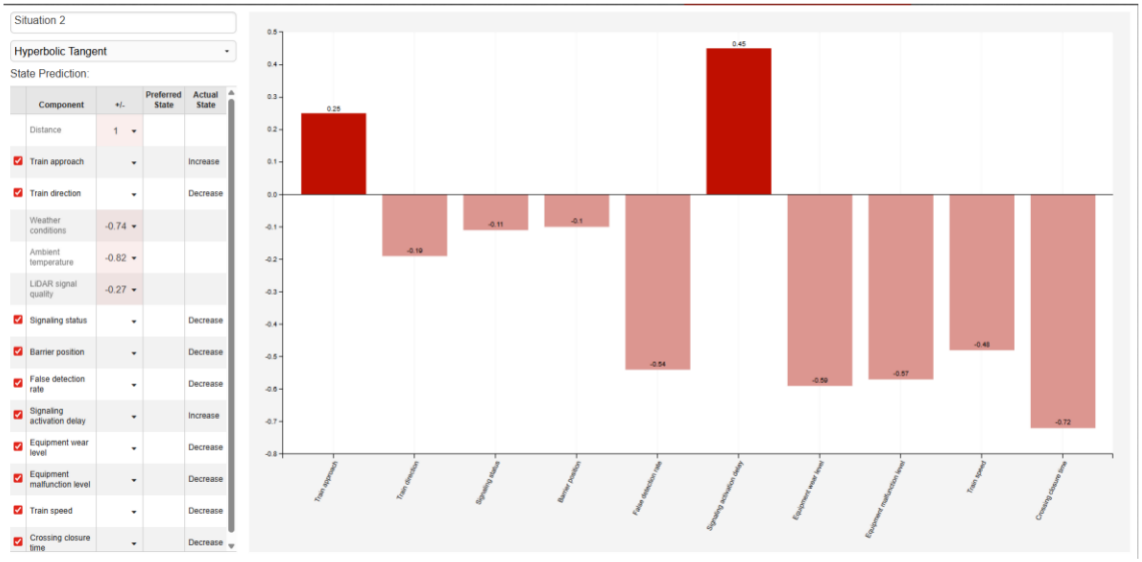


Рисунок Б.5 - Моделювання ситуації 2 (Hyperbolic Tangent Function) [20]

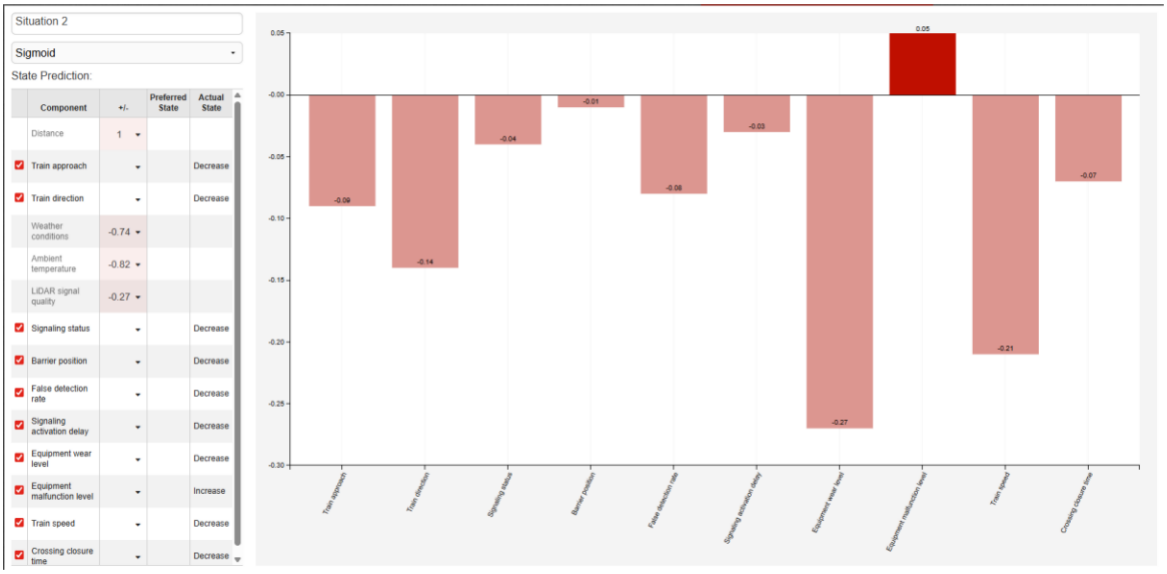


Рисунок Б.6 - Моделювання ситуації 2 (Sigmoid Function) [20]

Total Components	14
Total Connections	27
Density	0.1483516484
Connections per Component	1.9285714286
Number of Driver Components	4
Number of Receiver Components	1
Number of Ordinary Components	9
Complexity Score	0.25

Component	Indegree	Outdegree	Centrality	Preferred State	Type
Distance	0	0.88	0.88		driver
Train approach	1.31	1.3900000000000001	2.7		ordinary
Train direction	0.73	1.05	1.78		ordinary
Weather conditions	0	1.96	1.96		driver
Ambient temperature	0	0.44	0.44		driver
LiDAR signal quality	0	3.69	3.69		driver
Signaling status	1.8599999999999999	0.86	2.7199999999999998		ordinary
Barrier position	0.86	0.45	1.31		ordinary
False detection rate	1.9500000000000002	1.57	3.5200000000000005		ordinary
Signaling activation delay	2.81	0.64	3.45		ordinary
Equipment wear level	0.86	1.4	2.26		ordinary
Equipment malfunction level	2.1	0.72	2.8200000000000003		ordinary
Train speed	0.7	1.2999999999999998	1.9999999999999998		ordinary
Crossing closure time	3.1699999999999995	0	3.1699999999999995		receiver

Рисунок Б.7 - Матриця показників ARCCS FCM (вкладка Preferred State Metrics) [20]

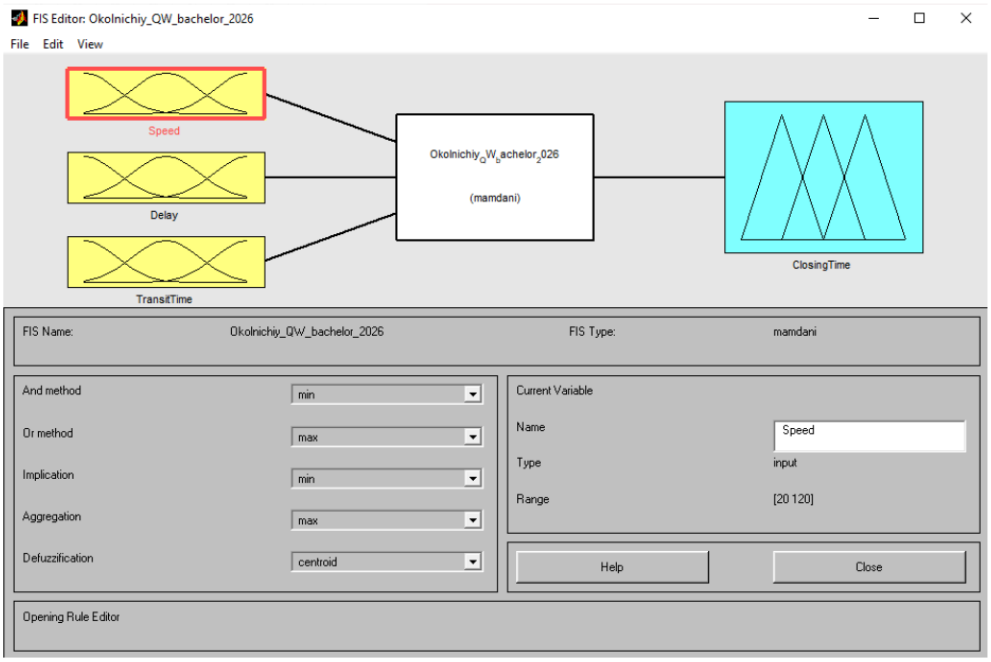


Рисунок В.1 - Basic FIS Editor [21]

Рисунок В.2 - Вхідна змінна Speed (терм Low_speed виділено) [21]

Рисунок В.3 - Вхідна змінна Delay (терм Short_delay виділено) [21]

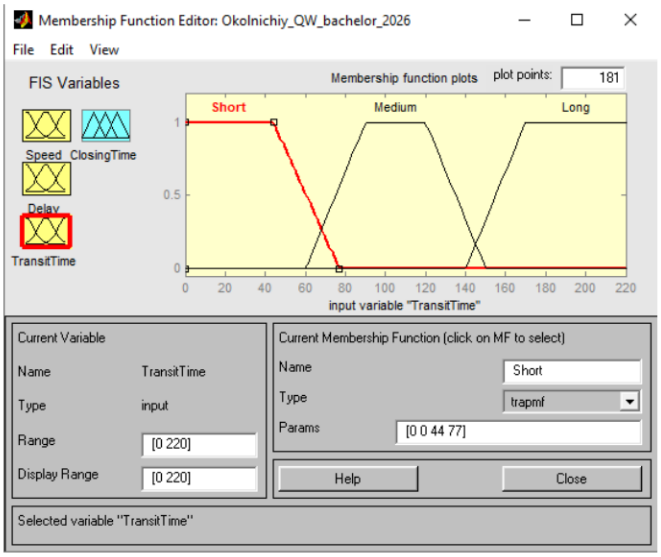


Рисунок В.4 - Вхідна змінна TransitTime (терм Short виділено) [21]

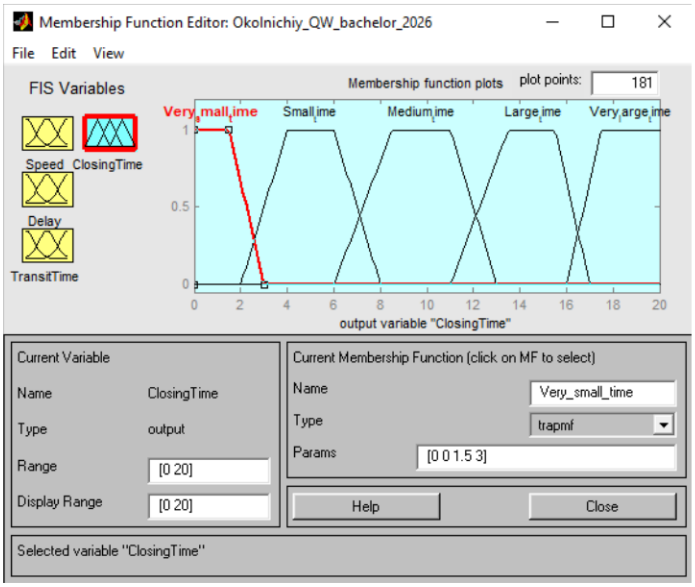


Рисунок В.5 - Вихідна змінна ClosingTime (терм Very_small_time виділено) [21]

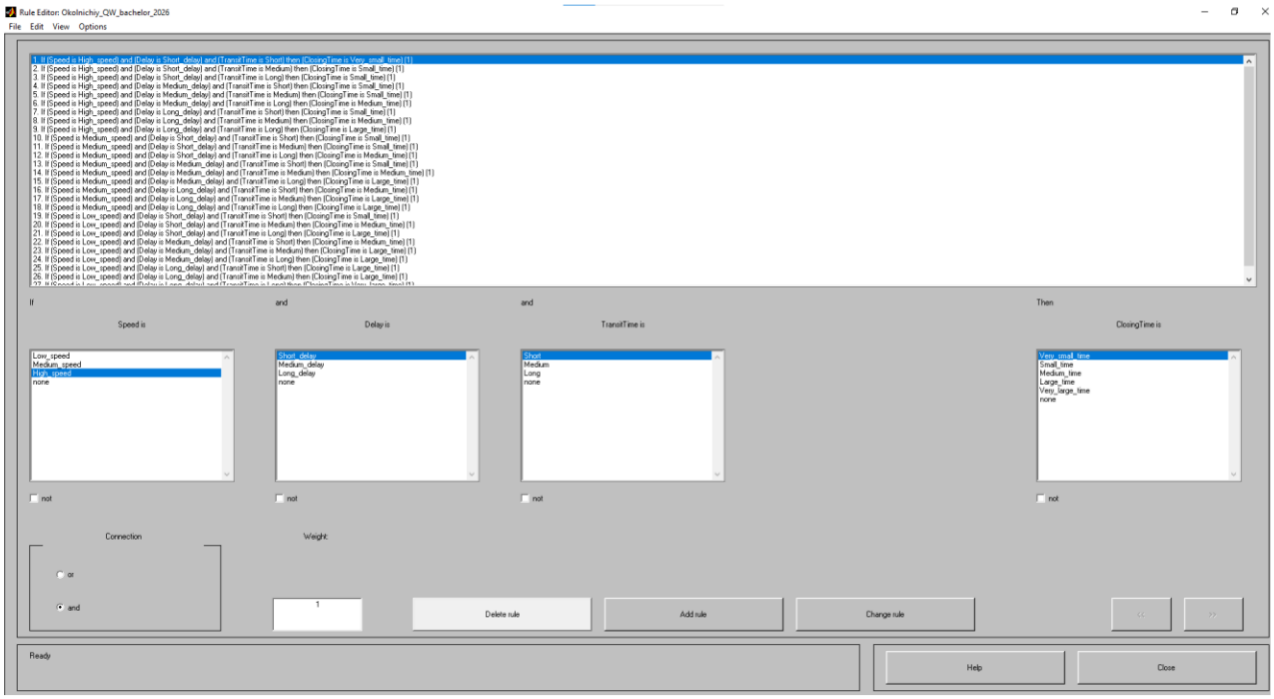


Рисунок B.6 - Rule editor [21]

Рисунок B.7 -Rule viewer сценарій №1 [21]

Рисунок В.8 -Rule viewer сценарій №2 [21]

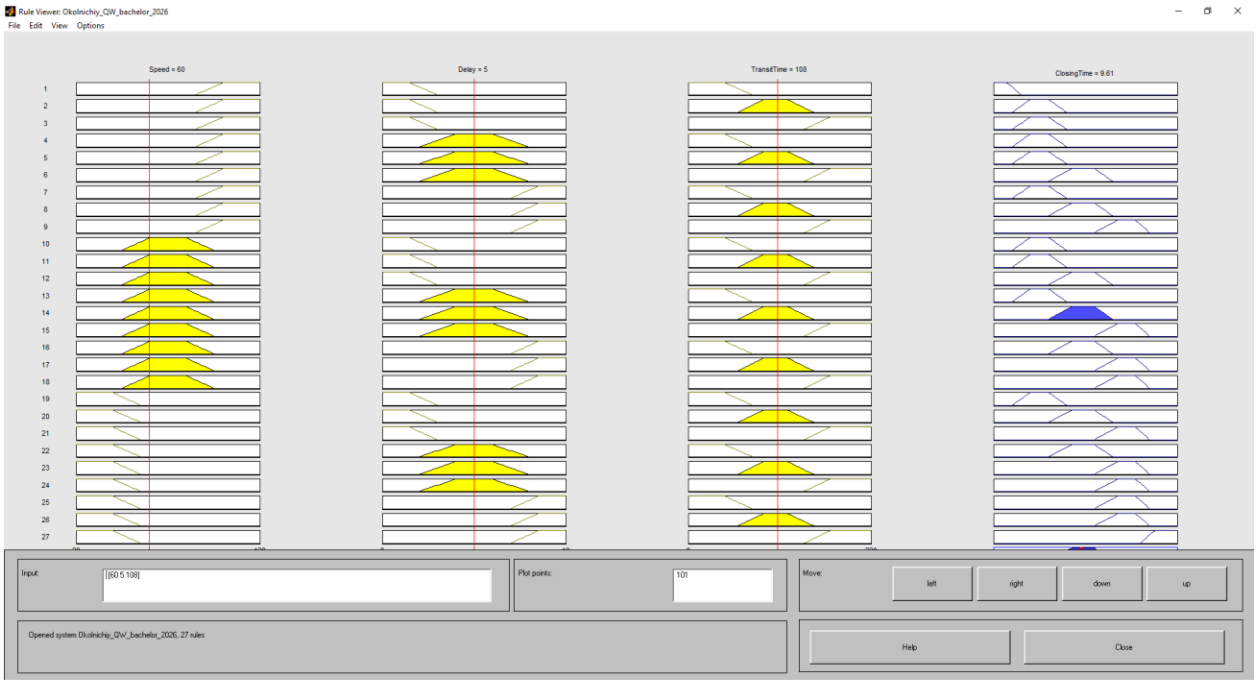


Рисунок В.9 -Rule viewer сценарій №3 [21]

ДОДАТОК Г

МОДЕЛЮВАННЯ ФРАГМЕНТУ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ

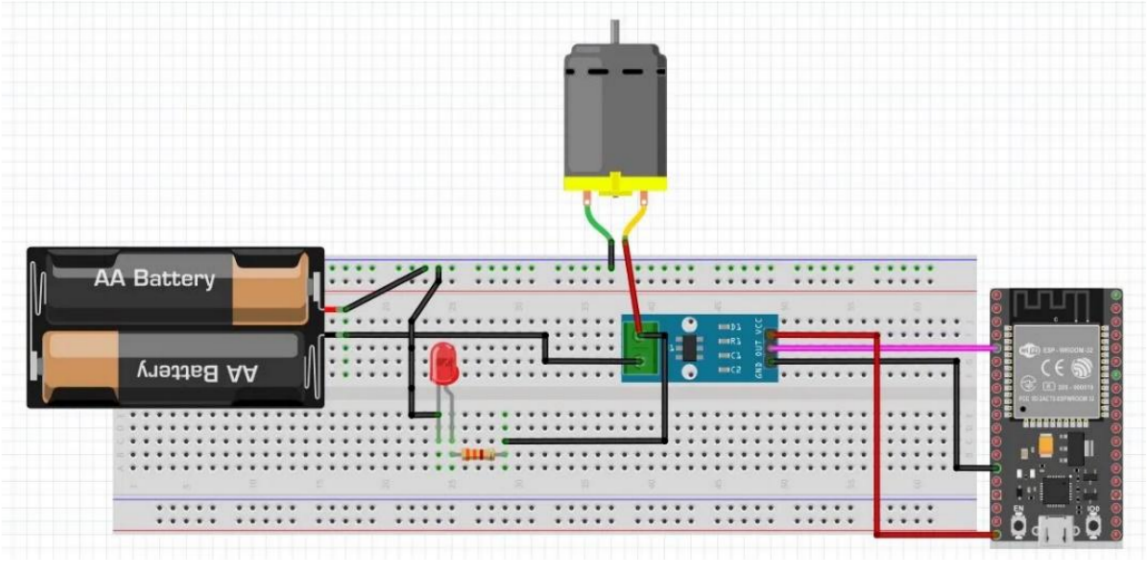


Рисунок Г.1 - Макетна реалізація фрагменту спрощеної апаратної частини прототипу системи ARCCS [22]

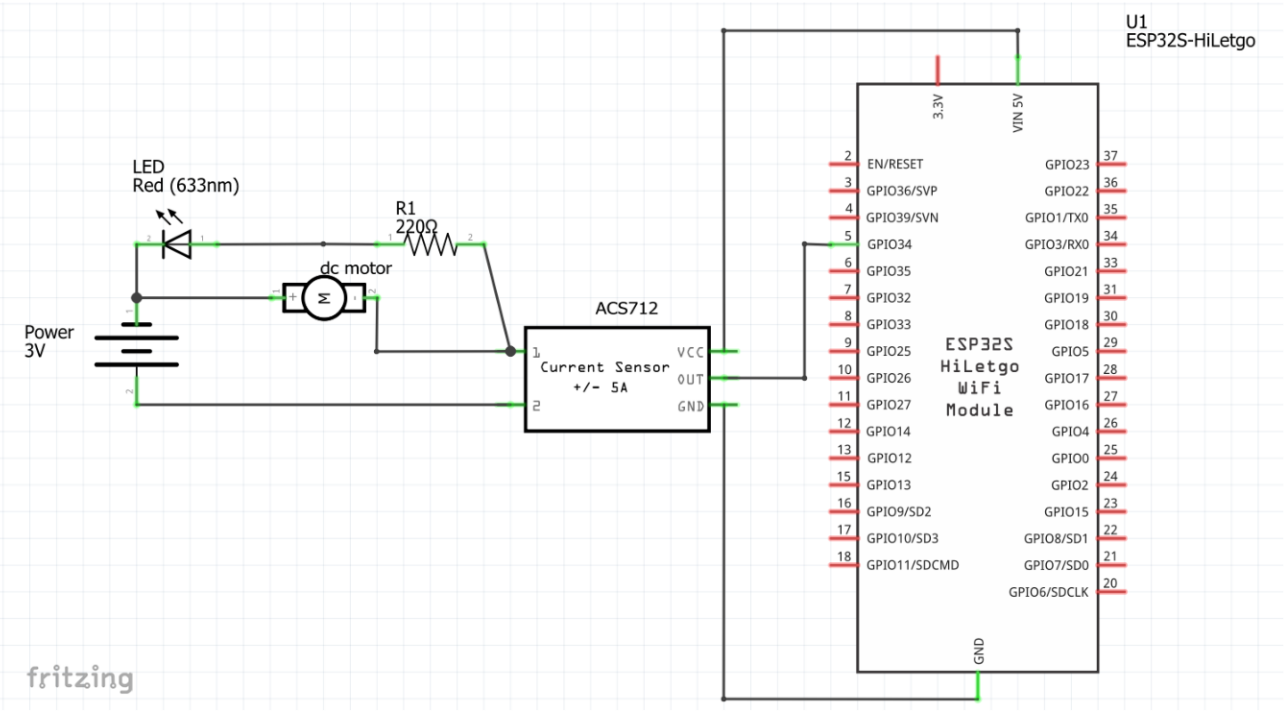
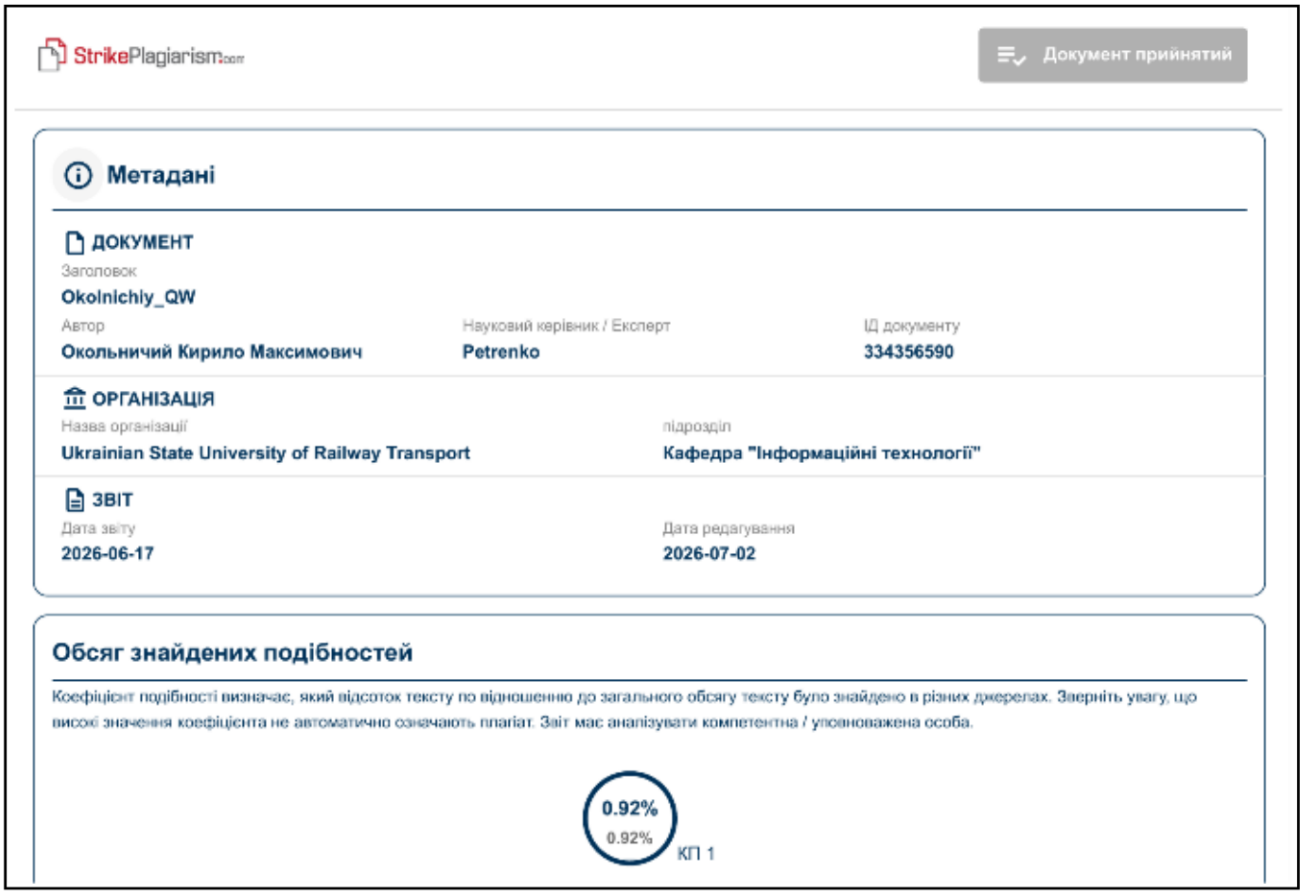


Рисунок Г.2 - Електрична схема фрагменту апаратної частини прототипу системи ARCCS [22]

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

ПІБ студента	*Окольничий Кирило Максимович*
Тема роботи	Автоматизована система залізничного переїзду
Сервіс перевірки на плагіат	StrikePlagiarism
Робота містить авторського тексту	99,08%
Перевірку виконала (ПІБ)	к.т.н, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій УкрДУЗТ Петренко Тетяна Григорівна
Дата, підпис	19.06.26