

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система «Безпілотне таксі»
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Шифр КвРКІ 240142.24.01.05 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група KI2м-24-1


Підпис

Олександр СТОПЧАК
Ініціали, прізвище

Керівник
доцент канд.-техн. наук,


Підпис

Катерина БЕРЕЗЬКА
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер д. техн. наук, професор
Науковий ступінь, учене звання

Підпис

Ініціали, прізвище

Підпис

Сергій ЛИСЕНКО
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС
«01» травня 2026 р.

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 12 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Стопчаку Олександр Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система «Безпілотне таксі»

Керівник проекту (роботи) Березька Катерина Миколаївна, к.т.н., доцент

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

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Кіберфізична система «Безпілотне таксі»

Проектування підсистеми комп'ютерного зору у кіберфізичній системі «Безпілотне таксі»

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

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

закон
сенн
захі
міч
пор
й
ент
ся
ем
длі
гос
я
рк
і
пр
де
Г


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	12.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	12.01.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	20.01.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.02.2026	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.03.2026	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2026	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2026	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2026	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	

Здобувач  Підпис Олександр СТОПЧАК Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Підпис Катерина БЕРЕЗЬКА Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Кіберфізична система «Безпілотне таксі»

Автор роботи: Стопчак Олександр Олександрович.

Керівник роботи: Березька Катерина Миколаївна.

Пояснювальна записка: 85 с., 50 рис., 9 табл., 2 дод., 86 джерел.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ, АВТОНОМНИЙ ТРАНСПОРТ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, YOLO11S, ДЕТЕКЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ, СЕНСОРНЕ ЗЛИТТЯ ДАНИХ, ФІЛЬТР КАЛМАНА, ЛОКАЛІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ, АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ.

Об'єктом дослідження є процес функціонування автономного транспортного засобу в складі кіберфізичної системи безпілотного таксі.

Предметом дослідження є методи, моделі та програмно-апаратні засоби побудови кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», зокрема алгоритми локалізації, комп'ютерного зору, злиття сенсорних даних та автономного керування транспортним засобом.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» на основі сучасних методів автономного керування, комп'ютерного зору та злиття сенсорних даних для забезпечення безпечного й ефективного функціонування автономного транспортного засобу в умовах міського середовища.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи порівняльного аналізу, машинного навчання, комп'ютерного зору.

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку підхід до побудови кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» на основі інтеграції модулів комп'ютерного зору, локалізації та автономного керування, який, на відміну від існуючих рішень, поєднує алгоритми розпізнавання транспортних засобів на базі YOLO із механізмами злиття сенсорних даних та забезпечує функціонування системи в режимі реального часу;

- удосконалено архітектуру програмно-апаратної взаємодії компонентів автономного транспортного засобу шляхом розподілу функцій між сенсорною підсистемою, edge-обчисленнями та хмарною інфраструктурою, що дозволило підвищити ефективність обробки даних і забезпечити масштабованість системи;

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і компоненти програмного забезпечення кіберфізичної системи безпілотного таксі.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробці кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», що може бути використана як основа для створення автономних транспортних платформ, систем інтелектуальної міської мобільності та роботизованих сервісів перевезення.

У першому розділі проведено аналіз сучасних систем автономного транспорту, методів комп'ютерного зору, сенсорних систем та архітектур безпілотних транспортних платформ.

У другому розділі розроблено апаратну та програмну архітектуру кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», обґрунтовано вибір сенсорної підсистеми, обчислювального модуля та мережевої інфраструктури.

У третьому розділі виконано математичне та імітаційне моделювання руху транспортного засобу, реалізовано алгоритм сенсорного злиття даних на основі розширеного фільтра Калмана та описано інтеграцію модулів у єдину систему.

У четвертому розділі реалізовано програмний інтерфейс користувача та проведено експериментальну апробацію моделі детекції транспортних засобів на базі архітектури YOLO11s. Проведено аналіз метрик якості та результатів роботи моделі.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	5
Вступ.....	6
1 Аналіз предметної області та сучасного стану технологій автономного транспорту	9
1.1 Аналіз існуючих систем безпілотного таксі	9
1.2 Аналіз літератури на предмет автономних транспортних засобів	15
1.3 Сенсорні системи автономного транспорту (LiDAR, Radar, Camera, GNSS, IMU)	17
1.4 Постановка задачі розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» та формування технічних вимог до системи	23
1.5 Висновки до першого розділу	26
2 Проектування архітектури кіберфізичної системи “безпілотне таксі”	28
2.1 Особливості архітектури автономних транспортних платформ.....	28
2.2 Загальна структурна схема кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»	33
2.3 Проектування апаратної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»	35
2.4 Проектування програмної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»	42
2.5 Висновки до другого розділу	46
3 Математичне та імітаційне моделювання та реалізація алгоритмів кіберфізичної системи “безпілотне таксі”	48
3.1 Математичне моделювання руху транспортного засобу.....	48
3.2 Імітаційне моделювання роботи кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» .	51
3.3 Порівняння алгоритмів керування PID та MPC	56
3.4 Реалізація сенсорної підсистеми кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» .	58
3.5 Реалізація алгоритму локалізації на основі розширеного фільтра Калмана (ЕКФ)	60
3.6 Інтеграція модулів у єдину кіберфізичну систему.....	66

3.7 Висновки до третього розділу	67
4 Експерименти та результати.....	69
4.1 Розробка програмного інтерфейсу користувача кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»	69
4.2 Експериментальна апробація моделі розпізнавання транспортних засобів на базі архітектури YOLO	73
4.3 Висновки до четвертого розділу	88
Висновки.....	90
Перелік джерел посилань.....	92
Додаток А	101
Додаток Б.....	103

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

CNN - Convolutional Neural Network, згортова нейронна мережа

EKF - Extended Kalman Filter, розширений фільтр Калмана

GNSS - Global Navigation Satellite System, глобальна навігаційна супутникова система для визначення координат і положення транспортного засобу

IMU - Inertial Measurement Unit, інерціальний вимірювальний модуль для визначення прискорення та орієнтації транспортного засобу

LiDAR - Light Detection and Ranging, лазерна система вимірювання відстані

mAP - mean Average Precision, середня точність детекції об'єктів

MPC - Model Predictive Control, модельно-прогнозуюче керування

Radar - Radio Detection and Ranging, радіолокаційна система виявлення об'єктів

V2X - Vehicle-to-Everything, технологія взаємодії транспортного засобу з елементами середовища

YOLO - You Only Look Once, алгоритм детекції об'єктів у режимі реального часу

ВСТУП

Сучасний розвиток інформаційних технологій, штучного інтелекту та комп'ютерної інженерії сприяє активному впровадженню автономних транспортних систем у різних сферах діяльності. Одним із найбільш перспективних напрямів є створення безпілотних транспортних засобів, здатних самостійно здійснювати рух, аналізувати дорожню обстановку та приймати рішення в режимі реального часу.

Кіберфізичні системи автономного транспорту поєднують програмні, апаратні та мережеві компоненти, що забезпечують взаємодію між фізичним середовищем і цифровими технологіями. Особливу роль у таких системах відіграють методи комп'ютерного зору, локалізації, сенсорного злиття даних та алгоритми автономного керування.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення безпеки дорожнього руху, оптимізації транспортних потоків та розвитку інтелектуальних транспортних систем у концепції Smart City. Використання безпілотного таксі дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити ефективність перевезень та забезпечити новий рівень автоматизації транспортної інфраструктури.

Метою роботи є розробка кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» на основі сучасних методів автономного керування, комп'ютерного зору та злиття сенсорних даних. У роботі розглянуто архітектуру системи, виконано математичне та імітаційне моделювання, реалізовано алгоритми локалізації й детекції транспортних засобів на базі YOLO, а також проведено експериментальне дослідження ефективності запропонованих рішень.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- Провести аналіз сучасних систем безпілотного таксі, архітектур автономного транспорту та сенсорних технологій.
- Розробити апаратну й програмну архітектуру кіберфізичної системи «Безпілотне таксі».

- Виконати математичне та імітаційне моделювання руху транспортного засобу.
- Реалізувати й дослідити алгоритми локалізації, злиття сенсорних даних та детекції транспортних засобів на базі YOLO.
- Розробити користувацький інтерфейс і провести оцінювання ефективності запропонованої системи.

Об'єктом дослідження є процес функціонування автономного транспортного засобу в складі кіберфізичної системи безпілотного таксі.

Предметом дослідження є методи, моделі та програмно-апаратні засоби побудови кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», зокрема алгоритми локалізації, комп'ютерного зору, злиття сенсорних даних та автономного керування транспортним засобом.

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку підхід до побудови кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» на основі інтеграції модулів комп'ютерного зору, локалізації та автономного керування, який, на відміну від існуючих рішень, поєднує алгоритми детекції транспортних засобів на базі YOLO із механізмами злиття сенсорних даних та забезпечує функціонування системи в режимі реального часу;
- удосконалено архітектуру програмно-апаратної взаємодії компонентів автономного транспортного засобу шляхом розподілу функцій між сенсорною підсистемою, edge-обчисленнями та хмарною інфраструктурою, що дозволило підвищити ефективність обробки даних і забезпечити масштабованість системи; На основі проведених досліджень розроблено метод оптимізації продуктивності систем інтелектуальних мереж з пристроями IoT, сервером з множинним доступом та БПЛА для додаткового зв'язку.

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», що може бути використана як основа для створення автономних транспортних платформ, систем інтелектуальної міської мобільності та роботизованих сервісів перевезення.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи забезпечення функціонування систем з IoT, методи математичного моделювання.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [83] у Збірнику наукових праць за матеріалами VI Міжнародної наукової конференції, 23-24 квітня 2026 р (Тернопіль – 2026. – С. 151-152).

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Аналіз існуючих систем безпілотного таксі

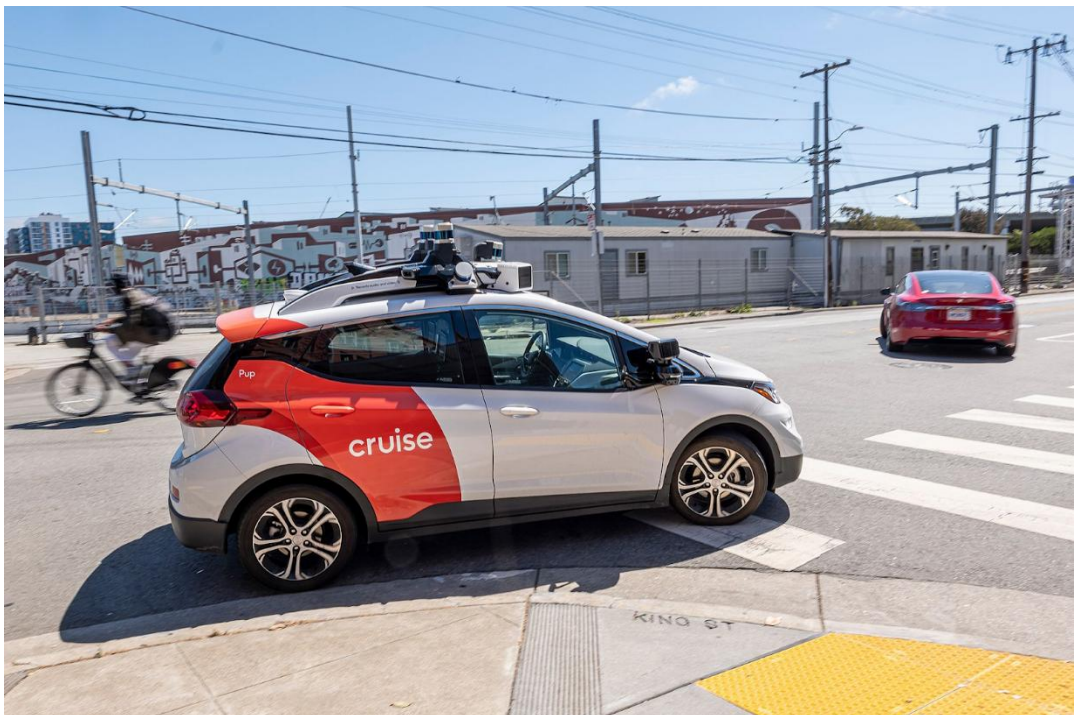
Розвиток безпілотного таксі є одним із найбільш динамічних напрямів у сфері автономного транспорту та кіберфізичних систем. На відміну від індивідуальних автономних автомобілів, концепція роботаксі передбачає інтеграцію транспортного засобу з інтелектуальною інфраструктурою, диспетчерськими сервісами, хмарними платформами та мобільними застосунками. Таким чином, система безпілотного таксі є повноцінною кіберфізичною системою, що поєднує фізичні компоненти (сенсори, приводи, транспортний засіб) з програмними алгоритмами, мережевими сервісами та системами обробки даних.

Одним із лідерів галузі є компанія Waymo [1], яка розробляє сервіс автономних перевезень Waymo One. Система використовує багатосенсорну архітектуру, що включає LiDAR, радар, камери та високоточну карту місцевості. Обчислювальна платформа забезпечує обробку даних у реальному часі та підтримує алгоритми глибинного навчання для розпізнавання об'єктів і прогнозування поведінки учасників дорожнього руху. Waymo використовує модифіковані електромобілі Jaguar I-PACE та інші серійні авто, оснащені власною сенсорною платформою (LiDAR, Radar, камери). Автомобілі мають характерний блок LiDAR на даху та сенсорні модулі по периметру кузова. Приклад безпілотного автомобіля компанії Waymo зображено на рисунку 1.1.

Іншим відомим прикладом є компанія Cruise [2], яка тестувала автономні таксі у міському середовищі (рисунок 1.2). Їх підхід базується на високій щільності сенсорів та централізованій хмарній аналітиці для моніторингу роботи флоту. Cruise використовує як модифіковані Chevrolet Bolt, так і власну модель Cruise Origin - автономний електромобіль без керма та педалей, створений спеціально для роботаксі.



Рисунок 1.1 – Приклад безпілотного автомобіля компанії Waymo [1]



a)



б)

Рисунок 1.2 – Зображення безпілотного автомобіля компанії Cruise [2]: (а) модифікований автомобіль Chevrolet Bolt; б) власна модель Cruise Origin)

Китайський напрям розвитку представлений платформою Apollo Go [3], що функціонує в межах екосистеми Baidu Apollo (рисунок 1.3). Система інтегрує автономні транспортні засоби з інфраструктурою «розумного міста», використовуючи технології V2X для підвищення безпеки руху. Apollo Go експлуатує автономні транспортні засоби в межах інфраструктури «розумного міста». Авто оснащені LiDAR та інтегровані з V2X-системами міської інфраструктури.

Компанія Zoox [4] запропонувала альтернативну концепцію, а саме спеціально спроектований симетричний електромобіль без керма та педалей, що спочатку розроблявся як автономний транспорт четвертого рівня автономності, який може рухатися в обох напрямках без розвороту. Салон спроектований як

пасажирський модуль із сидіннями навпроти одне одного. Приклади автомобілів Zoox представлені на рисунку 1.4.



Рисунок 1.3 – Приклад безпілотного автомобіля Apollo [3]



a)



б)

Рисунок 1.4 – Зображення безпілотних автомобілів компанії Zoox [4]:
(а) пасажирський двосторонній автомобіль; б) двосторонній автомобіль
футуристичного дизайну

З метою систематизації результатів проведеного аналізу доцільно здійснити порівняння провідних реалізованих рішень за ключовими технічними характеристиками. Результати порівняння існуючих на ринку лідерів безпілотного транспорту [1-4] представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати порівняльного аналізу безпілотних автомобілів, представлених на світовому ринку.

Критерій	Waymo	Cruise	Apollo Go	Zoox
Рівень автономності	SAE Level 4	SAE Level 4	SAE Level 4	SAE Level 4

Кінець таблиці 1.1

Тип транспортно ї платформи	Модифіковани й серійний автомобіль	Модифіковани й електромобіль	Серійні авто + власні моделі	Спеціально спроєктовани й автономний електромобіль
Сенсорна система	LiDAR + Radar + Камери	LiDAR + Radar + Камери	LiDAR + Камери + V2X	LiDAR + Radar + Камери
Наявність HD-карт	Так	Так	Так	Так
Архітектура обчислень	Бортова + хмарна	Бортова + централізовані й контроль	Інтеграція з міською інфраструктуро ю	Повністю автономна бортова система
Інтеграція з мобільним сервісом	Waymo One	Cruise App	Apollo Go App	Власний сервіс
Географія експлуатації	США	США	Китай	США (тестування)
Особливості	Висока зрілість системи	Акцент на міські сценарії	Активне використання V2X	Повністю нова архітектура авто без керма

Порівняльний аналіз показує, що всі розглянуті системи функціонують на четвертому рівні автономності відповідно до класифікації SAE, що передбачає повністю автономне керування транспортним засобом у визначених умовах експлуатації без втручання водія.

Спільною рисою є використання багатосенсорної архітектури, в якій LiDAR виступає ключовим джерелом просторової інформації. Разом із тим простежуються відмінності у підходах до архітектури транспортної платформи: якщо більшість компаній використовують модифіковані серійні автомобілі, то Zoox реалізує концепцію повністю нового транспортного засобу, спроектованого саме під автономне керування. Істотною особливістю китайської системи Apollo Go є глибока інтеграція з інфраструктурою «розумного міста» та використання технології V2X, що дозволяє розширити межі сенсорного сприйняття транспортного засобу за рахунок зовнішніх джерел даних.

1.2 Аналіз літератури на предмет автономних транспортних засобів

У ході даного дослідження було розглянути сучасні наукові публікації Українських та закордонних вчених. У роботі [8] представлено комплексний огляд сучасного стану розвитку безпілотних автомобілів. Автори систематизують архітектуру автономних систем за функціональними модулями: сприйняття (perception), локалізація, планування траєкторії та керування. Значну увагу приділено застосуванню глибинного навчання для розпізнавання об'єктів, семантичної сегментації та прогнозування поведінки учасників дорожнього руху. Стаття є фундаментальною для формування структурної моделі автономної транспортної платформи та підтверджує доцільність модульної кіберфізичної архітектури.

У [10] деталізується використання методів глибинного навчання у системах автономного керування. У роботі проаналізовано архітектури згорткових нейронних мереж, методи двовимірного та тривимірного розпізнавання, підходи до комплексування даних від багатьох сенсорів та інтеграцію нейронних мереж у

реальний транспортний засіб. Дослідження підкреслює критичну роль модуля сприйняття та демонструє, що сучасні автономні системи значною мірою залежать від ефективності алгоритмів комп'ютерного зору. Таким чином, ці дві оглядові роботи підтверджують, що автономний транспортний засіб слід розглядати як складну кіберфізичну систему, де цифровий алгоритмічний рівень тісно інтегрований із фізичною динамікою транспортного засобу.

Автори [14] розглядають автономні транспортні засоби як міждисциплінарну проблему безпеки, що поєднує інженерію програмного забезпечення, системну безпеку, штучний інтелект та нормативне регулювання. Автори підкреслюють складність валідації автономних систем через практичну неможливість протестувати всі можливі дорожні сценарії. Це обґрунтовує необхідність формальних методів оцінювання безпеки та використання концепції простору експлуатаційного проектування.

Подальший розвиток цієї ідеї представлено у роботі [15], де досліджується проблема визначення меж ODD та кількості потенційних сценаріїв, які повинна враховувати автономна система. Автори показують, що повне покриття всіх ситуацій є практично недосяжним, тому безпека повинна забезпечуватися через архітектурне резервування, обмеження області експлуатації та багаторівневі механізми контролю. Ці дослідження є важливими для формування архітектурних вимог до кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», зокрема в частині визначення меж експлуатації та реалізації механізмів переходу в безпечний стан.

Автори [16] аналізують потенційні кіберзагрози для автоматизованих транспортних засобів. У роботі розглянуто атаки на сенсори, канали зв'язку, навігаційні системи та внутрішні автомобільні мережі. Автори демонструють, що автономні системи значно розширюють поверхню атак у порівнянні з традиційними автомобілями. Дослідження підкреслює необхідність впровадження принципів безпеки на етапі проектування та інтеграції механізмів криптографічного захисту, а також моніторингу аномалій у бортових мережах.

У [18] запропоновано формальну модель відповідальної чутливості безпеки, що визначає математичні правила безпечної дистанції та реагування автономного

транспортного засобу. Модель базується на формалізації принципів відповідальної поведінки на дорозі та дозволяє обґрунтувати безпечність рішень системи керування.

Автори [17] розглядають концепцію цифрового двійника як інструмент інтеграції фізичної системи з її цифровою моделлю. У контексті автономного транспорту цифровий двійник може використовуватися для моделювання дорожніх сценаріїв, прогнозування відмов та оптимізації керування. Проведений аналіз наукових джерел дозволяє сформулювати такі ключові положення:

- 1) Автономний транспортний засіб є багаторівневою кіберфізичною системою з модульною архітектурою.
- 2) Критичною складовою є модуль сприйняття на основі глибинного навчання.
- 3) Забезпечення безпеки потребує поєднання формальних моделей відповідальної чутливості безпеки, обмеження простору експлуатаційного проектування та архітектурного резервування.
- 4) Кібербезпека є невід'ємною складовою архітектури автономної системи.
- 5) Концепція цифрового двійника є перспективним інструментом валідації та моделювання.

Результати проведеного аналізу наукових джерел стануть теоретичним підґрунтям для подальшого проектування кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» в межах даної роботи.

1.3 Сенсорні системи автономного транспорту (LiDAR, Radar, Camera, GNSS, IMU)

Сенсорна підсистема є фундаментальним елементом автономної транспортної платформи та формує інформаційну основу для роботи модулів сприйняття, локалізації та планування руху. У межах кіберфізичної системи

«Безпілотне таксі» сенсори забезпечують безперервне отримання даних про навколишнє середовище та власний стан транспортного засобу.

Сучасні автономні транспортні засоби використовують мультисенсорний підхід, що передбачає поєднання кількох типів датчиків з різними фізичними принципами роботи. Така архітектура підвищує надійність, точність та відмовостійкість системи.

LiDAR є активним оптичним сенсором, що використовує лазерне випромінювання для вимірювання відстані до об'єктів. Принцип роботи базується на вимірюванні часу повернення відбитого імпульсу (рисунок 1.6). Мета застосування - формування 3D хмари точок, висока точність визначення відстані (до кількох сантиметрів), незалежність від зовнішнього освітлення. Перевагами використання лідару є точне тривимірне моделювання сцени, висока роздільна здатність по глибині. До недоліків можна віднести високу вартість, чутливість до погодних умов (туман, дощ, сніг), значне енергоспоживання. У кіберфізичній системі LiDAR забезпечує просторову реконструкцію середовища та використовується для побудови карти перешкод і локалізації.



Рисунок 1.6 – Зображення LiDAR на даху безпілотного автомобіля.

Наступним важливим сенсором, без якого не може функціонувати безпілотний автомобіль є радар (рисунок 1.7). Радар використовує радіохвилі для визначення відстані, швидкості та напрямку руху об'єктів. Основні особливості: здатність працювати у складних погодних умовах, вимірювання відносної швидкості за допомогою ефекту Доплера, велика дальність виявлення. Переваги використання - стійкість до дощу, туману та пилу та надійність у нічний час. Недоліки - нижча просторово-кутова роздільна здатність порівняно з LiDAR та складність інтерпретації відбитих сигналів. Радар використовується для визначення відстані до транспортних засобів, адаптивного круїз-контролю та контролю зіткнень.

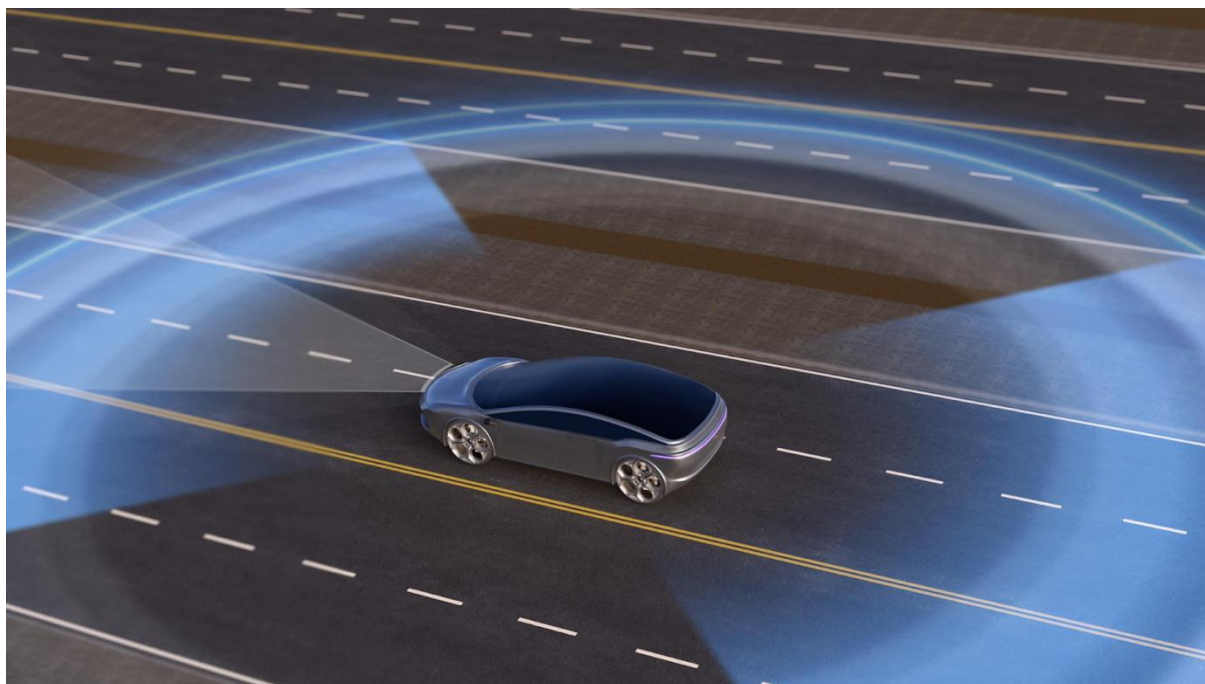


Рисунок 1.7 – Приклад роботи радару безпілотного автомобіля

Відеокамери забезпечують отримання візуальної інформації про навколишнє середовище. Основні функції камер — це розпізнавання та класифікація об'єктів, розпізнавання дорожніх знаків, визначення розмітки та світлофорів, семантична сегментація сцени. Переваги використання камер у безпілотних автомобілях — це низька вартість, висока інформаційна насиченість та можливість використання алгоритмів глибокого навчання (зокрема YOLO). До недоліків можна віднести

залежність від освітлення та складність оцінки глибини без стереопари або додаткових сенсорів. Камери є ключовим джерелом даних для модуля сприйняття автономної системи. Приклад оснащення камерами відеоспостереження безпілотного автомобіля представлено на рисунку 1.8.

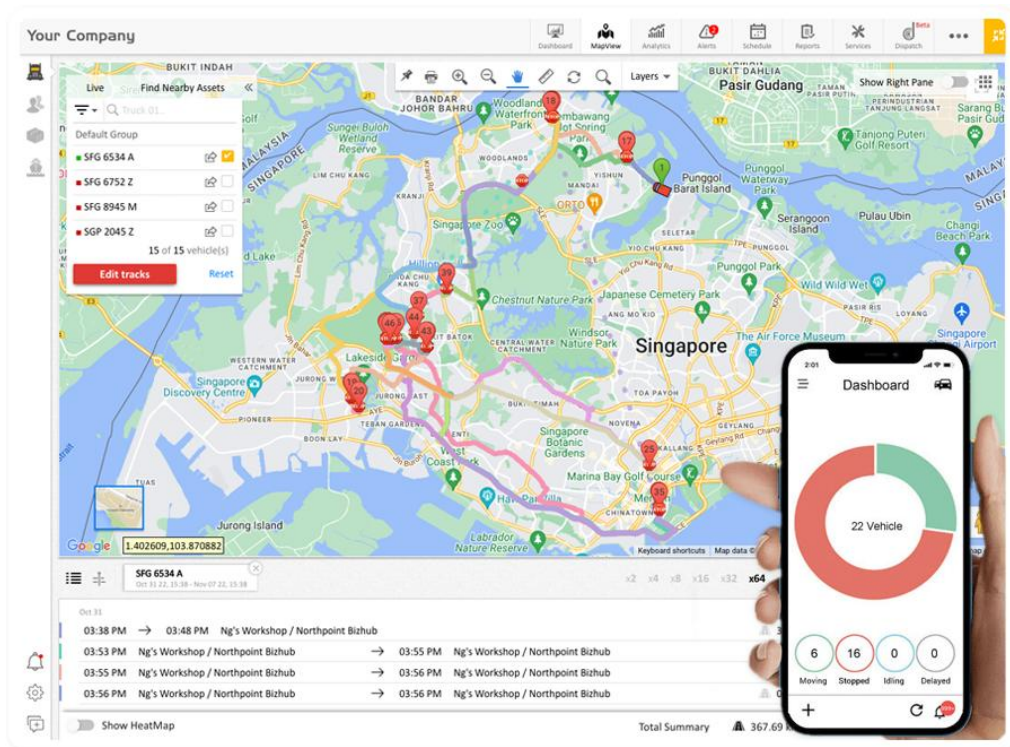


Рисунок 1.8 – Приклад роботи камер відеоспостереження у безпілотному автомобілі [19]

GNSS використовується для визначення глобальних координат транспортного засобу (рисунок 1.9). Основне призначення у безпілотних автомобілях - це визначення широти, довготи та висоти, підтримка RTK-корекцій для підвищення точності та інтеграція з HD-картами. Недоліки застосування: втрата сигналу в тунелях або щільній міській забудові та вплив багатопроменевого поширення сигналу. GNSS забезпечує глобальну локалізацію та використовується у поєднанні з IMU для підвищення точності. Для нівелювання зазначених недоліків супутникові дані комплексуються з показниками автономних одометричних сенсорів за допомогою алгоритмів фільтрації Калмана. Це дозволяє безперервно й високоточно оцінювати траєкторію руху автомобіля навіть у моменти повного зникнення зв'язку із супутниками.



a)



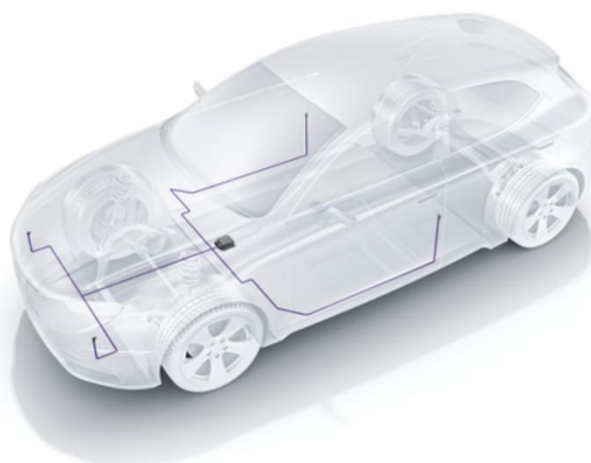
б)

Рисунок 1.9 – Приклад роботи системи GNSS у безпілотних автомобілях [20]:
 (а) GPS-антена на даху автомобіля; б) приклад роботи системи GPS у мобільному застосунку для безпілотних таксі)

IMU складається з датчиків периферійного прискорення (акселерометрів) (рисунок 1.10) та гіроскопів (рисунок 1.11) і вимірює лінійні прискорення та кутові швидкості. У сучасних транспортних системах застосовуються MEMS-акселерометри, що мають компактні розміри та високу частоту оновлення даних. Переваги застосування незалежність від зовнішніх сигналів та висока частота оновлення даних. Недоліком є накопичення похибки при довготривалому інтегруванні. У практичних реалізаціях акселерометр і гіроскоп об'єднуються в один модуль IMU, який часто також включає магнітометр. IMU використовується для оцінки динаміки руху та разом із GNSS формує основу інерціальної навігації.



а)



б)

Рисунок 1.10 – Автомобільний датчик периферійного прискорення [21]: (а) зовнішній корпус та внутрішній модуль датчика; (б) концепція пасивної безпеки транспортного засобу (схема).

Жоден сенсор окремо не забезпечує повної та достовірної картини середовища. Тому сучасні автономні системи використовують алгоритми комплексування даних від багатьох сенсорів (наприклад, розширений фільтр Калмана, байєсівські підходи або нейронні мережі), які інтегрують дані з лідарів, радарів, камер, супутникових систем навігації та інерціальних вимірювальних модулів.

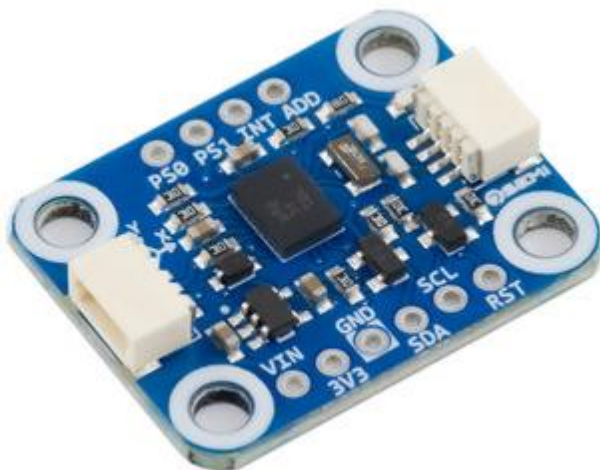


Рисунок 1.11 – Зображення гіроскопа [21]

Сенсорна система автономного транспортного засобу є багатокомпонентною кіберфізичною підсистемою, що поєднує активні та пасивні сенсори різної фізичної природи. LiDAR забезпечує тривимірну реконструкцію сцени, радар - надійне визначення швидкості та відстані, камери, яка забезпечує семантичну інтерпретацію середовища, GNSS та IMU забезпечують навігацію та оцінку стану руху. Ефективність автономного безпілотного таксі безпосередньо залежить від правильної інтеграції цих сенсорів у межах узгодженої архітектури та застосування алгоритмів злиття даних.

1.4 Постановка задачі розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» та формування технічних вимог до системи

Розвиток автономного транспорту потребує створення інтегрованих кіберфізичних систем, здатних забезпечити безпечне, надійне та ефективне функціонування транспортного засобу без участі водія. У межах даної магістерської роботи ставиться задача розробки концепції та архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», що поєднує апаратні, програмні та інформаційні компоненти в єдину інтегровану структуру. Під кіберфізичною системою у даному дослідженні розуміється багаторівнева система, в якій фізичні

процеси руху транспортного засобу взаємодіють із цифровими алгоритмами сприйняття, аналізу даних, планування та керування в режимі реального часу.

Метою розробки є створення архітектурної моделі кіберфізичної системи автономного таксі, що забезпечує:

- автономне пересування в межах визначеної зони експлуатаційного проектування;
- безпечне виконання маневрів у міському середовищі;
- інтеграцію сенсорних систем, алгоритмів розпізнавання та навігації;
- функціонування в режимі реального часу;
- відповідність вимогам функціональної та кібербезпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) Провести аналіз існуючих архітектур автономних транспортних систем.
- 2) Обґрунтувати вибір сенсорної конфігурації.
- 3) Розробити структуру perception-модуля (розпізнавання об'єктів, розпізнавання).
- 4) Реалізувати модель локалізації з інтеграцією IMU та GNSS.
- 5) Розробити алгоритм планування траєкторії руху.
- 6) Сформулювати модель керування виконавчими механізмами.
- 7) Забезпечити механізми функціональної безпеки та відмовостійкості.
- 8) Визначити вимоги до апаратної та обчислювальної платформи.

У сучасних умовах розвитку інтелектуальних транспортних систем особливу увагу приділяють формуванню чітких та обґрунтованих технічних вимог до автономних транспортних засобів. Це зумовлено необхідністю забезпечення високого рівня безпеки, надійності та ефективності їх функціонування в складному міському середовищі. Технічні вимоги формуються на основі аналізу сучасних автономних платформ, стандартів безпеки та особливостей міського середовища. Функціональні та нефункціональні вимоги до системи безпілотного таксі наведені у таблицях 1.2-1.3 відповідно. Розробка цих критеріїв базується на комплексному моделюванні потенційних дорожніх ситуацій та детальному аналізі ризиків для

пасажирів і пішоходів. Окремий масив параметрів присвячено визначенню допустимого часу затримки бортової обчислювальної системи при прийнятті критичних рішень у режимі реального часу. Крім того, нормативна база враховує географічні та кліматичні чинники, які безпосередньо впливають на стабільність роботи оптичних та радіолокаційних засобів сприйняття. Такий підхід дозволяє створити цілісну та структуровану модель проектування, що гарантує повну відповідність розроблюваного транспортного засобу сучасним стандартам надійності та функціональної безпеки.

Таблиця 1.2 – Функціональні вимоги до кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

№	Вимога	Опис	Критерій перевірки
F1	Автономний рух	Забезпечення руху без участі водія в межах ODD	Успішне проходження тестового маршруту
F2	Розпізнавання об'єктів	Виявлення транспортних засобів, пішоходів, перешкод	Точність розпізнавання $\geq 90\%$
F3	Класифікація об'єктів	Розпізнавання типів об'єктів дорожнього середовища	Precision/Recall ≥ 0.9
F4	Локалізація	Визначення координат та орієнтації ТЗ	Похибка $\leq \pm 0,5$ м
F5	Планування траєкторії	Формування безпечної траєкторії руху	Відсутність зіткнень у тестових сценаріях
F6	Реагування на перешкоди	Екстремне гальмування або об'їзд	Час реакції ≤ 100 мс
F7	Моніторинг стану	Контроль працездатності сенсорів та модулів	Виявлення відмови ≤ 1 с

Таблиця 1.2 – Нефункціональні вимоги до кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

№	Категорія	Вимога	Значення
NF1	Продуктивність	Затримка прийняття рішення	≤ 100 мс
NF2	Продуктивність	Частота оновлення локалізації	≥ 50 Гц
NF3	Надійність	Резервування критичних сенсорів	Обов'язкове
NF4	Безпека	Відповідність ISO 26262	Обов'язкове
NF5	Кібербезпека	Захист каналів зв'язку	Шифрування + автентифікація
NF6	Масштабованість	Підтримка оновлення ПЗ	ОТА підтримується
NF7	Енергоспоживання	Робота в автомобільному середовищі	В межах 12–48V систем

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі магістерської роботи проведено комплексний аналіз предметної області автономного транспорту та сучасного стану розвитку технологій безпілотних транспортних засобів. Досліджено існуючі системи роботаксі, їх архітектурні підходи, особливості реалізації та технологічні

обмеження. Встановлено, що сучасні автономні платформи функціонують як складні багаторівневі кіберфізичні системи, що поєднують фізичні процеси руху з алгоритмами сприйняття, аналізу даних і керування у режимі реального часу.

Окрему увагу приділено сенсорним системам автономного транспорту. Розглянуто принципи роботи та характеристики LiDAR, Radar, камер, GNSS та IMU, а також обґрунтовано необхідність мультисенсорної інтеграції. Показано, що ефективність автономного таксі безпосередньо залежить від коректної реалізації алгоритмів sensor fusion та інтеграції IMU і GNSS у модулі локалізації.

У межах розділу сформульовано постановку задачі розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», визначено об'єкт і предмет дослідження, а також розроблено систему функціональних, нефункціональних, апаратних і програмних вимог. Складено матрицю простежуваності вимог, що демонструє взаємозв'язок між вимогами та підсистемами.

2 ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ “БЕЗПЛОТНЕ ТАКСІ”

2.1 Особливості архітектури автономних транспортних платформ

Архітектура автономної транспортної платформи визначає структуру взаємодії апаратних та програмних компонентів, принципи обробки даних, розподіл обчислювальних ресурсів та механізми забезпечення функціональної і кібербезпеки. У контексті кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» архітектура виступає основою інтеграції сенсорних підсистем, обчислювальних модулів, виконавчих механізмів та мережевої інфраструктури.

Більшість сучасних автономних транспортних систем реалізуються за модульним принципом та включають такі основні рівні:

- Рівень сприйняття, який відповідає за тримання та первинна обробка даних із сенсорів (LiDAR, Radar, камери, GNSS, IMU). Реалізуються алгоритми розпізнавання, класифікації та сегментації об’єктів.
- Рівень локалізації та злиття даних, інтеграція даних різних сенсорів для визначення точного положення транспортного засобу відносно HD-карти.
- Рівень планування, побудова траєкторії руху з урахуванням дорожньої обстановки, правил руху та прогнозованої поведінки інших учасників.
- Рівень керування, формування команд для виконавчих механізмів: кермо, гальма, акселератор.
- Рівень моніторингу та безпеки, контроль справності сенсорів, діагностика відмов, механізми аварійного переходу в безпечний стан.

Відтак, у [6] порівнюються дві нелінійних модельно-орієнтованих стратегій керування автономним транспортним засобом. Автори досліджують ефективність алгоритмів керування, що базуються на математичній моделі динаміки автомобіля, з метою забезпечення стабільного руху та точного слідування траєкторії, а також пропонують загальну структуру архітектури сучасних безпілотних транспортних систем, яка представлена на рисунку 2.1 [6].



Рисунок 2.1 – Загальна структура архітектури сучасних безпілотних транспортних систем згідно з [6]

У сучасних автономних платформах застосовуються два основні підходи до організації обчислювальної структури - Іцентралізовану та розподілену. Централізована архітектура передбачає наявність одного високопродуктивного обчислювального модуля (наприклад, GPU-платформи), який виконує всі алгоритми сприйняття та планування. Переваги такого рішення - це спрощене управління даними, менша складність синхронізації. До недоліків можна віднести єдину точку відмови та високі вимоги до продуктивності.

Розподілена архітектура передбачає використання кількох обчислювальних блоків (ECU), що відповідають за окремі функції (сприйняття, керування, безпека). Перевагами розподіленої архітектури є підвищена відмовостійкість та масштабованість. Недоліки включають складність інтеграції та необхідність високошвидкісної бортової мережі (CAN, FlexRay, Automotive Ethernet).

Сучасні автономні транспортні засоби використовують високопродуктивні embedded-платформи з підтримкою паралельних обчислень та апаратного

прискорення нейронних мереж. Архітектурно вони включають CPU для логіки управління, GPU або AI-акселератори для комп'ютерного зору, окремий мікроконтролер безпеки (Safety MCU), модулі зв'язку (5G, V2X, Wi-Fi, GNSS). Ключовою вимогою є підтримка реального часу та гарантія латентності обробки даних.

Автономні таксі функціонують у межах розширеної кіберфізичної екосистеми, що включає: V2V, V2I, V2C принципи. Хмарна інфраструктура забезпечує централізований моніторинг флоту, оновлення програмного забезпечення, аналітику даних, оптимізацію маршрутів. Такий підхід представлено у [7], що дозволяє реалізувати концепцію розподіленої кіберфізичної системи, де транспортний засіб є лише одним із елементів мережі (рисунок 2.2).

Централізована архітектура характерна для ранніх прототипів автономних транспортних засобів, де основна увага приділялась інтеграції алгоритмів сприйняття та планування на одній обчислювальній платформі. Однак така структура має обмеження щодо відмовостійкості та масштабування.

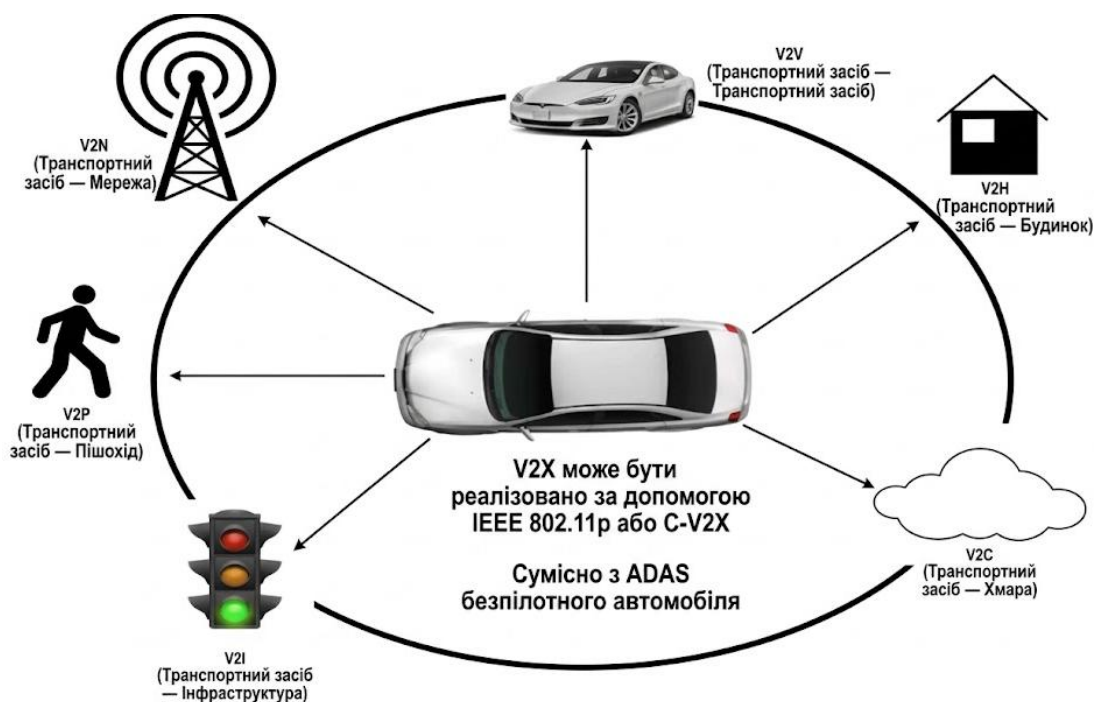


Рисунок 2.2 – Протокол комунікації безпілотних автомобілів V2X з навколишнім середовищем згідно з [6]

За результатами порівняльного аналізу типів архітектур, розглянутих вище, було складено таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз архітектур автономних транспортних платформ

Критерій	Централізована архітектура	Розподілена архітектура	Гібридна (доменна) архітектура
Структура обчислень	Один високопродуктивний центральний ECU	Кілька спеціалізованих ECU	Декілька доменних контролерів та центральний вузол
Обробка сенсорних даних	Концентрація в одному модулі	Попередня обробка на периферійних вузлах	Попередня обробка та централізована інтеграція
Sensor Fusion	Виконується централізовано	Може виконуватися локально та глобально	Ієрархічне злиття даних
Відмовостійкість	Низька (єдина точка відмови)	Вища (часткове резервування)	Висока (резервування доменів)
Масштабованість	Обмежена продуктивністю центрального вузла	Гнучка, можливе додавання ECU	Висока, підтримка модульного розширення

Кінець таблиці 2.1

Складність інтеграції	Нижча	Вища (синхронізація вузлів)	Середня
Вимоги до мережі	Помірні	Високі (CAN/FlexRay/Ethernet)	Automotive Ethernet та Time-Sensitive Networking
Підтримка real-time	Залежить від потужності центрального процесора	Розподілена відповідальність	Оптимізована для критичних доменів
Типове застосування	Ранні прототипи, дослідні платформи	Комерційні AV-рішення	Сучасні автономні платформи L4–L5
Переваги	Простота архітектури, централізоване управління	Відмовостійкість, модульність	Баланс продуктивності та безпеки
Недоліки	Єдина точка відмови, обмеження масштабування	Висока складність інтеграції	Вища вартість реалізації

Розподілена архітектура підвищує надійність системи за рахунок декомпозиції функцій між окремими обчислювальними модулями. Проте вона ускладнює синхронізацію та потребує високошвидкісних мережевих протоколів.

Гібридна (доменна або зональна) архітектура є сучасним напрямом розвитку автономних платформ, що поєднує централізовану обробку даних з розподіленими контролерами функціональних доменів. Такий підхід найбільш відповідає вимогам кіберфізичних систем рівнів автономності L4–L5.

2.2 Загальна структурна схема кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Безпілотне таксі є складною кіберфізичною системою, у якій фізичні процеси руху транспортного засобу безпосередньо залежать від цифрових алгоритмів аналізу сенсорних даних. Основною особливістю такої системи є необхідність забезпечення роботи в режимі реального часу за умов динамічного міського середовища [1]. Запропонована архітектура має багаторівневу структуру. Зображення запропонованої архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» представлено на рисунку 2.3.

Архітектура представленої у роботі кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» складається з наступних рівнів:

1. Сенсорний рівень, використовуються LiDAR, Radar, відеокамери, GNSS та IMU. Дані з різномірних сенсорів надходять до модуля злиття даних, що формує узгоджену модель навколишнього середовища.

2. Рівень сприйняття, реалізуються алгоритми розпізнавання та класифікації об'єктів (зокрема на основі YOLO), розпізнавання дорожньої розмітки та світлофорів.

3. Рівень локалізації, інтеграція GNSS та IMU забезпечує стабільне визначення положення транспортного засобу навіть за часткової втрати супутникового сигналу.

4. Рівень планування, формується безпечна траєкторія руху з урахуванням дорожніх правил та динамічних перешкод.

5. Рівень керування, контролер реального часу формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів із забезпеченням стабільності руху.

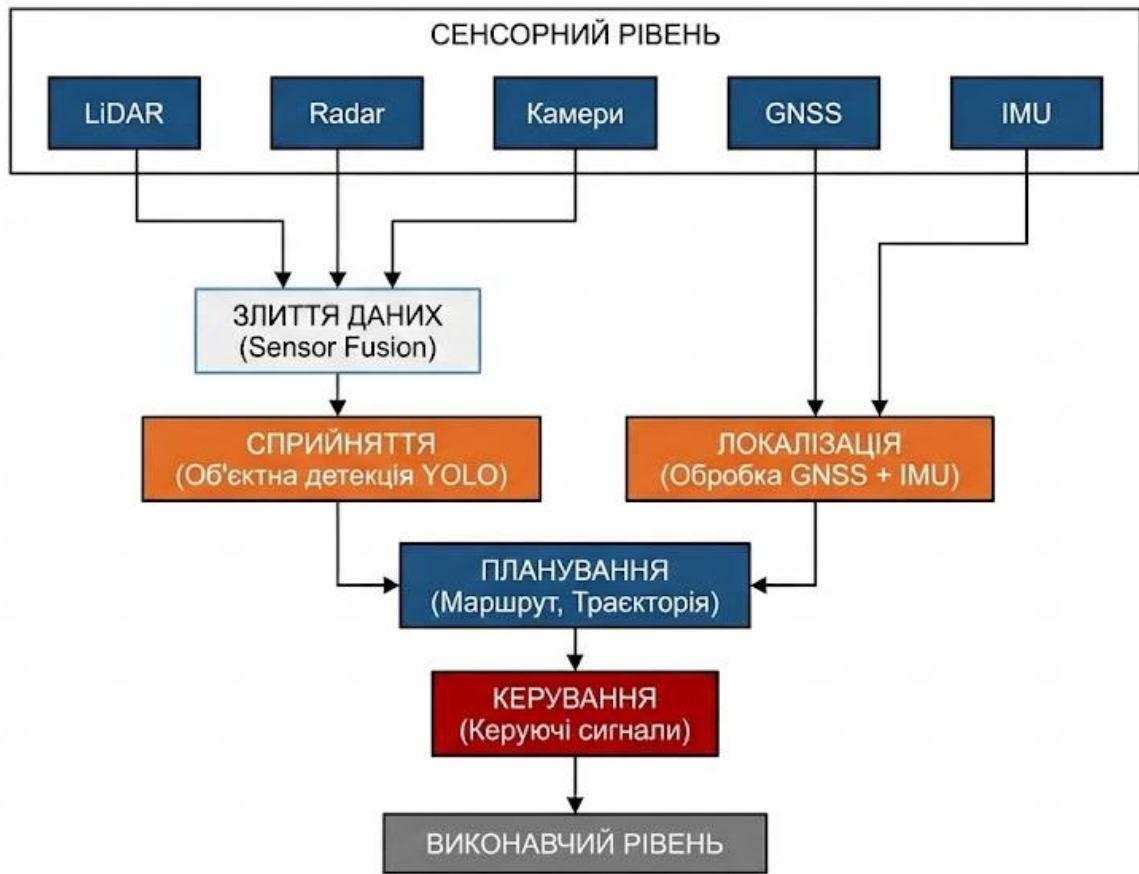


Рисунок 2.3 – Багаторівнева архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Ключовими особливостями запропонованої архітектури є: модульність та масштабованість, розподіл задач між контуром реального часу та високопродуктивним обчислювальним модулем, резервування критичних сенсорів, підтримка режиму відмовостійкості, можливість бездротового оновлення програмного забезпечення. Ефективність системи оцінюється за узагальненим показником швидкодії циклу прийняття рішення, який визначається за формулою 2.1:

$$T_{cycle} = T_{perc} + T_{loc} + T_{plan} + T_{ctrl}, \quad (2.1)$$

де T_{cycle} - загальний час одного циклу прийняття рішення кіберфізичною системою керування транспортним потоком; T_{perc} - час сприйняття середовища, що включає отримання та попередню обробку даних із камер, сенсорів або інших джерел; T_{loc} -

час локалізації та визначення поточного стану об'єктів на перехресті; T_{plan} - час планування керуючого впливу, у межах якого система визначає оптимальний режим роботи світлофорів; T_{ctrl} - час передавання та виконання керуючої команди світлофорним обладнанням. Значення T_{cycle} не повинно перевищувати допустимий інтервал реального часу для міського руху, оскільки затримка в обробці даних може знизити ефективність адаптивного керування світлофорами.

2.3 Проектування апаратної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Проектування апаратної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» є ключовим етапом створення автономної транспортної платформи, оскільки саме апаратне забезпечення визначає можливості обробки даних, швидкодію, надійність та функціональну безпеку системи. Архітектура повинна забезпечувати інтеграцію сенсорних пристроїв, обчислювальних модулів та виконавчих механізмів у єдину систему з підтримкою обробки даних у режимі реального часу. Приклад апаратно-програмної архітектури безпілотного автомобіля представлено на рисунку 2.4 [71].

Обчислювальний модуль є центральним елементом апаратної архітектури, що забезпечує виконання алгоритмів сприйняття, локалізації, планування та керування. У сучасних автономних транспортних засобах використовуються високопродуктивні обчислювальні платформи, які поєднують центральні процесори, графічні процесори та спеціалізовані прискорювачі штучного інтелекту. Така гетерогенна архітектура дозволяє ефективно розподіляти обчислювальні задачі: задачі реального часу виконуються на процесорах із гарантованою латентністю, тоді як ресурсоємні алгоритми комп'ютерного зору та нейронні мережі реалізуються на GPU або AI-акселераторах (рисунки 2.5)[72]. Важливою складовою є також наявність окремого мікроконтролера безпеки, який відповідає за контроль критичних функцій та забезпечує перехід системи у безпечний стан у разі відмови. Зображення обчислювального модуля (Плата-носій

AVerMedia D315, створена для модуля NVIDIA® Jetson AGX Orin™) представлено на рисунку 2.6 [73].



Рисунок 2.4 – Приклад апаратно-програмної архітектури безпілотного автомобіля [71]

Зображення обчислювального модуля (Плата-носії AVerMedia D315, створена для модуля NVIDIA® Jetson AGX Orin™) представлено на рисунку 2.6 [73].

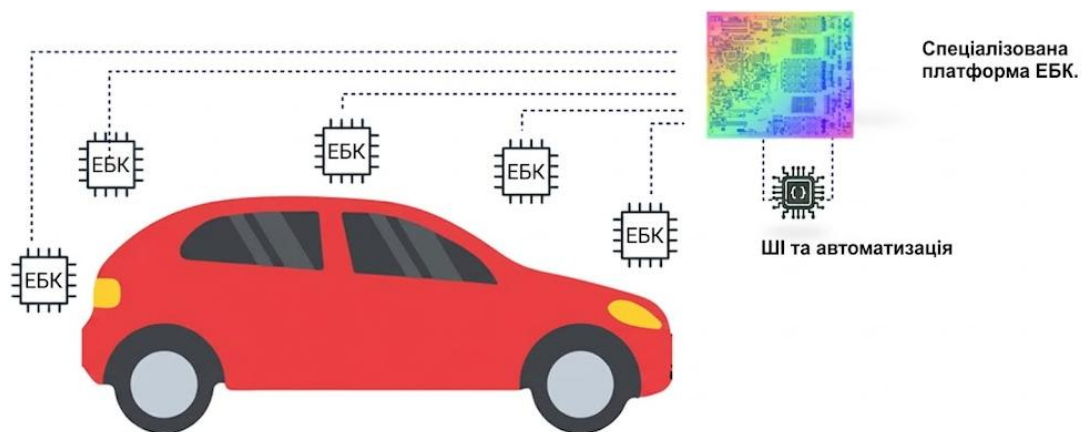


Рисунок 2.5 – Схема гетерогенної архітектури автономного транспортного засобу [72]



Рисунок 2.6 – Плата-носій AVerMedia D315, створена для модуля NVIDIA® Jetson AGX Orin™ [73]

Сенсорна підсистема забезпечує отримання інформації про навколишнє середовище та стан транспортного засобу. Вона формується на основі мультисенсорного підходу, що передбачає використання LiDAR (рисунок 2.7), радарів (рисунок 2.8), відеокамер (рисунок 2.9), супутникових навігаційних систем та інерціальних вимірювальних модулів (рисунок 2.10). LiDAR забезпечує побудову тривимірної моделі простору та визначення геометрії об'єктів, радар використовується для оцінки швидкості та відстані до перешкод, а камери надають семантичну інформацію про дорожню обстановку. GNSS у поєднанні з IMU дозволяє визначати положення та орієнтацію транспортного засобу, що є основою для задач локалізації. Інтеграція цих сенсорів у єдину систему здійснюється за допомогою алгоритмів злиття даних, що підвищує точність та надійність сприйняття середовища [74-77].



Рисунок 2.7 – Зображення сенсора LiDAR безпілотної автомобіля [74]



Рисунок 2.8 – Радіолокаційний приймач-передавач TEF810x [75]



Рисунок 2.9 – Автомобільна стереокамера з технологією обробки зображень [76]

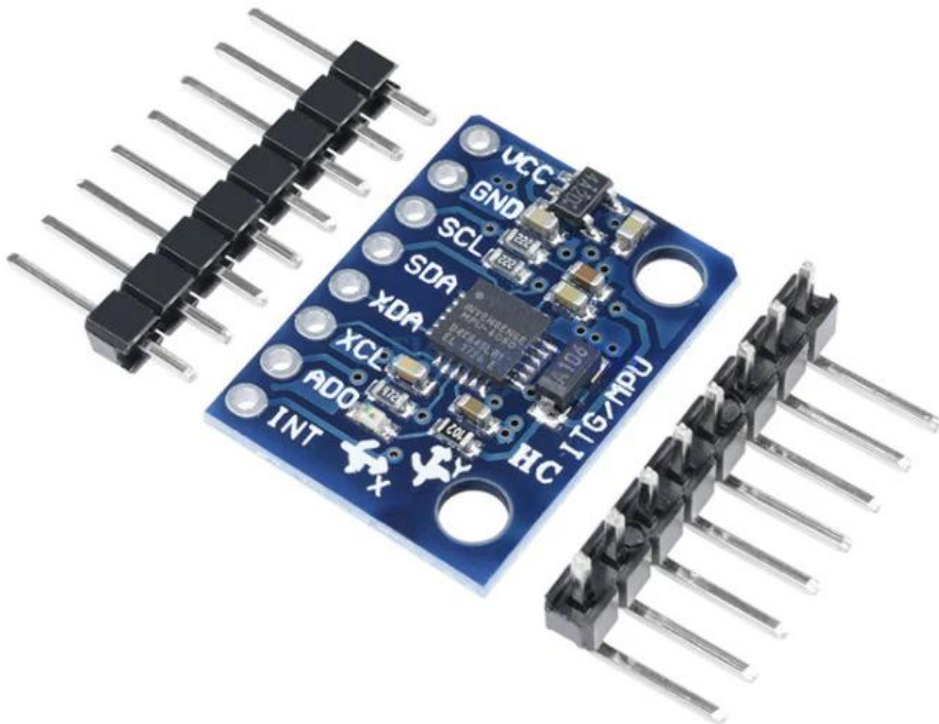


Рисунок 2.10 – Гіроскоп та акселерометр MPU 6050 IMU [77]

Виконавчі механізми забезпечують реалізацію керуючих впливів, сформованих системою керування. До них належать електронні системи керування рульовим механізмом (рисунок 2.11), гальмівною системою (рисунок 2.12) та приводом акселерації (рисунок 2.13). У сучасних транспортних засобах застосовується концепція електронного керування за дротами, що передбачає

передачу керуючих сигналів у цифровій формі без механічного зв'язку між органами керування та виконавчими пристроями. Це дозволяє забезпечити високу точність керування та інтеграцію з автономними системами, а також реалізувати функції резервування та діагностики стану виконавчих елементів [78-80].

Електронне керування рульовим механізмом та гальмівною системою базується на використанні високоточних датчиків зворотного зв'язку, які безперервно відстежують динамічні параметри, такі як фактичний кут повороту коліс або тиск у гальмівних контурах. Замість традиційних механічних чи гідравлічних магістралей, керуючі сигнали від центрального обчислювального модуля надходять до локальних електронних блоків керування (ЕБК), які безпосередньо активують відповідні сервоприводи, крокові електродвигуни чи електромагнітні клапани. Такий розподілений підхід суттєво мінімізує час відгуку апаратної частини на команди планувальника руху, що є критично важливим критерієм для забезпечення безпеки під час маневрування на високих швидкостях або в умовах раптової появи перешкод.



Рисунок 2.11 – Електронна система керування рульовим механізмом [78]

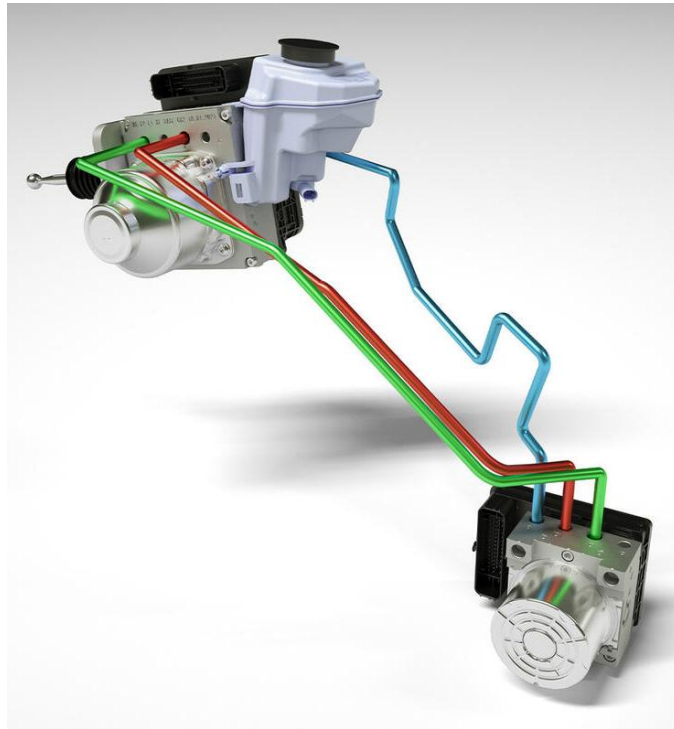


Рисунок 2.12 – Електронна гальмівна система [79]



Рисунок 2.13 – Привід акселерації [80]

Мережеві інтерфейси забезпечують обмін даними між компонентами системи та взаємодію із зовнішньою інфраструктурою. Внутрішня комунікація між

сенсорами, обчислювальними модулями та виконавчими пристроями реалізується за допомогою автомобільних мереж, таких як CAN, FlexRay та автомобільний Ethernet (рисунок 2.14) [81]. Останній забезпечує високошвидкісну передачу великих обсягів даних, необхідних для роботи систем комп'ютерного зору. Для зовнішньої взаємодії використовуються бездротові технології, включаючи 4G/5G, Wi-Fi та V2X, що дозволяє інтегрувати транспортний засіб у інфраструктуру «розумного міста», здійснювати моніторинг, обмін даними та оновлення програмного забезпечення.

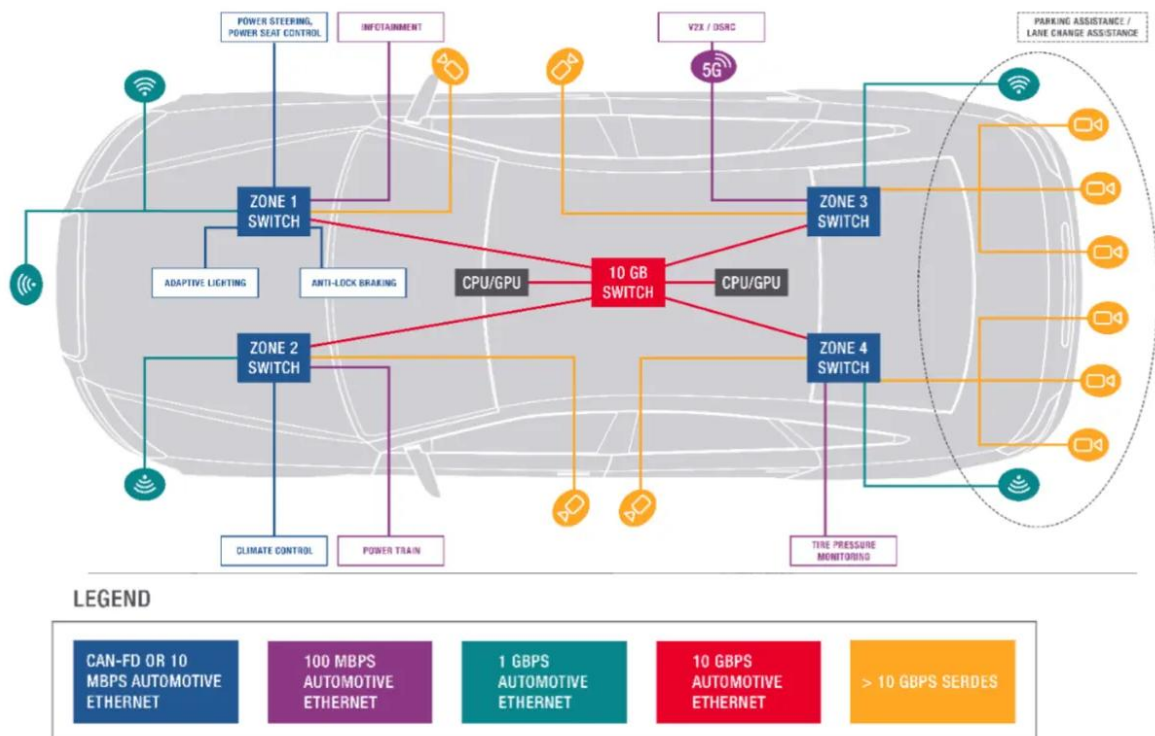


Рисунок 2.14 – Автомобільний Ethernet з іншими бортовими мережами[81]

2.4 Проектування програмної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Програмна архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» визначає логіку обробки даних, взаємодію функціональних модулів та послідовність прийняття рішень у процесі автономного руху. Вона реалізується за модульним принципом, що забезпечує розподіл задач між окремими підсистемами, підвищує

масштабованість та спрощує інтеграцію апаратних компонентів. Основними складовими програмної архітектури є модуль сприйняття, модуль локалізації, модуль планування маршруту та модуль керування рухом, які функціонують у межах єдиного циклу обробки даних у режимі реального часу.

Модуль сприйняття відповідає за аналіз даних, отриманих від сенсорної підсистеми, та формування цифрової моделі навколишнього середовища. У межах цього модуля реалізуються алгоритми комп'ютерного зору, зокрема розпізнавання та класифікація об'єктів дорожньої сцени, розпізнавання дорожньої розмітки, світлофорів та інших елементів інфраструктури. Для задач розпізнавання можуть застосовуватися сучасні нейронні мережі, такі як YOLO, що забезпечують високу швидкодію та точність у режимі реального часу. Додатково здійснюється обробка даних LiDAR і радар для побудови тривимірної карти середовища та визначення геометричних характеристик об'єктів. Результатом роботи модуля є узгоджене представлення сцени, яке передається до наступних підсистем.

Модуль локалізації забезпечує визначення поточного положення та орієнтації транспортного засобу відносно глобальної та локальної систем координат. Для цього використовується інтеграція даних GNSS та IMU з урахуванням похибок вимірювань. Застосування алгоритмів злиття даних, зокрема розширеного фільтра Калмана [82], дозволяє отримати стабільну оцінку стану навіть у складних умовах, таких як міська забудова або тимчасова втрата супутникового сигналу. У поєднанні з даними сенсорів сприйняття та високоточними картами це забезпечує достатню точність позиціонування для безпечного руху транспортного засобу.

Модуль планування маршруту виконує побудову траєкторії руху на основі інформації, отриманої від модулів сприйняття та локалізації. Він враховує геометрію дороги, правила дорожнього руху, динамічні об'єкти та можливі перешкоди. У загальному випадку планування здійснюється у два етапи: глобальне планування, яке визначає оптимальний маршрут між початковою та кінцевою точками, та локальне планування, що формує безпечну траєкторію руху з урахуванням поточної ситуації. Для цього можуть застосовуватися методи

графового пошуку, оптимізації або підходи на основі машинного навчання. Результатом роботи модуля є послідовність точок або траєкторія, що відповідає критеріям безпеки та ефективності.

Модуль керування рухом забезпечує реалізацію сформованої траєкторії шляхом генерації керуючих сигналів для виконавчих механізмів транспортного засобу. Він працює у контурі реального часу та відповідає за стабільність руху, точність слідування траєкторії та адаптацію до змін зовнішніх умов. У межах модуля застосовуються алгоритми керування, які враховують динамічну модель транспортного засобу та обмеження виконавчих систем. Забезпечується також контроль стану системи та можливість переходу в безпечний режим у разі виникнення критичних ситуацій. Алгоритми прогнозування, такі як керування на основі моделей, дозволяють модулю завчасно обчислювати необхідне прискорення та кут повороту коліс, мінімізуючи відхилення від заданого курсу. Це забезпечує плавність маневрування навіть при змінному коефіцієнті зчеплення коліс із дорожнім покриттям або під час руху на ділянках зі складним рельєфом. На рисунку 2.15 представлено структурну схему програмної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі».

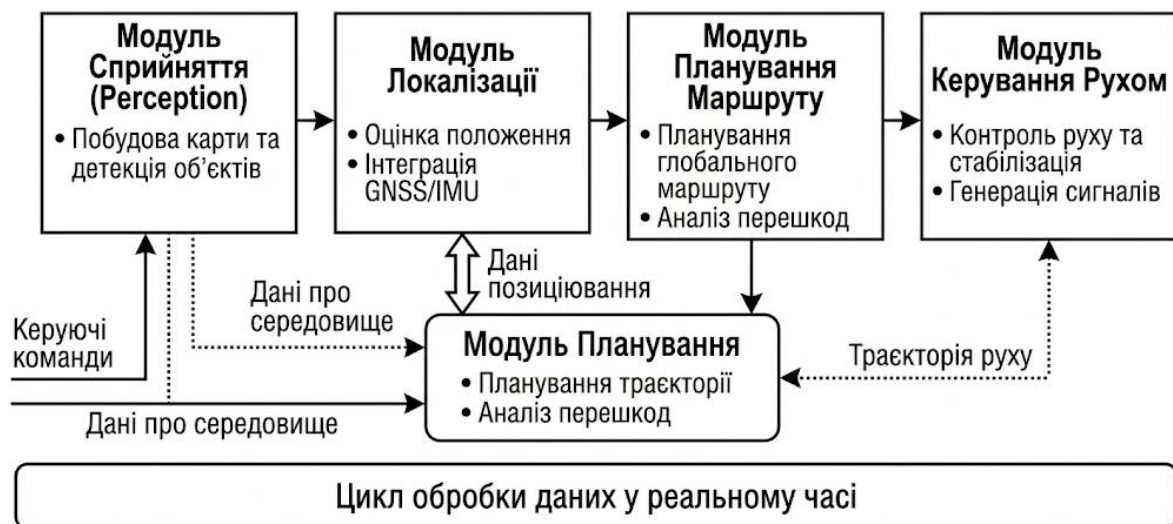


Рисунок 2.15 – Структурна схема програмної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

У таблиці 2.2 представлено відповідність модулів, функцій та алгоритмів програмної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі».

Таблиця 2.2 – Відповідність модулів, функцій та алгоритмів програмної архітектури кіберфізичної системи “Безпілотне таксі”

Модуль	Основні функції	Використовувані алгоритми та підходи
Perception (Сприйняття)	Обробка сенсорних даних, розпізнавання та класифікація об'єктів, розпізнавання розмітки та знаків, побудова сцени	YOLO (розпізнавання об'єктів), Згорткові нейронні мережі (CNN), семантична сегментація, обробка хмари точок (лідара), комплексування даних сенсорів
Localization (Локалізація)	Визначення координат і орієнтації, оцінка швидкості, інтеграція сенсорних даних	Extended Kalman Filter (EKF), IMU + GNSS інтеграція, SLAM, particle filter
Planning (Планування)	Побудова глобального маршруту, генерація локальної траєкторії, уникнення перешкод	Алгоритм A* (A-star), алгоритм Дейкстри, швидкоростучі випадкові дерева (RRT), модельно-прогностичне планування, методи на основі оптимізації
Control (Керування рухом)	Генерація керуючих сигналів, стабілізація руху, слідування траєкторії	PID-регулятори, модельно-прогностичне керування (MPC), керування зі зворотним зв'язком, відстеження траєкторії

Кінець таблиці 2.2

Safety (Безпека)	Моніторинг стану системи; виявлення відмов, аварійне реагування	Виявлення відмов, керування резервуванням, логіка безпеки на основі правил
Communication (Комунікація)	Обмін даними між модулями, зв'язок з хмарою та інфраструктурою	CAN, Ethernet, V2X, MQTT/HTTP, OTA механізми

Представлена таблиця демонструє, що кожен модуль програмної архітектури виконує чітко визначені функції та використовує спеціалізовані алгоритмічні підходи. Найбільш обчислювально складними є модулі сприйняття та планування, тоді як модуль керування працює у жорсткому контурі реального часу. Модулі безпеки та комунікації забезпечують надійність і інтеграцію системи в загальну інфраструктуру.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі розроблено архітектуру кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» з урахуванням сучасних вимог до автономного транспорту та принципів побудови розподілених інтелектуальних систем. Проведено детальне проектування апаратної та програмної складових системи, а також визначено підходи до її інтеграції з хмарною інфраструктурою.

У ході дослідження обґрунтовано вибір апаратної архітектури, що базується на використанні гетерогенного обчислювального модуля, мультисенсорної підсистеми та виконавчих механізмів типу електронного керування за дротами. Визначено роль мережеских інтерфейсів у забезпеченні високошвидкісного обміну даними між компонентами системи та інтеграції транспортного засобу у зовнішнє інформаційне середовище.

Розроблено програмну архітектуру, яка реалізує модульний підхід до обробки даних і включає підсистеми сприйняття, локалізації, планування та керування. Показано, що взаємодія цих модулів утворює замкнений цикл прийняття рішень у режимі реального часу, що є необхідною умовою функціонування автономного транспортного засобу.

Особливу увагу приділено архітектурі взаємодії з хмарною інфраструктурою, яка дозволяє розподілити обчислювальне навантаження між бортовою системою та віддаленими ресурсами, забезпечити централізоване зберігання даних, оновлення програмного забезпечення та моніторинг стану транспортного засобу.

3 МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ»

3.1 Математичне моделювання руху транспортного засобу

Математичне моделювання руху транспортного засобу є необхідною складовою розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», оскільки дозволяє формалізувати динаміку руху, забезпечити розробку алгоритмів керування та оцінити поведінку системи в різних умовах експлуатації. Модель руху використовується у підсистемах планування траєкторії, локалізації та керування, забезпечуючи узгодженість їх роботи.

Для опису руху транспортного засобу застосовується кінематична модель, яка є достатньо точною для задач низькошвидкісного міського руху та водночас не потребує складних обчислень. Вона базується на представленні автомобіля як жорсткого тіла, що рухається у площині.

Положення транспортного засобу задається вектором стану, який можна описати за формулою 3.1:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ v \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

де x, y - координати центру мас транспортного засобу, θ - кут орієнтації відносно осі координат, v - лінійна швидкість руху.

Рух транспортного засобу описується системою диференціальних рівнянь (3.2) $\dot{x} = v \cos \theta$, $\dot{y} = v \sin \theta$:

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \delta, \quad (3.2)$$

де L - колісна база автомобіля, δ - кут повороту передніх коліс, a - поздовжнє прискорення.

Дана модель відома як «велосипедна модель», схематичне зображення якої представлено на рисунку 3.1, широко використовується в задачах автономного керування завдяки своїй простоті та достатній точності для більшості практичних сценаріїв. Для використання у цифрових системах керування модель дискретизується з кроком Δt (рівняння 3.3):

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \frac{v_k}{L} \tan \delta_k \Delta t, \quad (3.3)$$

де θ_{k+1} – прогнозований кут орієнтації транспортного засобу на наступному кроці; θ_k – поточний кут орієнтації; v_k – швидкість руху; L – база транспортного засобу; δ_k – кут повороту керованих коліс; Δt – крок дискретизації часу. Формула показує, як змінюється напрям руху транспортного засобу залежно від його швидкості, геометричних параметрів і кута повороту коліс.

Дискретна форма моделі дозволяє використовувати її в алгоритмах чисельного інтегрування, фільтрації та керування в реальному часі. Для більш точного опису руху в умовах високих швидкостей або складних маневрів може застосовуватися динамічна модель, яка враховує сили, що діють на транспортний засіб, зокрема сили тертя, інерції та бокового ковзання. Однак у межах даної роботи використання кінематичної моделі є достатнім, оскільки основною областю застосування є міське середовище з обмеженою швидкістю руху. Отримана математична модель використовується як основа для розробки алгоритмів планування траєкторії та керування рухом транспортного засобу. Вона дозволяє прогнозувати положення транспортного засобу на наступних кроках часу, що є необхідним для забезпечення безпечного та стабільного автономного руху. Для врахування обчислювальних обмежень бортової системи інтегрування кінематичних рівнянь зазвичай виконується з кроком дискретизації Δt , що забезпечує баланс між точністю прогнозу траєкторії та швидкістю прийняття рішень. Такий підхід дозволяє ефективно реалізувати методи лінеаризації моделі в околі поточної робочої точки, що є базовою вимогою для стабільної роботи ПД-

регуляторів або лінійно-квадратичних контролерів у замкненому контурі керування.

На рисунку 3.1 представлено розширену кінематичну модель руху транспортного засобу, яка враховує геометрію повороту та траєкторію руху. Транспортний засіб апроксимується двоколісною моделлю, де задня точка визначає положення (x,y) , а напрямок руху задається кутом орієнтації θ .

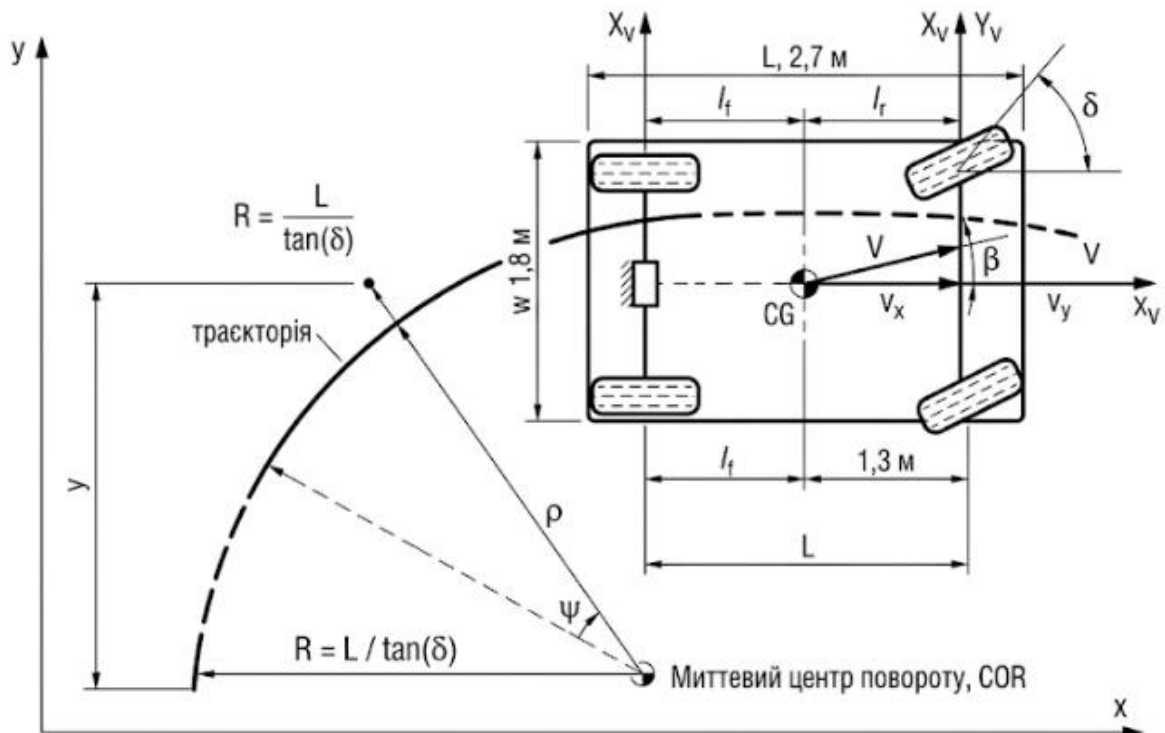


Рисунок 3.1 – Кінематична модель руху транспортного засобу з радіусом повороту

Переднє колесо повертається на кут δ , що формує криволінійну траєкторію руху. Центр обертання знаходиться на відстані R від транспортного засобу, а траєкторія руху описується дугою кола.

Радіус повороту визначається співвідношенням 3.4:

$$R = \frac{L}{\tan \delta'} \quad (3.4)$$

де L - колісна база транспортного засобу.

Наявність радіуса повороту дозволяє геометрично інтерпретувати зміну напрямку руху та використовується при побудові траєкторій у задачах автономного керування.

3.2 Імітаційне моделювання роботи кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Імітаційне моделювання є важливим етапом дослідження кіберфізичних систем, що дозволяє перевірити працездатність алгоритмів, оцінити поведінку системи в різних умовах та мінімізувати ризики при подальшій реалізації. У контексті розробки системи «Безпілотне таксі» імітаційне моделювання використовується для аналізу взаємодії підсистем сприйняття, локалізації, планування та керування в умовах, наближених до реальних. Метою імітаційного моделювання є оцінка ефективності запропонованої архітектури та алгоритмів керування, а також перевірка виконання вимог до швидкодії, точності локалізації та безпечності руху транспортного засобу. Моделювання дозволяє відтворювати різноманітні сценарії руху, включаючи рух у міському середовищі, появу перешкод, зміну траєкторії та вплив зовнішніх факторів. Імітаційна модель побудована на основі кінематичної моделі транспортного засобу, розглянутої у підрозділі 3.1. Вхідними параметрами моделі є керуючі сигнали, а саме кут повороту передніх коліс та поздовжнє прискорення, а вихідними - координати, швидкість та орієнтація транспортного засобу. Використання спеціалізованих середовищ симуляції дозволяє додатково інтегрувати в модель фізичні параметри сенсорів, такі як шум GPS-приймача або затримки передачі даних по мережі 4G/5G, що забезпечує високу достовірність отриманих результатів. Це дає змогу провести стрес-тестування системи в критичних сценаріях, які було б небезпечно або дорого відтворювати на реальному полігоні, наприклад, при раптовій відмові одного з виконавчих механізмів. Таким чином, імітаційне моделювання стає фундаментом для верифікації програмного забезпечення перед його розгортанням на бортовому комп'ютері прототипу, гарантуючи відповідність розроблених алгоритмів вимогам

кібербезпеки та функціональної надійності. Такий підхід дозволяє відтворити процес руху у дискретному часі та реалізувати алгоритми керування у вигляді програмних модулів. У межах моделювання реалізовано програмну структуру, що відповідає архітектурі системи, описаній у розділі 2. На кожному кроці часу виконується послідовність операцій: обробка сенсорних даних, оцінка положення транспортного засобу, формування траєкторії руху та генерація керуючих сигналів. Таким чином, імітаційна модель відтворює повний цикл функціонування кіберфізичної системи в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє відтворити процес руху у дискретному часі та реалізувати алгоритми керування у вигляді програмних модулів. У межах моделювання реалізовано програмну структуру, що відповідає архітектурі системи, описаній у розділі 2. На кожному кроці часу виконується послідовність операцій: обробка сенсорних даних, оцінка положення транспортного засобу, формування траєкторії руху та генерація керуючих сигналів. Таким чином, імітаційна модель відтворює повний цикл функціонування кіберфізичної системи в режимі реального часу. Для оцінки ефективності роботи системи використовуються такі показники:

- точність слідування заданій траєкторії;
- похибка локалізації;
- час реакції системи на зміну умов руху;
- мінімальна відстань до перешкод.

На рисунку 3.2 представлено результати імітаційного моделювання процесу слідування транспортного засобу заданій траєкторії (використано еталонну траєкторію - коло). З рисунку видно, що фактична траєкторія руху наближено повторює еталонну, що свідчить про коректність роботи алгоритмів планування та керування. Наявні відхилення зумовлені впливом шумів та обмежень моделі.

На рисунку 3.3 наведено графік зміни похибки слідування траєкторії у часі. Після початкового етапу система виходить на стабільний режим, у якому похибка коливається в допустимих межах. Це підтверджує стійкість системи та її здатність компенсувати відхилення.

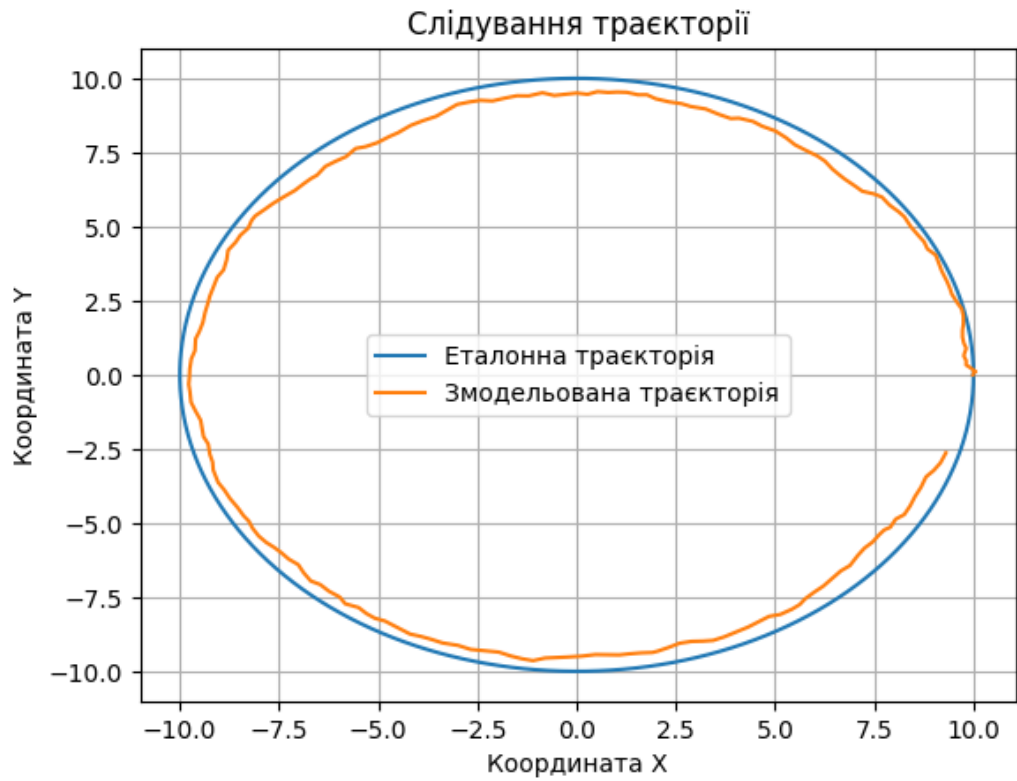


Рисунок 3.2 – Слідування транспортного засобу еталонній траєкторії

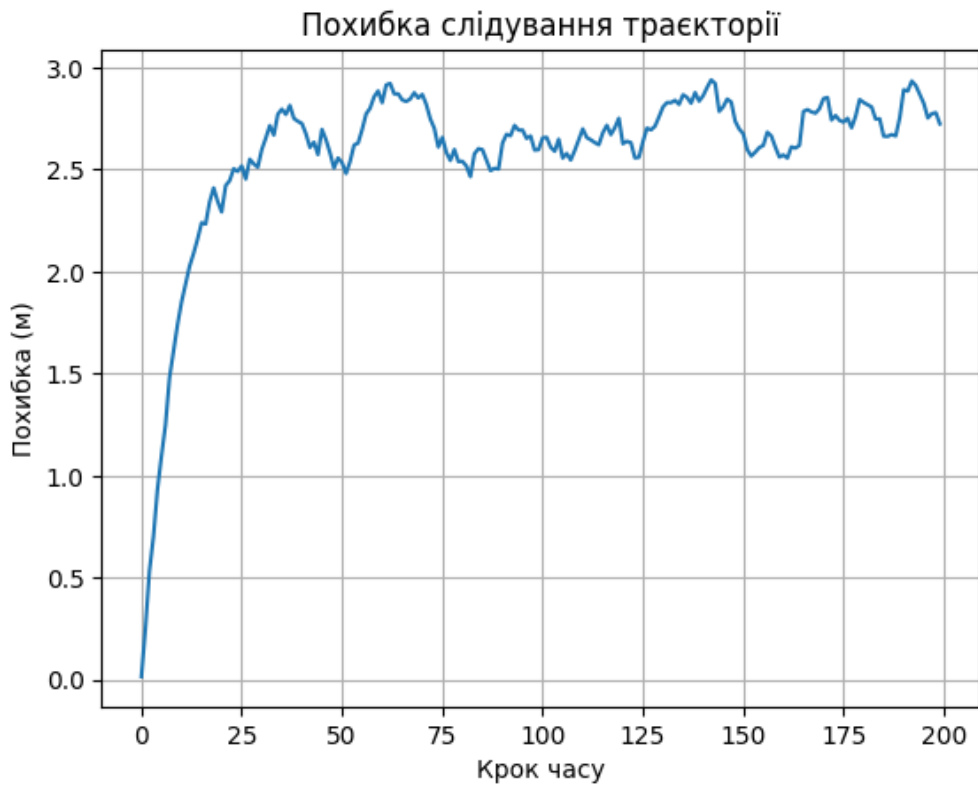


Рисунок 3.3 – Залежність похибки слідування траєкторії від часу

Результати імітаційного моделювання наведено на рисунках 3.2–3.3 та в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати імітаційного моделювання руху транспортного засобу за заданою траєкторією

Показник	Значення
Середня похибка	2.58 м
Максимальна похибка	2.97 м
Мінімальна похибка	0.13 м

У межах другого експерименту було змодельовано ситуацію появи статичної перешкоди на шляху руху транспортного засобу. Результати показали, що система здатна своєчасно виявляти перешкоду та формувати альтернативну траєкторію руху, що забезпечує її обхід із збереженням безпечної дистанції.

На рисунку 3.4 представлено результати імітаційного моделювання руху транспортного засобу в умовах наявності статичної перешкоди. Еталонна траєкторія проходить через область розташування перешкоди, що робить її небезпечною для виконання. У процесі моделювання реалізовано алгоритм уникнення перешкод, який забезпечує відхилення транспортного засобу від початкової траєкторії при наближенні до небезпечної зони. Як видно з рисунка, транспортний засіб формує обхідну траєкторію, після чого повертається до заданого маршруту. Отримані результати підтверджують здатність системи адаптуватися до змін середовища та забезпечувати безпечний рух за наявності перешкод. При цьому величина бічного відхилення та радіуси кривизни згенерованої траєкторії повністю відповідають встановленим обмеженням на динаміку та плавність маневрування.

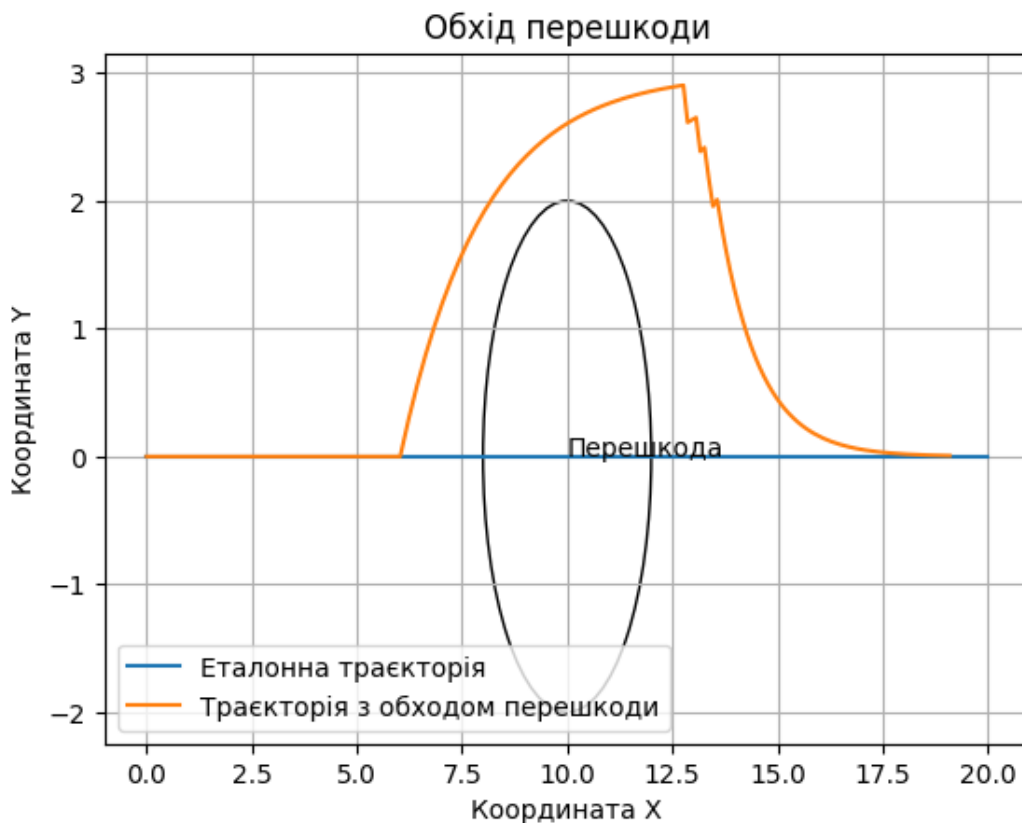


Рисунок 3.4 – Обхід перешкоди транспортним засобом

Аналіз отриманих даних показує, що транспортний засіб здатний слідувати заданій траєкторії з допустимим рівнем похибки. Після початкового перехідного процесу система виходить на стабільний режим роботи, що підтверджує ефективність реалізованих алгоритмів керування.

Отримані значення похибки свідчать про можливість застосування запропонованої моделі для задач автономного керування в умовах міського середовища. Водночас результати моделювання вказують на необхідність подальшого вдосконалення алгоритмів з метою зменшення похибки та підвищення точності руху. Результати моделювання показують, що запропонована архітектура забезпечує стабільний рух транспортного засобу за заданою траєкторією та адекватну реакцію на зміну середовища. При цьому забезпечується прийнятний рівень точності локалізації та виконуються вимоги до швидкодії системи. Важливою перевагою імітаційного моделювання є можливість тестування системи в умовах, які складно або небезпечно відтворити в реальному середовищі, зокрема

при виникненні аварійних ситуацій або відмов окремих компонентів. Це дозволяє перевірити роботу алгоритмів безпеки та оцінити стійкість системи до зовнішніх впливів.

3.3 Порівняння алгоритмів керування PID та MPC

У процесі розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» важливим етапом є вибір ефективного алгоритму керування рухом транспортного засобу. Найбільш поширеними підходами є класичний PID-регулятор та сучасний метод прогнозуючого керування MPC. PID-регулятор базується на обчисленні керуючого сигналу як функції похибки, її інтегралу та похідної. Його перевагами є простота реалізації, низькі обчислювальні вимоги та висока швидкодія. Водночас PID-регулятор має обмежену здатність враховувати обмеження системи та прогнозувати майбутню поведінку транспортного засобу.

На відміну від PID, MPC використовує математичну модель руху транспортного засобу для прогнозування його стану на декілька кроків вперед. На кожному кроці часу вирішується задача оптимізації, яка мінімізує відхилення від заданої траєкторії з урахуванням обмежень на керуючі сигнали та стан системи. Це дозволяє досягти більш точної та стабільної поведінки системи, особливо в складних умовах руху. Результати порівняння алгоритмів PID та MPC наведені у таблиці 3.2. Враховуючи зазначені особливості, для контуру поздовжнього керування швидкістю доцільно використовувати класичний PID-регулятор через його простоту та швидкодію. Водночас для контуру бічного керування та точного утримання смуги руху перевагу віддано методу MPC, який ефективно компенсує затримки в контурі виконання команд. Такий комбінований підхід дозволяє досягти оптимального балансу між обчислювальною складністю бортового програмного забезпечення та безпекою маневрування автономного транспортного засобу. Крім того, імітаційне моделювання обох алгоритмів підтвердило, що метод MPC забезпечує значно менше середньоквадратичне відхилення від заданої траєкторії під час виконання різких поворотів.

Таблиця 3.2 – Порівняння алгоритмів PID та MPC

Критерій	PID-регулятор	MPC
Принцип роботи	Реактивне керування (на основі похибки)	Прогнозуюче керування
Обчислювальна складність	Низька	Висока
Врахування обмежень	Обмежене	Повне врахування
Точність слідування траєкторії	Середня	Висока
Стійкість до збурень	Обмежена	Висока
Використання моделі	Необов'язкове	Обов'язкове
Придатність для реального часу	Висока	Залежить від ресурсів

У межах імітаційного моделювання встановлено, що PID-регулятор забезпечує задовільну якість керування при простих траєкторіях та невисоких швидкостях руху. Однак у складних сценаріях, таких як різкі маневри або обхід перешкод, його ефективність знижується через відсутність механізму прогнозування.

Алгоритм MPC, у свою чергу, демонструє кращі результати за рахунок урахування динаміки транспортного засобу та можливості оптимізації траєкторії в реальному часі. Це дозволяє зменшити похибку слідування та забезпечити більш плавний і безпечний рух.

Таким чином, для задач автономного керування транспортним засобом у складі кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» доцільним є використання алгоритмів типу MPC, особливо в умовах складного міського середовища.

Водночас PID-регулятори можуть застосовуватися як базові або допоміжні компоненти системи керування завдяки своїй простоті та швидкодії.

3.4 Реалізація сенсорної підсистеми кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Сенсорна підсистема є ключовим компонентом кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», оскільки забезпечує отримання інформації про навколишнє середовище та стан транспортного засобу. Від точності та надійності її роботи безпосередньо залежить ефективність функціонування підсистем сприйняття, локалізації та планування.

Реалізація сенсорної підсистеми базується на мультисенсорному підході, який передбачає використання кількох типів датчиків з різними фізичними принципами дії. Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих сенсорів і підвищити загальну достовірність отриманої інформації. До складу сенсорної підсистеми входять відеокамери, LiDAR, радар, а також навігаційні датчики GNSS та IMU. Камери забезпечують отримання візуальної інформації та використовуються для розпізнавання об'єктів дорожнього середовища, дорожньої розмітки та сигналів світлофора. LiDAR формує тривимірну модель простору, що дозволяє визначати відстань до об'єктів та їх геометричні характеристики. Радар використовується для визначення швидкості та положення об'єктів, особливо в умовах обмеженої видимості. GNSS та IMU забезпечують визначення координат, швидкості та орієнтації транспортного засобу. Інтеграція сенсорів здійснюється шляхом синхронізації даних у часі та приведення їх до єдиної системи координат. Для цього використовуються процедури калібрування, які включають визначення взаємного розташування сенсорів та їх параметрів. Просторова калібровка дозволяє узгодити координатні системи датчиків, а часова - забезпечити коректне поєднання даних, отриманих у різні моменти часу.

У процесі реалізації сенсорної підсистеми важливим етапом є попередня обробка даних, яка включає фільтрацію шумів, нормалізацію сигналів та виділення

корисної інформації. Для відеоданих це може бути корекція освітлення та масштабування зображення, для LiDAR - фільтрація точок та сегментація, для IMU, відповідно, компенсація дрейфу. Подальша обробка даних виконується у модулі злиття сенсорної інформації, який формує узгоджене представлення навколишнього середовища. Застосування алгоритмів злиття дозволяє підвищити точність визначення положення об'єктів та зменшити вплив похибок окремих сенсорів.

На рисунку 3.5 представлено архітектуру злиття сенсорних даних у складі кіберфізичної системи «Безпілотне таксі». Дані від різних сенсорів, зокрема камер, LiDAR, радарів та навігаційних модулів GNSS/IMU, надходять до центрального модуля обробки сенсорів.

У цьому модулі виконується інтеграція даних із різних джерел з урахуванням їх часових та просторових характеристик. Результатом є узгоджене представлення навколишнього середовища, яке передається до підсистем сприйняття та локалізації. Застосування підходу злиття сенсорних даних дозволяє підвищити точність визначення положення об'єктів, зменшити вплив шумів та забезпечити стійкість системи до відмов окремих сенсорів. Важливою вимогою до сенсорної підсистеми є забезпечення роботи в режимі реального часу. Для цього реалізується паралельна обробка даних із використанням багатопотокових обчислень та апаратного прискорення. Крім того, передбачено механізми резервування сенсорів, що дозволяє підтримувати працездатність системи у разі відмови окремих компонентів. Аналіз похибок вимірювань різних датчиків дозволяє динамічно коригувати вагові коефіцієнти кожного джерела інформації залежно від поточних погодних та дорожніх умов. Наприклад, у випадку погіршення видимості пріоритет автоматично зміщується з оптичних камер на радарні та лідарні системи. Таке гнучке керування потоками даних гарантує формування безперервної та достовірної моделі простору, необхідної для безпечного планування траєкторії руху безпілотного автомобіля.

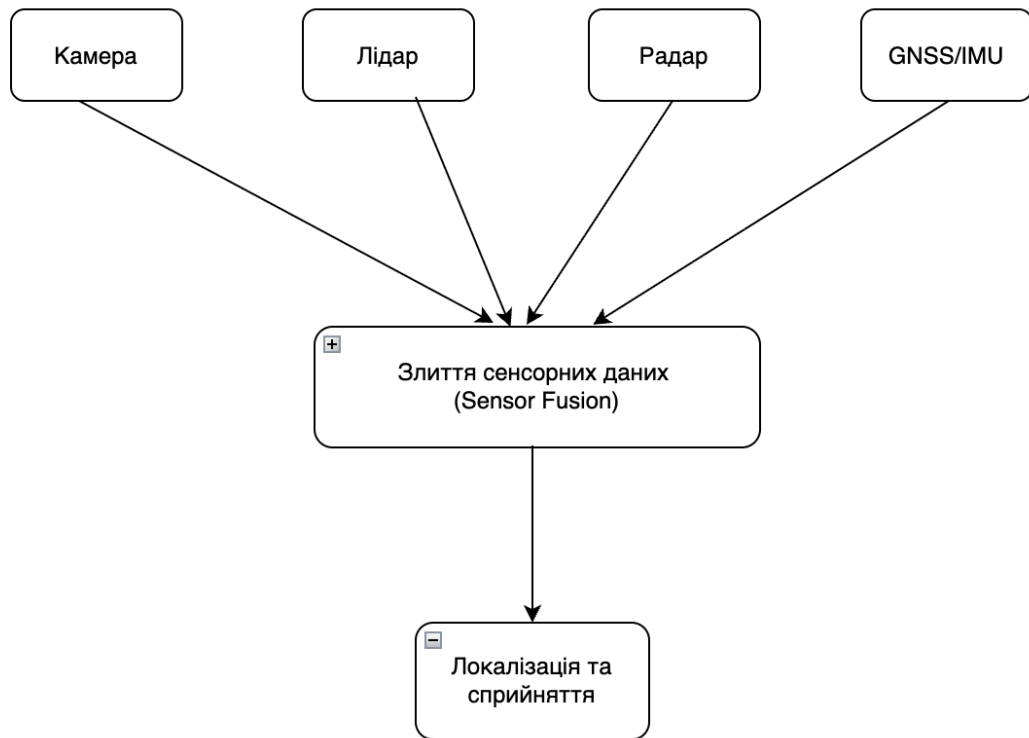


Рисунок 3.5 – Архітектура злиття сенсорних даних

3.5 Реалізація алгоритму локалізації на основі розширеного фільтра Калмана (ЕКФ)

Локалізація транспортного засобу є однією з ключових задач кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», оскільки від точності визначення координат і орієнтації залежить ефективність роботи підсистем планування та керування. У даній роботі для вирішення задачі локалізації використано розширений фільтр Калмана, який дозволяє поєднувати дані від різних сенсорів і отримувати узгоджену оцінку стану системи.

На рисунку 3.6 представлено розширену архітектуру злиття сенсорних даних у кіберфізичній системі «Безпілотне таксі». Дані від різних сенсорів, зокрема камер, LiDAR, радарів та навігаційних модулів GNSS/IMU, надходять до блоку попередньої обробки, де виконуються фільтрація шумів та синхронізація у часі. Після цього оброблені дані передаються до модуля злиття сенсорної інформації, реалізованого на основі розширеного фільтра Калмана. У цьому модулі

здійснюється оцінка стану транспортного засобу, яка включає визначення координат, швидкості та орієнтації.

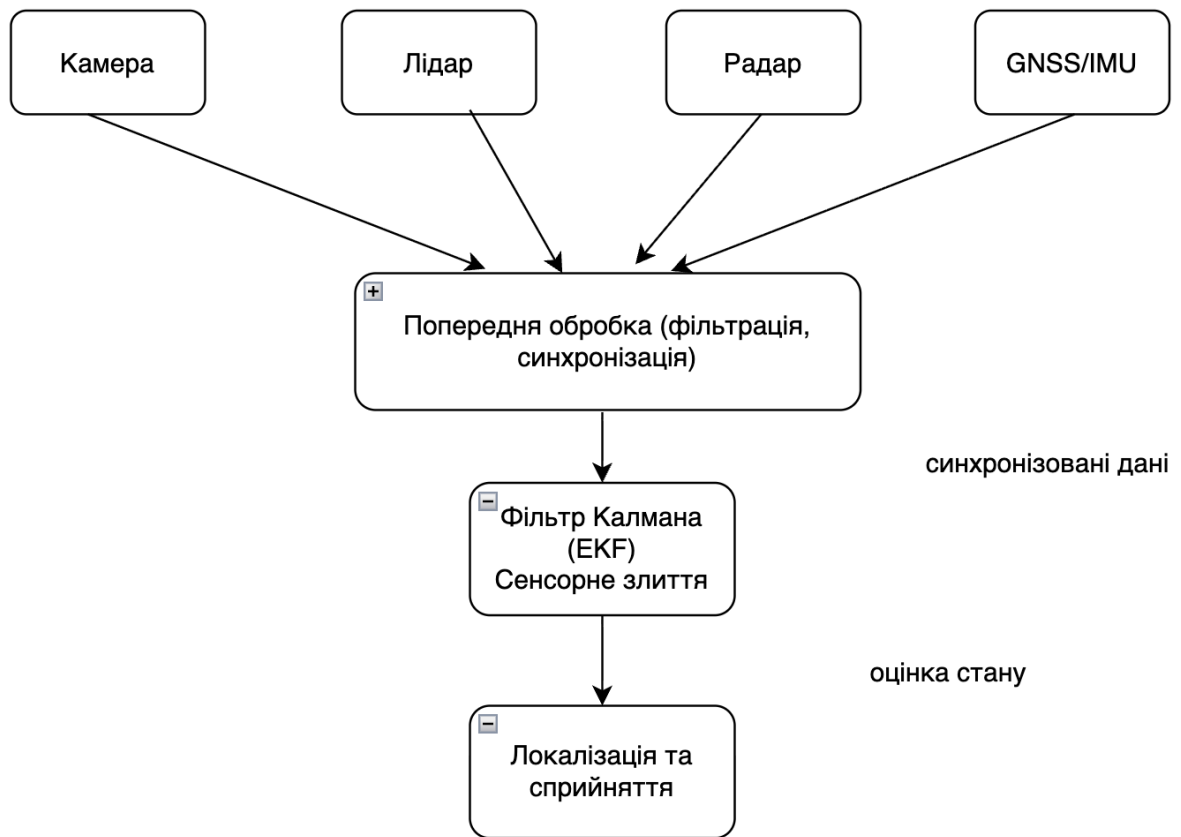


Рисунок 3.6 – Розширена архітектура злиття сенсорних даних з використанням фільтра Калмана (ЕКФ)

Результатом роботи системи є узгоджене представлення стану транспортного засобу та навколишнього середовища, що передається до підсистем сприйняття та локалізації для подальшої обробки. Розширений фільтр Калмана є рекурсивним алгоритмом оцінювання стану динамічної системи, який враховує як математичну модель руху, так і вимірювання, отримані від сенсорів. Його особливістю є можливість роботи з нелінійними моделями шляхом їх лінеаризації.

Алгоритм ЕКФ складається з двох основних етапів: прогнозування та корекції. На етапі прогнозування використовується математична модель руху транспортного засобу, яка дозволяє оцінити стан системи на наступний момент часу (формула 3.5):

$$x_{k|k-1} = f(x_{k-1}, u_k), \quad (3.5)$$

де u_k - керуючі впливи (кут повороту та прискорення).

Одночасно обчислюється матриця коваріації похибки (формула 3.6):

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1} F_k^T + Q, \quad (3.6)$$

де F_k - матриця Якобі функції переходу, Q - матриця шуму процесу.

На етапі корекції використовуються вимірювання від сенсорів, представлене формулою 3.7:

$$z_k = h(x_k) + v_k, \quad (3.7)$$

де z_k - вектор вимірювань (GNSS, IMU), v_k - шум вимірювання.

Оновлення оцінки стану здійснюється за допомогою коефіцієнта Калмана (формула 3.8):

$$K_k = P(k|k-1) H_k^T \left(H_k P(k|k-1) H_k^T + R \right)^{-1}, \quad (3.8)$$

де H_k - матриця Якобі функції вимірювання, R - матриця шуму вимірювань.

Оновлений стан визначається як $x_k = x_{k|k-1} + K_k(z_k - h(x_{k|k-1}))$. Таким чином, алгоритм ЕКФ дозволяє поєднувати прогноз, отриманий на основі моделі руху, з реальними вимірюваннями сенсорів, що забезпечує більш точну та стійку оцінку стану транспортного засобу. У межах даної роботи реалізація ЕКФ інтегрована в модуль злиття сенсорних даних, що дозволяє об'єднати інформацію від GNSS та IMU, а також врахувати динамічну модель руху. Це забезпечує стабільну локалізацію навіть у випадках часткової втрати сигналу або наявності шумів у вимірюваннях. Перевагами використання ЕКФ є:

- підвищення точності локалізації;
- стійкість до шумів сенсорів;
- можливість роботи в реальному часі;

– інтеграція з різними типами датчиків.

Таким чином, застосування розширеного фільтра Калмана дозволяє забезпечити надійну та точну локалізацію транспортного засобу, що є критично важливим для функціонування кіберфізичної системи «Безпілотне таксі».

Основні параметри розширеного фільтра Калмана представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні параметри розширеного фільтра Калмана

Позначення	Назва	Призначення	Особливості вибору
x	Вектор стану	Описує стан системи (координати, швидкість, орієнтація)	Визначається моделлю руху
P	Матриця коваріації	Характеризує невизначеність оцінки стану	Ініціалізується великою для невідомого стану
Q	Матриця шуму процесу	Враховує неточність математичної моделі	Залежить від динаміки руху
R	Матриця шуму вимірювань	Враховує похибки сенсорів	Визначається характеристиками датчиків
F	Матриця Якобі (перехід)	Лінеаризація моделі руху	Обчислюється на кожному кроці
H	Матриця Якобі (вимірювання)	Лінеаризація моделі вимірювання	Залежить від типу сенсорів
K	Коефіцієнт Калмана	Визначає вагу між прогнозом і вимірюванням	Адаптивно змінюється

Кінець таблиці 3.3

z	Вектор вимірювань	Дані від сенсорів (GNSS, IMU)	Містить шум
u	Керуючі впливи	Вхідні сигнали (кут повороту, прискорення)	Формуються модулем керування

Параметри розширеного фільтра Калмана визначають точність та стабільність роботи алгоритму локалізації. Особливо важливим є правильний вибір матриць шуму процесу Q та вимірювань R , оскільки вони визначають баланс між довірою до математичної моделі та даних сенсорів. Зменшення значень матриці R призводить до більшої довіри до вимірювань, тоді як збільшення Q враховує більшу невизначеність моделі руху. Оптимальний підбір цих параметрів є важливим завданням при практичній реалізації системи.

Реалізація алгоритму локалізації на основі розширеного фільтра Калмана може бути представлена у вигляді псевдокоду (алгоритм 3.1), що відображає основні етапи обробки даних. Алгоритм включає фазу прогнозування стану системи на основі математичної моделі руху та фазу корекції, у якій використовується інформація від сенсорів.

На кожному кроці часу виконується оновлення оцінки стану транспортного засобу та матриці коваріації похибки, що дозволяє враховувати як динаміку системи, так і невизначеність вимірювань. Такий підхід забезпечує адаптивність алгоритму до змін умов середовища та наявності шумів у даних. Для забезпечення збіжності фільтра в умовах нелінійної динаміки обчислюється матриця Якобі, яка лінеаризує функцію переходу станів у кожній поточній точці траєкторії. Це дозволяє коректно трансформувати еліпсоїд невизначеності при переході від попереднього кроку до прогнозованого, запобігаючи накопиченню похибки при виконанні складних маневрів. Крім того, впровадження процедури перевірки вимірювань за відстанню Махаланобіса дозволяє алгоритму ігнорувати аномальні викиди в даних сенсорів, які можуть виникати через короточасні перешкоди або

багатопротеневе поширення сигналів GPS. Таким чином, розширений фільтр Калмана формує стійкий вектор стану, що стає надійним фундаментом для подальшої роботи модулів планування та прийняття рішень у системі автономного керування.

Алгоритм 3.1 – Псевдокод алгоритму реалізації розширеного фільтра Калмана

Вхід:

x_0 – початковий стан системи

P_0 – початкова матриця коваріації

Q – матриця шуму процесу R – матриця шуму вимірювань

Для кожного кроку часу k виконується:

1. ПРОГНОЗУВАННЯ:

$x_{pred} = f(x_{prev}, u_k)$

$F = \text{Jacobian}(f)$ за x

$P_{pred} = F * P_{prev} * F^T + Q$

2. ОТРИМАННЯ ВИМІРЮВАНЬ:

z_k – дані від сенсорів

3. КОРЕКЦІЯ:

$H = \text{Jacobian}(h)$ за x

$y = z_k - h(x_{pred})$

$S = H * P_{pred} * H^T + R$

$K = P_{pred} * H^T * S^{-1}$

$x_{new} = x_{pred} + K * y$

$P_{new} = (I - K * H) * P_{pred}$

4. ПЕРЕХІД ДО НАСТУПНОГО КРОКУ:

$x_{prev} = x_{new}$

$P_{prev} = P_{new}$

3.6 Інтеграція модулів у єдину кіберфізичну систему

Інтеграція функціональних модулів є завершальним етапом розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», що забезпечує узгоджену роботу всіх підсистем у межах єдиної архітектури. Основною метою інтеграції є об'єднання модулів сприйняття, локалізації, планування та керування в єдиний цикл обробки даних у режимі реального часу.

Запропонована система реалізує багаторівневу архітектуру (рисунок 3.8), у якій кожен модуль виконує окремі функції, але взаємодіє з іншими через стандартизовані інтерфейси. Дані від сенсорної підсистеми надходять до модуля сприйняття, де формується модель навколишнього середовища. Паралельно модуль локалізації, використовуючи алгоритм розширеного фільтра Калмана, визначає поточний стан транспортного засобу.

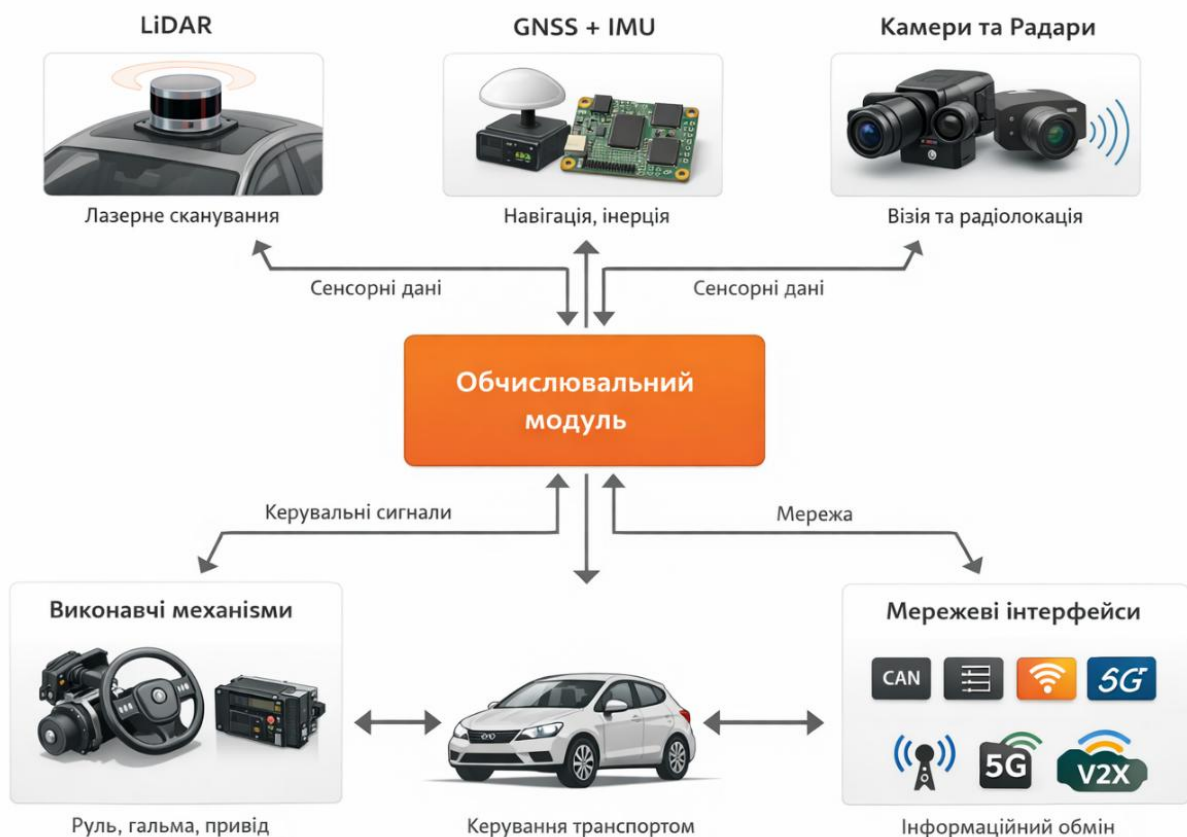


Рисунок 3.7 – Багаторівнева архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Отримана інформація передається до модуля планування, який формує безпечну траєкторію руху з урахуванням дорожньої обстановки та динамічних обмежень. Далі модуль керування генерує керуючі сигнали для виконавчих механізмів, забезпечуючи слідування транспортного засобу заданій траєкторії. Інтеграція модулів реалізується за принципом потокової обробки даних, де результати роботи одного модуля є вхідними даними для наступного. Такий підхід забезпечує безперервність обробки інформації та дозволяє реалізувати замкнений контур керування. Для забезпечення синхронізації роботи модулів використовується дискретний часовий цикл, у межах якого всі підсистеми виконують свої обчислення. Це дозволяє уникнути розбіжностей у часі обробки даних та забезпечити коректність взаємодії між компонентами системи.

Важливим аспектом інтеграції є забезпечення обміну даними між модулями. Для цього використовуються внутрішні програмні інтерфейси, що дозволяють передавати інформацію у стандартизованому форматі. Такий підхід забезпечує масштабованість системи та можливість заміни окремих модулів без зміни загальної архітектури. У процесі інтеграції також враховуються вимоги до надійності та відмовостійкості системи. Передбачено механізми моніторингу стану модулів та обробки помилок, що дозволяє виявляти відхилення у роботі та забезпечувати перехід системи у безпечний режим у разі виникнення критичних ситуацій. Результати імітаційного моделювання підтверджують, що інтегрована система забезпечує узгоджену роботу всіх модулів та стабільне функціонування у різних сценаріях руху. Це свідчить про правильність обраних архітектурних рішень та ефективність реалізованого підходу до інтеграції. Таким чином, інтеграція модулів у єдину кіберфізичну систему дозволяє забезпечити повний цикл автономного керування транспортним засобом - від сприйняття середовища до формування керуючих впливів. Отримана система є масштабованою, адаптивною та придатною для подальшого розвитку та практичної реалізації.

3.7 Висновки до третього розділу

У даному розділі виконано математичне моделювання, імітаційне дослідження та реалізацію основних алгоритмів кіберфізичної системи «Безпілотне таксі». Отримані результати дозволили формалізувати процеси руху транспортного засобу, розробити алгоритмічне забезпечення та оцінити ефективність функціонування системи в умовах, наближених до реальних.

На основі кінематичної моделі двоколісного велосипедного типу здійснено математичний опис руху транспортного засобу, що дозволило використовувати її як базу для побудови алгоритмів планування та керування. Запропонована модель забезпечує достатню точність для задач міського автономного руху та характеризується низькою обчислювальною складністю.

У межах імітаційного моделювання досліджено процес слідування заданій траєкторії та поведінку системи в умовах наявності перешкод. Отримані результати підтверджують здатність системи забезпечувати стабільний рух, адаптуватися до змін середовища та формувати безпечні траєкторії. Проведений аналіз похибки показав прийнятний рівень точності керування та ефективність реалізованих алгоритмів. Реалізовано сенсорну підсистему з використанням мультисенсорного підходу, що включає інтеграцію даних від камер, LiDAR, радарів та навігаційних датчиків. Для підвищення точності локалізації застосовано алгоритм розширеного фільтра Калмана, який дозволяє об'єднувати дані різних сенсорів і забезпечує стійкість до шумів та невизначеностей.

Проведено порівняльний аналіз алгоритмів керування, який показав переваги використання методів прогнозуючого керування у складних умовах руху порівняно з класичними PID-регуляторами. На завершальному етапі виконано інтеграцію всіх модулів у єдину кіберфізичну систему, що дозволило реалізувати повний цикл автономного керування: від сприйняття середовища до формування керуючих впливів. Результати моделювання підтверджують узгодженість роботи

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

4.1 Розробка програмного інтерфейсу користувача кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Програмний інтерфейс користувача є важливою складовою кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», оскільки забезпечує взаємодію між користувачем, диспетчерською системою та автономним транспортним засобом. Основним призначенням інтерфейсу є надання засобів моніторингу, керування та обміну інформацією в режимі реального часу. У межах даної роботи розроблено концепцію програмного інтерфейсу, яка включає диспетчерський модуль для централізованого моніторингу транспортних засобів (рисунок 4.1) та мобільний застосунок користувача (рисунок 4.2) для замовлення поїздки і взаємодії з системою. Обидва дизайни програмних платформ було розроблено у середовищі Figma [84].

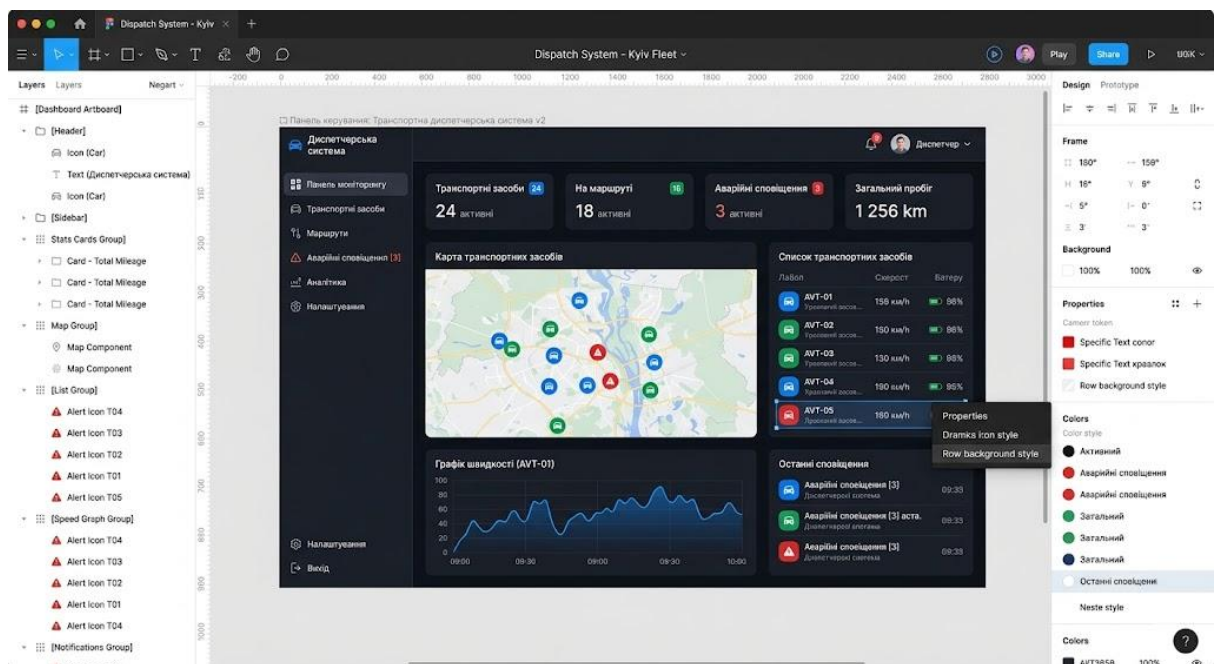


Рисунок 4.1 – Інтерфейс користувача диспетчерського модуля веб-застосунку для безпілотного таксі

Диспетчерський модуль призначений для контролю стану транспортних засобів, моніторингу маршрутів, перегляду телеметричних даних та аналізу

поточного стану системи. Інтерфейс диспетчерського модуля реалізується у вигляді вебзастосунку з використанням клієнт-серверної архітектури. Основними функціями диспетчерського модуля є:

- відображення поточного місцезнаходження транспортних засобів;
- моніторинг швидкості, заряду батареї та технічного стану;
- отримання повідомлень про помилки та аварійні ситуації;
- перегляд і коригування маршрутів;
- централізоване управління автопарком.

Для візуалізації даних використовується інтерактивна карта, на якій у режимі реального часу відображається положення транспортних засобів та їх траєкторії руху. Передача даних між транспортним засобом і диспетчерським модулем здійснюється через мережеві інтерфейси із застосуванням захищених протоколів обміну даними.

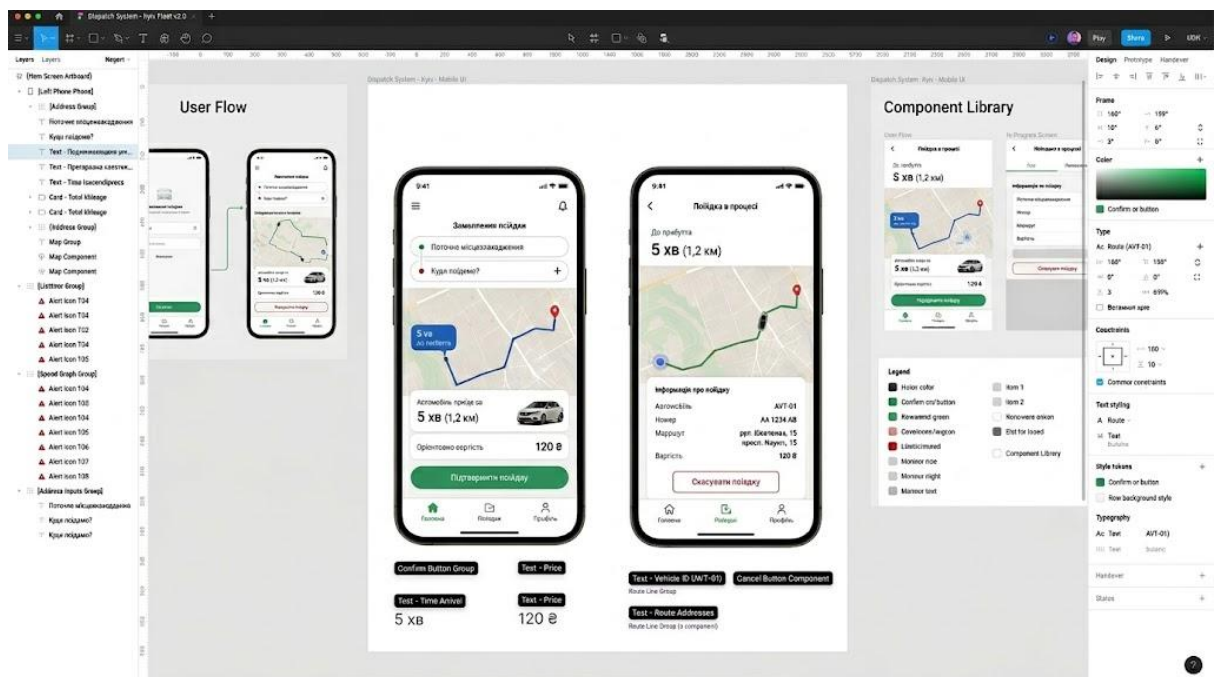


Рисунок 4.2 – Інтерфейс користувача диспетчерського модуля мобільного застосунку для безпілотного таксі

Мобільний застосунок користувача забезпечує взаємодію пасажирів з системою безпілотного таксі. Основною функцією застосунку є формування запитів

на поїздку та передача його до серверної частини системи. Крім того, застосунок надає користувачу можливість переглядати інформацію про транспортний засіб, орієнтовний час прибуття, маршрут руху та вартість поїздки. Знімок екрану дизайну інтерфейсу мобільного застосунку представлено на рисунку 4.2. Інтерфейс мобільного застосунку проектується з урахуванням принципів простоти та інтуїтивності використання. Основні елементи інтерфейсу включають форму введення початкової та кінцевої точки маршруту, карту з відображенням транспортного засобу, панель інформації про стан поїздки, систему повідомлень та сповіщень та модуль авторизації користувача.

Для забезпечення стабільної роботи застосунку використовується клієнт-серверна модель взаємодії (рисунок 4.3). Серверна частина виконує обробку запитів, взаємодію з хмарною інфраструктурою та передачу інформації між транспортним засобом і користувачем. Важливою складовою інтерфейсу є система безпеки та автентифікації, що забезпечує захист персональних даних користувачів і запобігає несанкціонованому доступу до системи. Для цього можуть використовуватися механізми багатофакторної автентифікації, шифрування даних та захищені канали зв'язку. Для реалізації безперервного оновлення статусу поїздки в реальному часі застосовується протокол WebSocket, що дозволяє передавати координати безпілотного автомобіля на карту користувача з мінімальною затримкою без необхідності постійного перезапиту даних. Окрім візуалізації маршруту, архітектура застосунку передбачає інтеграцію з платіжними шлюзами через захищені API, що забезпечує автоматизоване списання коштів після завершення поїздки та формування електронного чека для пасажирів. Інтегрований модуль сповіщень автоматично інформує пасажирів про зміну дорожньої ситуації або вимушені коригування маршруту, що підвищує рівень довіри до автономної системи. Це створює цілісну екосистему взаємодії, де мобільний інтерфейс виступає не лише інструментом замовлення, а й основним каналом зворотного зв'язку між пасажиром та інтелектуальною транспортною мережею.

Схема взаємодії компонентів системи



Рисунок 4.3 – Схема взаємодії компонентів кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

4.2 Експериментальна апробація моделі розпізнавання транспортних засобів на базі архітектури YOLO

Однією з ключових задач кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» є виявлення та розпізнавання об'єктів дорожнього середовища в режимі реального часу. Для вирішення цієї задачі у межах роботи використано архітектуру YOLO [85], яка належить до сучасних одностадійних алгоритмів детекції об'єктів і характеризується високою швидкістю та точністю. Метою експериментальної апробації є оцінка ефективності моделі YOLO для задачі детекції транспортних засобів у складі кіберфізичної системи автономного транспорту. У процесі дослідження аналізуються показники точності розпізнавання, швидкодії та стійкості роботи моделі в різних умовах.

Для проведення експерименту використовувалися зображення дорожніх сцен, що містять автомобілі, автобуси, вантажний транспорт та інші об'єкти дорожньої інфраструктури. Вхідні дані проходили попередню обробку, яка включала масштабування зображень, нормалізацію та перетворення у формат, придатний для роботи нейронної мережі. Архітектура YOLO виконує детекцію об'єктів шляхом одночасного прогнозування координат обмежувальних прямокутників та ймовірностей належності об'єкта до певного класу. На відміну від двостадійних методів, YOLO виконує обробку зображення за один прохід нейронної мережі, що забезпечує можливість роботи в режимі реального часу. Загальна структура процесу детекції може бути визначена як послідовність операцій, представлена на рисунку 4.4.

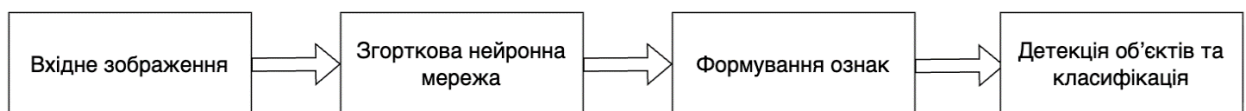


Рисунок 4.4 – Загальна структура процесу детекції об'єктів за допомогою нейромережевої моделі YOLO

Для оцінки ефективності моделі використовувалися такі показники:

- 1) точність детекції (Precision);
- 2) повнота детекції (Recall);
- 3) середня точність (mAP);
- 4) швидкість обробки кадрів (FPS).

Точність розпізнавання визначається співвідношенням правильно виявлених об'єктів до суми правильно виявлених та помилково виявлених об'єктів та представлена формулою 4.1:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (4.1)$$

де TP - кількість правильно виявлених об'єктів, FP - кількість хибних спрацьовувань.

Повнота розпізнавання визначається як співвідношення правильно виявлених об'єктів до суми правильно виявлених та пропущених об'єктів та представлена формулою 4.2:

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (4.2)$$

де FN - кількість пропущених об'єктів.

У результаті експериментальної апробації встановлено, що модель YOLO забезпечує високу швидкість роботи та достатній рівень точності для задач автономного транспорту. Алгоритм ефективно виявляє транспортні засоби навіть у складних умовах дорожнього руху, що підтверджує можливість його використання у складі системи «Безпілотне таксі». Особливу увагу приділено аналізу роботи моделі в умовах часткового перекриття об'єктів, зміни освітлення та наявності шумів у зображенні. Результати показали, що використання сучасних версій YOLO дозволяє забезпечити стійкість детекції та зменшити кількість помилкових спрацьовувань.

У межах розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» одним із ключових завдань є забезпечення надійного розпізнавання об'єктів дорожнього середовища в режимі реального часу. Для вирішення цієї задачі було проведено експериментальне дослідження моделі детекції транспортних засобів на основі архітектури YOLOv11, яка належить до сучасних одностадійних алгоритмів комп'ютерного зору та характеризується високою швидкістю обробки зображень. Метою експериментальної апробації є оцінка ефективності використання нейронної мережі YOLOv11 у задачах виявлення транспортних засобів у складі кіберфізичної системи автономного транспорту. Особливу увагу приділено аналізу точності детекції, повноти розпізнавання та стійкості роботи моделі в умовах реального дорожнього середовища.

Об'єктом дослідження виступив набір даних Traffic Dataset (v1) [86], який знаходиться у вільному доступі на платформі Roboflow (рисунок 4.5), та містить 150 зображень дорожнього руху з відповідними анотаціями у форматі YOLOv8. Набір даних включає зображення з різними дорожніми сценаріями, що дозволяє оцінити роботу моделі в умовах зміни освітлення, щільності транспортного потоку та погодних умов. У межах дослідження виконувалася розпізнавання чотирьох основних класів транспортних засобів:

- 1) Bus - автобус;
- 2) Car - легковий автомобіль;
- 3) Motorcycle - мотоцикл;
- 4) Truck - вантажний автомобіль.

Перед початком навчання всі вхідні дані проходили етап попередньої обробки, який включав автоматичну орієнтацію зображень та масштабування до роздільної здатності 416×416 пікселів. Такий підхід дозволив уніфікувати структуру даних та забезпечити коректну роботу нейронної мережі. Додатково було застосовано методи аугментації даних, такі як випадкове віддзеркалення та варіювання параметрів експозиції, що допомогло підвищити стійкість моделі до різних умов освітлення в міському середовищі.

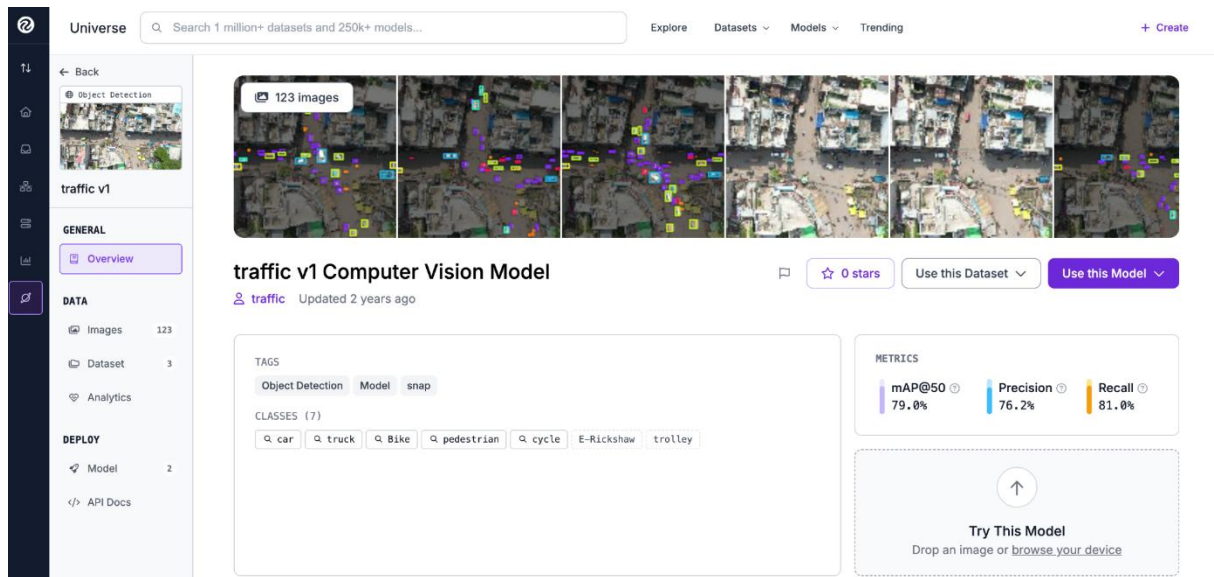


Рисунок 4.5 – Знімок екрану з набором даних Traffic Dataset (v1) на платформі Roboflow [86]

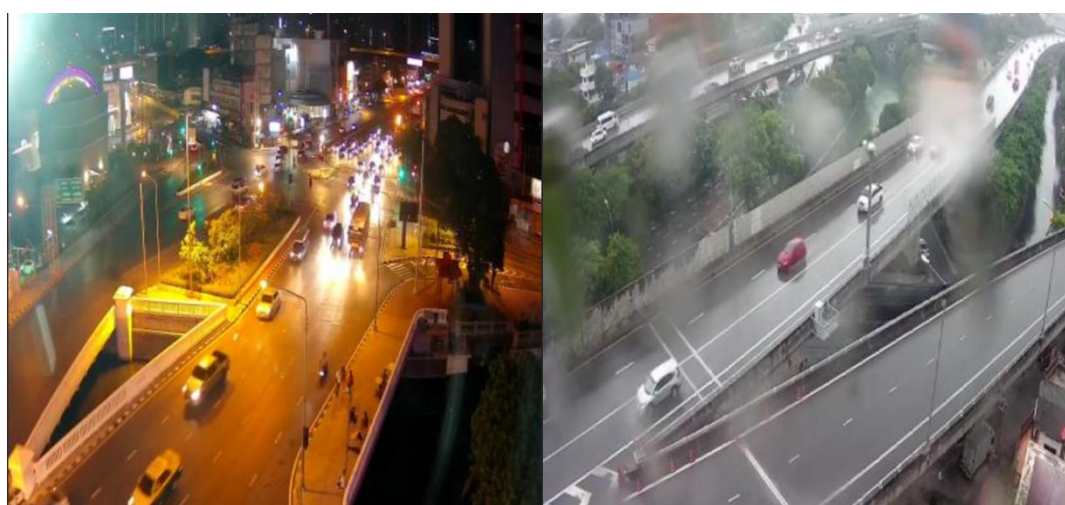
Для проведення експериментів використовувалася попередньо навчена модель `yolo11n.pt`, яка адаптувалася до задачі розпізнавання транспортних засобів шляхом додаткового навчання на досліджуваному наборі даних. Навчання моделі здійснювалося з використанням гіперпараметрів, які наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Гіперпараметри для навчання нейромережевої моделі YOLOv11

Параметр	Значення
кількість епох навчання	20
розмір пакету	8
розмір вхідного тензора	640
оптимізатор	<i>auto</i> із використанням алгоритму стохастичного градієнтного спуску.

Процес навчання виконувався ітеративно з поступовим оновленням ваг нейронної мережі на основі функції втрат. Для оцінки стабільності навчання аналізувалися зміни основних компонентів функції втрат, зокрема: `box_loss` - похибка локалізації об'єктів, `cls_loss` - похибка класифікації, `dfl_loss` - похибка розподілу меж об'єктів. Поступове зменшення значень функцій втрат упродовж навчання свідчить про збіжність моделі та стабільність процесу оптимізації.

На рисунку 4.6 представлено зображення з набору даних [86], які використовувались для навчання нейромережевої моделі.



а)

б)

Рисунок 4.6 – Зображення для навчання нейромережі з набору даних [86]: (а) зображення в темний час доби; б) зображення в світлий час доби при дощовій погоді (недостатній видимості)

Для оцінки ефективності роботи моделі детекції транспортних засобів було проаналізовано результати навчання нейронної мережі YOLOv11 за допомогою стандартних графічних метрик оцінювання якості моделей комп'ютерного зору. До основних досліджуваних залежностей належать криві точності залежності від рівня довіри, повноти залежності від рівня довіри, зваженого гармонійного середнього (F1-міри) залежності від рівня довіри та точності-повноти.

Крива точності залежності від рівня довіри (рисунок 4.7) демонструє зміну точності моделі при різних порогових значеннях класифікації.

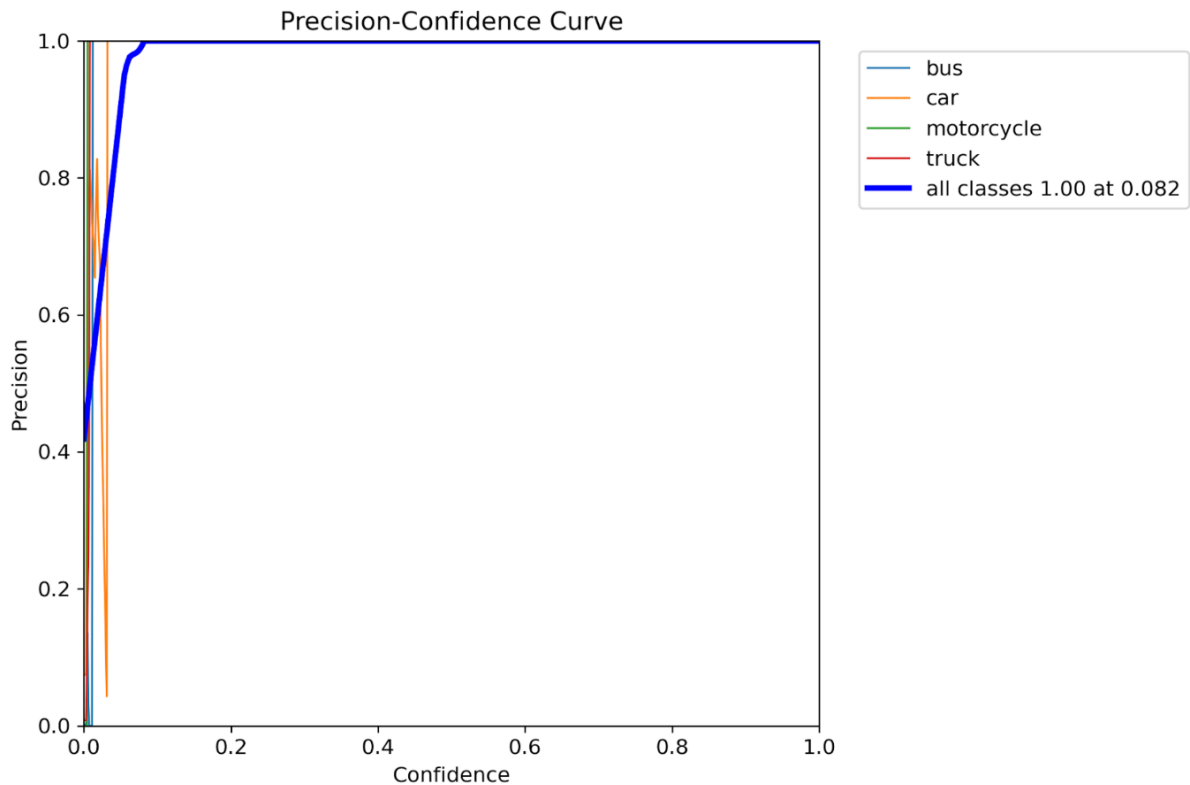


Рисунок 4.7 – Крива точності залежності від рівня довіри

З отриманих результатів видно, що зі збільшенням порогу довіри значення точності поступово зростає та наближається до 1.0. Найкращі результати продемонстровано для сукупності всіх класів, де максимальна точність досягається при порозі довіри близько 0.082. Це свідчить про те, що модель здатна формувати достатньо достовірні передбачення навіть при відносно низькому пороговому значенні. Разом із тим для окремих класів спостерігається нестабільність кривих, що може бути пов'язано з недостатньою кількістю навчальних прикладів або складністю класифікації певних типів транспортних засобів.

Крива повноти залежності від рівня довіри (рисунок 4.8) показує залежність повноти виявлення об'єктів від рівня довіри. Аналіз результатів демонструє, що зі збільшенням порогу довіри значення повноти суттєво зменшується. Це зумовлено тим, що за суворіших критеріїв відбору система відсіює велику кількість правильних передбачень, які мають низьку оцінку впевненості.

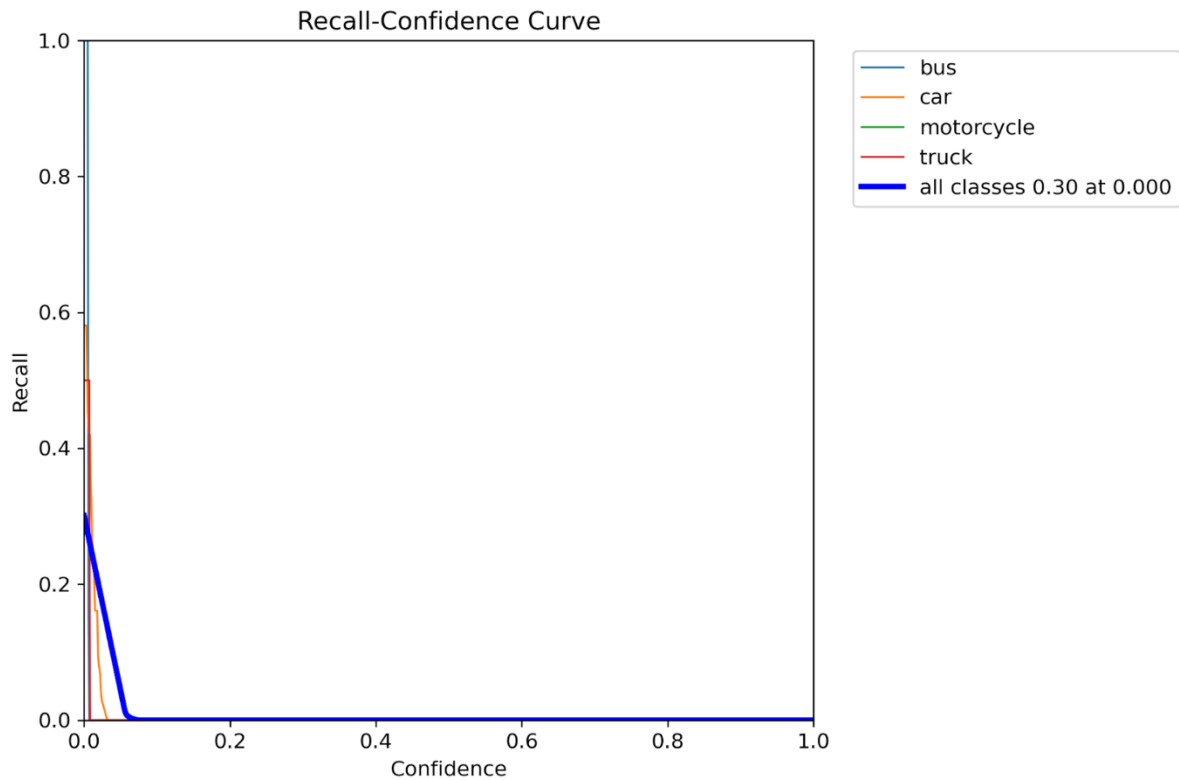


Рисунок 4.8 – Крива повноти залежності від рівня довіри

Максимальні значення повноти спостерігаються при мінімальних порогових значеннях довіри. Для задач автономного транспорту така поведінка є очікуваною, оскільки система повинна знаходити баланс між мінімізацією хибнопозитивних спрацьовувань та уникненням пропуску реальних об'єктів дорожнього середовища.

Крива залежності F1-міри від рівня довіри (рисунок 4.9) дозволяє оцінити баланс між точністю та повнотою. Максимальне значення метрики F1 для всіх класів становить приблизно 0.04 при рівні довіри, близькому до нуля.

Невисоке значення F1 свідчить про недостатню збалансованість моделі та наявність значної кількості хибних спрацьовувань або пропущених об'єктів. Основними причинами можуть бути невеликий розмір навчальної вибірки, недостатня кількість епох навчання, складність сцен дорожнього руху або нерівномірний розподіл класів у наборі даних. Попри це модель демонструє здатність виконувати базову розпізнавання транспортних засобів, що підтверджує коректність обраної архітектури.

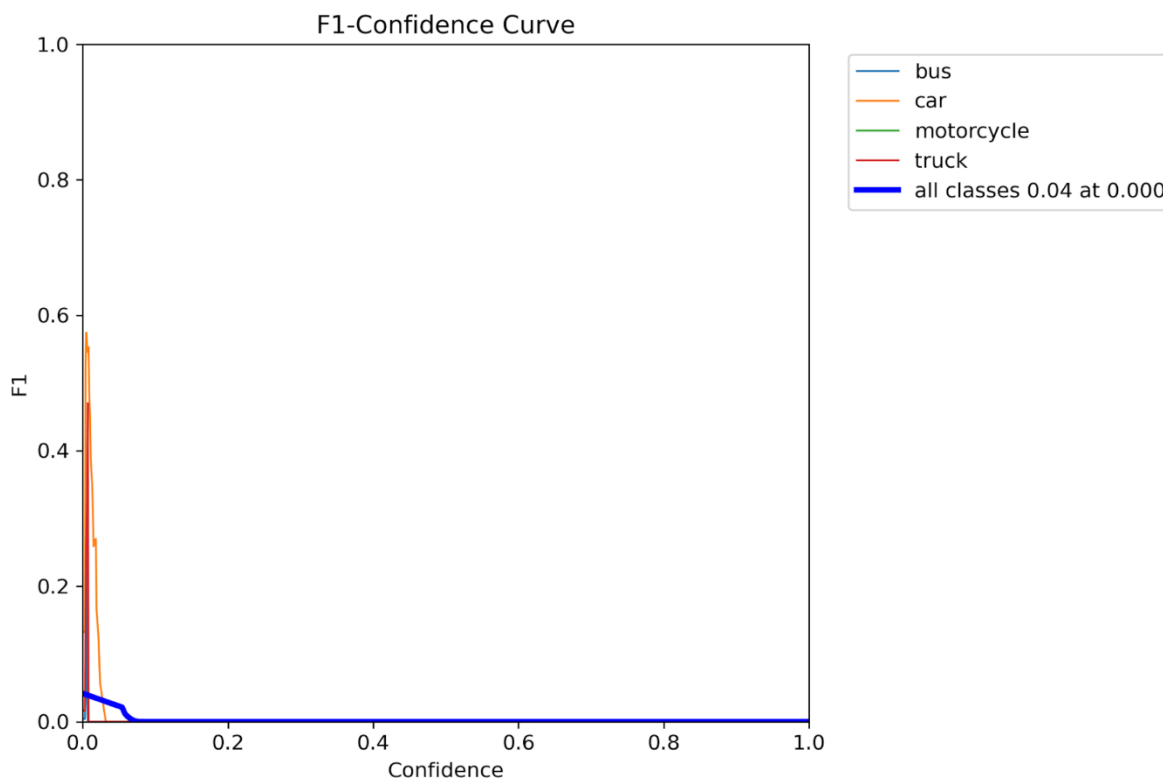


Рисунок 4.9 – Крива залежності F1-міри від рівня довіри

Крива точності-повноти (рисунок 4.10) є однією з основних характеристик якості моделей розпізнавання об'єктів. Отримані результати показують, що найкращу якість детекції продемонстрував клас Car, для якого значення середньої точності становить приблизно 0.449. Для інших класів результати є нижчими: для класу Bus - 0.199, для класу Truck - 0.250, для класу Motorcycle - 0.000. Середнє значення $mAP@0.5$ для всіх класів становить приблизно 0.224, що відповідає базовому рівню працездатності моделі. Найгірші результати отримано для класу Motorcycle, що може бути пов'язано з малою кількістю прикладів у вибірці та складністю виявлення дрібних об'єктів на зображенні.

Проведений аналіз графічних метрик підтверджує працездатність моделі YOLOv11 для задачі розпізнавання транспортних засобів у складі кіберфізичної системи «Безпілотне таксі». Модель демонструє здатність виконувати виявлення основних типів транспортних засобів у реальних дорожніх умовах.

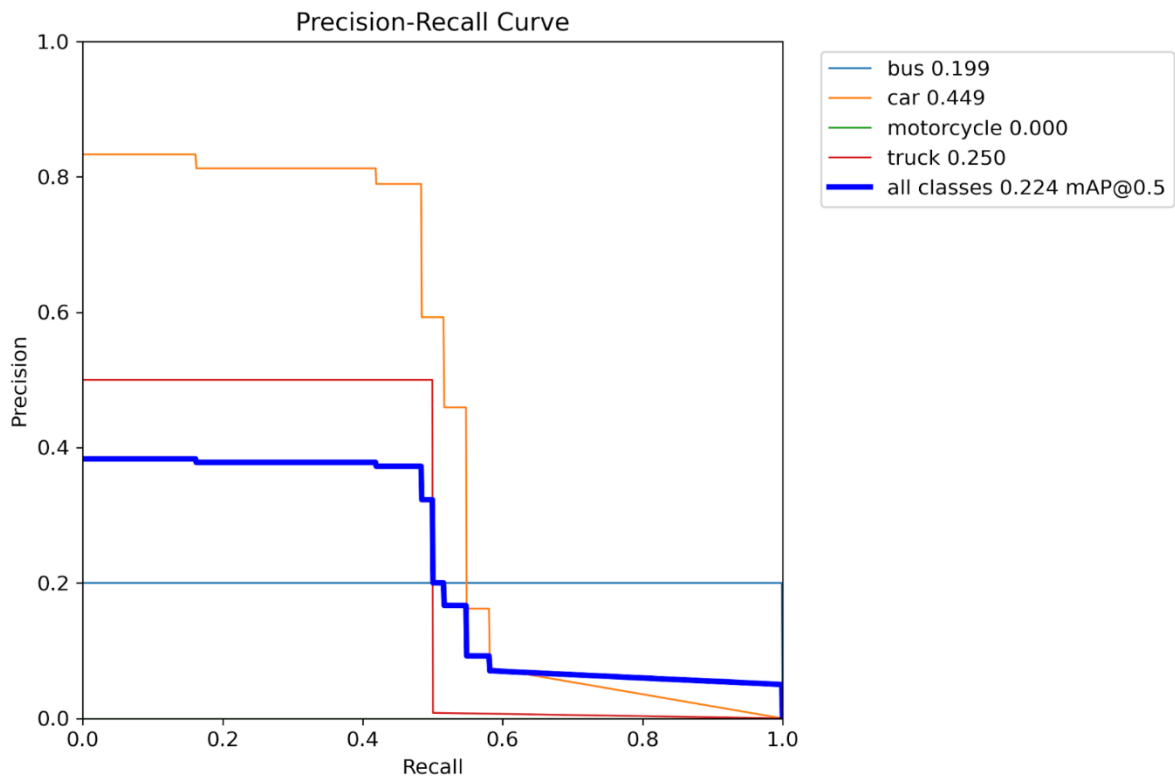


Рисунок 4.10 – Крива Precision-Recall

На рисунку 4.11 представлено динаміку зміни основних метрик та функцій втрат моделі YOLOv11 у процесі навчання протягом 20 епох. Аналіз отриманих графіків дозволяє оцінити стабільність процесу оптимізації, швидкість збіжності моделі та ефективність розпізнавання транспортних засобів. Графіки точності виявлення об'єктів при різних порогах перекриття демонструють стрімке зростання показників уже після перших п'яти епох, що свідчить про високу адаптивність архітектури до особливостей вибірки дорожніх об'єктів.

Графік `train/box_loss` відображає зміну похибки локалізації об'єктів під час навчання моделі. Спостерігається поступове зниження значення функції втрат із приблизно 1.9 на початкових етапах до близько 1.43 на завершальній епісі. Зменшення `box_loss` свідчить про покращення здатності моделі визначати координати обмежувальних прямокутників транспортних засобів. Незначні коливання значень пояснюються особливостями стохастичного процесу навчання та невеликим обсягом вибірки. Функція `train/cls_loss` характеризує похибку класифікації об'єктів. Протягом навчання спостерігається стабільне зменшення

значення втрат із приблизно 4.2 до 2.0. Це свідчить про поступове покращення здатності нейронної мережі правильно визначати класи транспортних засобів. Плавний характер кривої підтверджує стабільність процесу навчання без різких переналаштувань ваг моделі. Графік `train/dfl_loss` демонструє зміну функції втрат розподілу фокусної відстані, що використовується для уточнення меж об'єктів. Значення функції втрат зменшується від 1.35 до приблизно 1.08. Отримані результати свідчать про підвищення точності локалізації меж транспортних засобів у процесі навчання.

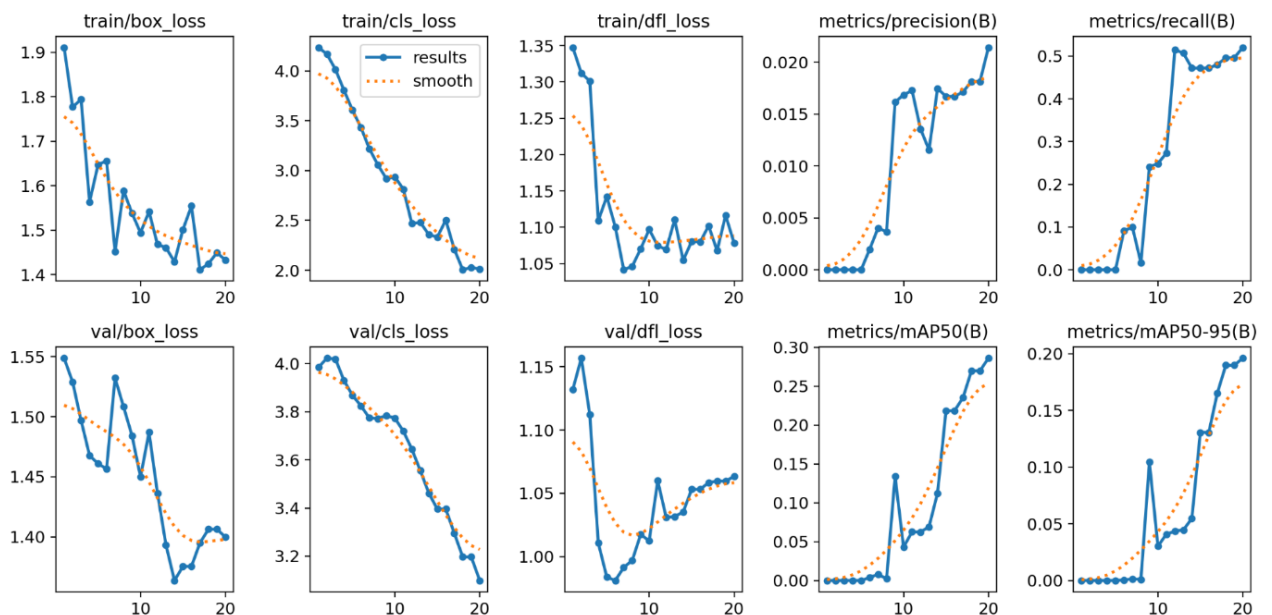


Рисунок 4.11 – Графік динаміки змін основних метрик та функцій втрат моделі YOLOv11 у процесі навчання протягом 20 епох

На рисунку 4.12 представлено зміну основних метрик якості моделі YOLO11s протягом 20 епох навчання. Графік відображає динаміку показників точності, повноти, середньої точності `mAP50` та `mAP50-95`, що дозволяє оцінити ефективність процесу навчання та здатність моделі до розпізнавання транспортних засобів.

Метрика точності характеризує частку правильних позитивних розпізнавань серед усіх виявлених об'єктів. На початкових етапах навчання значення показника

залишалося близьким до нуля, що свідчить про недостатню здатність моделі виконувати коректну класифікацію.

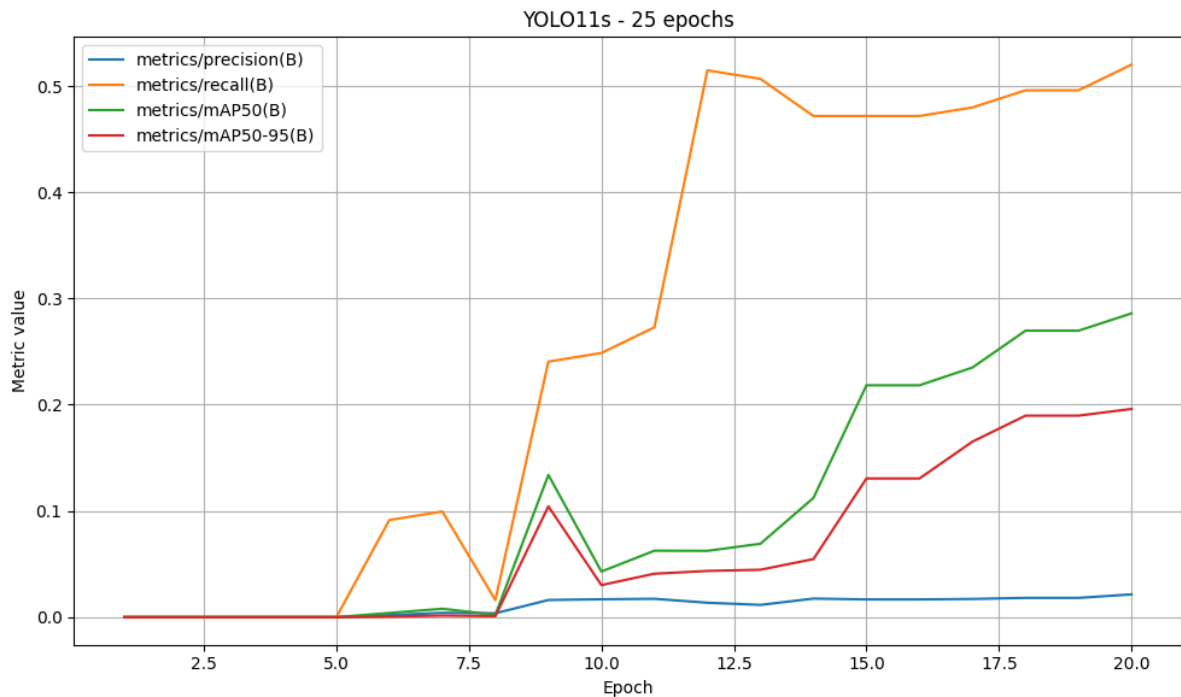


Рисунок 4.12 – Графік зміни основних метрик якості моделі YOLO11s протягом 20 епох навчання

Починаючи приблизно з 9-ї епохи, спостерігається поступове зростання точності до рівня близько 0.02 на фінальному етапі навчання. Незважаючи на відносно невисоке значення, позитивна динаміка свідчить про стабільне покращення здатності моделі зменшувати кількість хибнопозитивних спрацьовувань. Низький рівень точності може бути пов'язаний із невеликим обсягом навчального набору даних, складністю сцен дорожнього руху та нерівномірним розподілом класів транспортних засобів.

Показник повноти відображає здатність моделі знаходити реальні об'єкти на зображенні. На графіку видно різке зростання повноти після 8–10 епох навчання. Максимальне значення показника становить приблизно 0.52. Отримані результати свідчать про те, що модель успішно виявляє більшість транспортних засобів у кадрі. Високе значення повноти є важливим для систем автономного транспорту,

оскільки пропуск об'єктів може призводити до небезпечних ситуацій під час руху. Після 12-ї епохи значення повноти стабілізується, що вказує на досягнення відносно стійкого режиму роботи моделі. Показник mAP50 характеризує середню точність виявлення при порозі перетину над об'єднанням (IoU) = 0.5. З графіка видно поступове зростання значення mAP50 у процесі навчання.

На завершальному етапі навчання значення метрики досягає приблизно 0.29, що свідчить про базову ефективність моделі у задачах локалізації та класифікації транспортних засобів. Особливо помітне покращення mAP50 спостерігається після 14-ї епохи, що може свідчити про адаптацію ваг нейронної мережі до особливостей досліджуваного набору даних.

Метрика mAP50-95 є більш суворим критерієм оцінювання, оскільки враховує декілька порогів IoU. Значення цієї метрики поступово зростає та досягає приблизно 0.20 наприкінці навчання. Нижче значення mAP50-95 порівняно з mAP50 пояснюється більш жорсткими вимогами до точності локалізації об'єктів. Це свідчить про те, що модель загалом здатна виконувати розпізнавання транспортних засобів, однак потребує подальшого вдосконалення для точнішого визначення меж об'єктів. Поступова збіжність цієї метрики вказує на те, що нейронна мережа успішно засвоює складні геометричні ознаки об'єктів, навіть попри високий рівень варіативності їхніх ракурсів та масштабів. Водночас отримані результати підкреслюють потенціал для подальшого розширення тренувальної вибірки та оптимізації гіперпараметрів моделі для досягнення вищих показників надійності в умовах щільної міської забудови.

За результатами навчання після 20 епох було отримано показники, які наведені у таблиці 4.2.

Отримані результати свідчать про здатність моделі виконувати розпізнавання транспортних засобів у складних дорожніх умовах. Найвищі значення метрики mAP були досягнуті на фінальних етапах навчання, що підтверджує ефективність процесу адаптації моделі до досліджуваного набору даних. Значення повноти на рівні 0.52 свідчить про достатню здатність системи виявляти наявні транспортні засоби на зображенні. Водночас низьке значення точності вказує на наявність

хибнопозитивних спрацьовувань, що може бути пов'язано з невеликим обсягом навчальної вибірки та складністю сцен дорожнього руху. Візуальний аналіз результатів розпізнавання показав, що модель коректно визначає транспортні засоби навіть за умов часткового перекриття об'єктів, різної інтенсивності трафіку та зміни освітлення. Це підтверджує можливість використання архітектури YOLOv11 у складі систем комп'ютерного зору автономного транспорту.

Таблиця 4.2 - Показники метрик за результатами навчання нейромережевої моделі після 20 епох

Метрика	Значення
Precision (B)	0.02141
Recall (B)	0.52016
mAP50 (B)	0.28596
mAP50-95 (B)	0.196

Для оцінки якості класифікації транспортних засобів у межах експериментальної апробації моделі YOLO11s було проаналізовано матрицю помилок (рисунок 4.13) та нормалізовану матрицю помилок (рисунок 4.14). Дані матриці дозволяють оцінити здатність моделі правильно розпізнавати окремі класи транспортних засобів та визначити характер помилок класифікації.

Матриця помилок відображає кількість правильних та неправильних класифікацій для кожного класу транспортних засобів. По осі абсцис розташовані істинні класи, а по осі ординат - передбачені класи. З отриманої матриці видно, що більшість об'єктів були віднесені моделлю до класу "background", тобто не були коректно розпізнані як транспортні засоби. Найбільша кількість пропущених об'єктів спостерігається для класу "Car" - 31 випадок, для класу "Motorcycle" - 3 випадки, для класу "Truck" - 2 випадки, для класу "Bus" - 1 випадок. Такі результати

свідчать про недостатню здатність моделі виконувати стабільну класифікацію транспортних засобів у межах поточного експерименту. Основною проблемою є висока кількість хибно-негативних результатів, коли реальний об’єкт присутній на зображенні, однак модель не виконує його виявлення. Найбільша кількість помилок спостерігається для класу “Car”, що пояснюється більшою кількістю автомобілів у тестовому наборі даних порівняно з іншими класами.

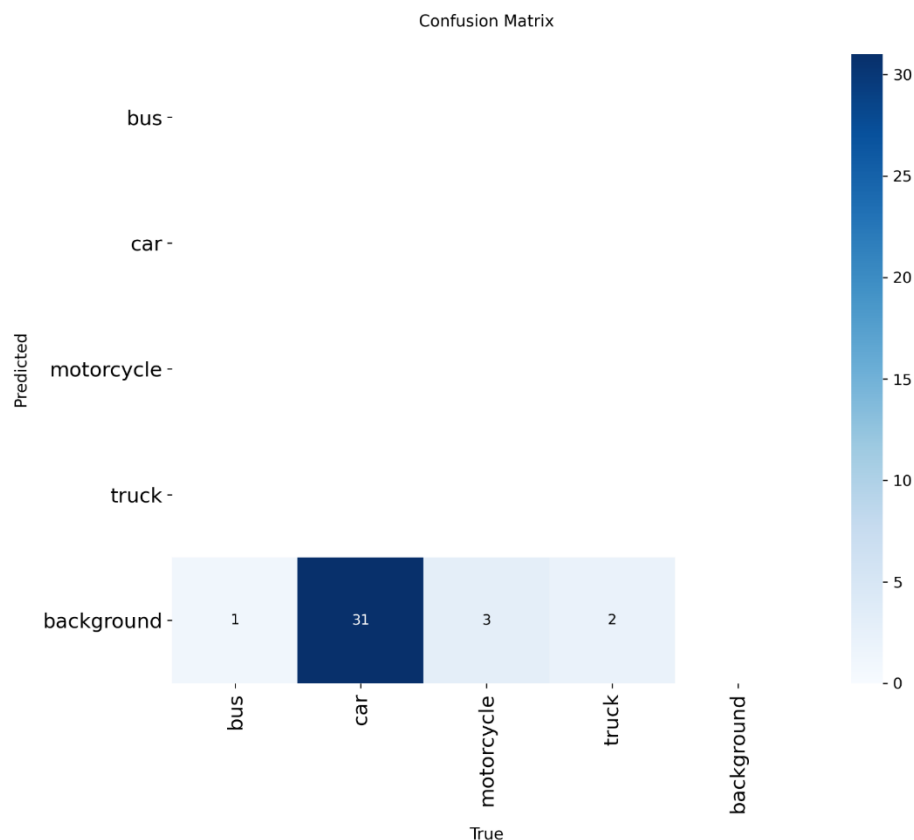


Рисунок 4.13 – Матриця помилок

Нормалізована матриця помилок дозволяє оцінити частку помилок відносно загальної кількості об’єктів кожного класу. На графіку видно, що для всіх класів значення помилкової класифікації у класі “background” наближається до 1.0. Це означає, що модель у більшості випадків не змогла впевнено ідентифікувати транспортні засоби як окремі класи. Подібна поведінка свідчить про недостатній рівень узагальнення нейронної мережі та складність задачі для поточного обсягу

навчальних даних. Основними причинами отриманих результатів можуть бути невеликий розмір набору даних, недостатня кількість прикладів для окремих класів, низька різноманітність навчальних сцен, недостатня кількість епох навчання або складні умови дорожнього середовища.

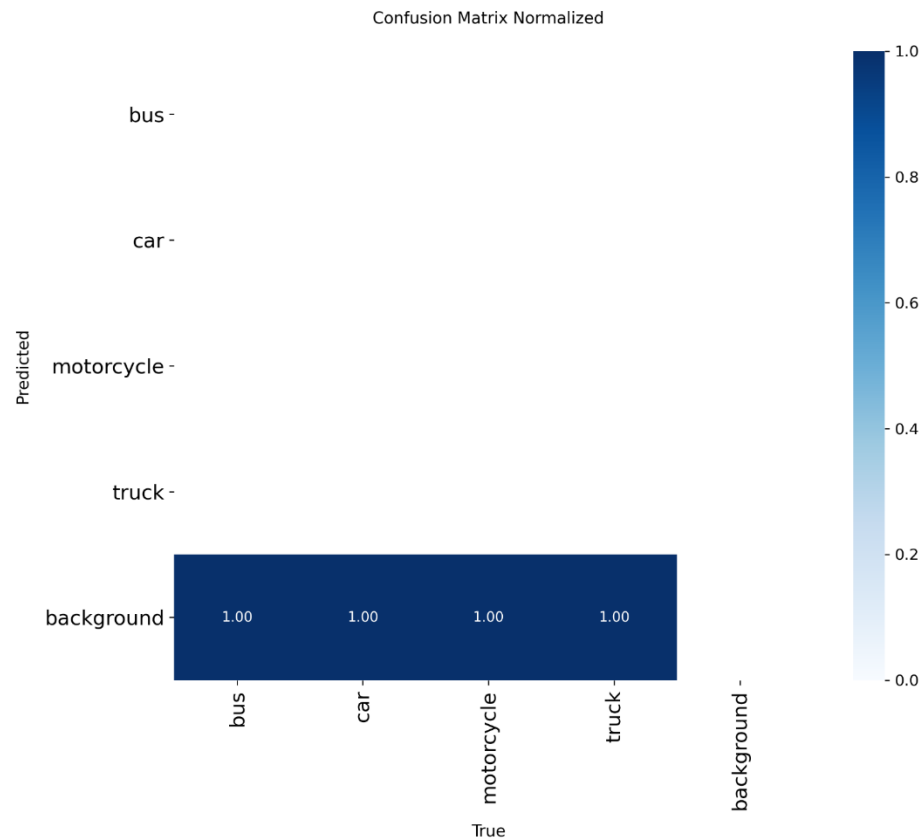


Рисунок 4.13 – Нормалізована матриця помилок

Попри наявність значної кількості помилок класифікації, результати експерименту підтверджують працездатність архітектури YOLO11s та можливість її використання як базової моделі для задач комп'ютерного зору автономного транспорту. Отримані результати демонструють, що модель здатна частково виявляти транспортні засоби, однак потребує подальшого вдосконалення для забезпечення стабільної роботи в реальних умовах автономного руху.

Аналіз матриць помилок показав, що модель YOLO11s демонструє базову здатність до розпізнавання транспортних засобів, однак на поточному етапі має

обмежену точність класифікації. Основною проблемою є значна кількість хибно-негативних спрацьовувань, що проявляється у віднесенні об'єктів до класу “background”. Водночас результати експерименту підтверджують перспективність використання архітектур типу YOLO для задач автономного транспорту та створюють основу для подальшого вдосконалення підсистеми комп'ютерного зору кіберфізичної системи «Безпілотне таксі».

4.3 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі розглянуто практичні аспекти реалізації програмного забезпечення кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», зокрема розробку користувацького інтерфейсу та експериментальну апробацію моделі комп'ютерного зору на базі архітектури YOLO. У межах підрозділу, присвяченого розробці програмного інтерфейсу, сформовано концепцію взаємодії між користувачем, серверною частиною, диспетчерським модулем та автономним транспортним засобом. Запропонована архітектура забезпечує централізоване керування автопарком, моніторинг стану транспортних засобів та підтримку взаємодії з мобільним застосунком у режимі реального часу. Розроблена структура інтерфейсу дозволяє реалізувати ефективний обмін даними між усіма компонентами системи та створює основу для подальшого впровадження сервісів автономних перевезень.

У процесі експериментальної апробації досліджено можливість використання нейронної мережі YOLO11s для задачі детекції транспортних засобів у дорожньому середовищі. Проведено навчання моделі на спеціалізованому наборі даних Traffic Dataset (v1), який містить анотовані зображення різних типів транспортних засобів.

Аналіз результатів навчання показав поступове зменшення функцій втрат та зростання основних метрик якості, що свідчить про стабільність процесу оптимізації моделі. Найкращі результати були отримані для показника Recall, значення якого досягло приблизно 0.52, що підтверджує здатність моделі виявляти

більшість об'єктів дорожнього середовища. Разом із тим аналіз Аналіз показників точності, mAP50 та mAP50-95 показав наявність значної кількості хибнопозитивних та хибнонегативних спрацьовувань. Дослідження матриць помилок підтвердило, що модель на поточному етапі має обмежену точність класифікації, а частина транспортних засобів помилково відноситься до класу background. Основними причинами цього є невеликий обсяг навчального набору даних, нерівномірний розподіл класів та складність дорожніх сцен.

Попри наявні обмеження, результати експерименту підтверджують працездатність архітектури YOLO11s та можливість її використання як основи підсистеми комп'ютерного зору автономного транспортного засобу. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення системи шляхом розширення навчальної вибірки, оптимізації параметрів навчання та застосування більш складних моделей розпізнавання.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у розробці кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» з використанням сучасних підходів до автономного керування, сенсорного сприйняття, локалізації, комп'ютерного зору та інтеграції програмно-апаратних компонентів.

Перше поставлене завдання, яке передбачало аналіз сучасних систем безпілотного таксі, архітектур автономного транспорту та сенсорних технологій, було виконано у першому розділі роботи. Проведено огляд існуючих рішень у сфері автономного транспорту, розглянуто особливості побудови сучасних роботаксі, проаналізовано архітектури автономних транспортних платформ, а також досліджено роль сенсорів LiDAR, Radar, Camera, GNSS та IMU у забезпеченні автономного руху.

Друге завдання полягало у розробці апаратної та програмної архітектури кіберфізичної системи «Безпілотне таксі». У межах його виконання було спроектовано апаратну архітектуру системи, що включає обчислювальний модуль, сенсорну підсистему, виконавчі механізми та мережеві інтерфейси. Також розроблено програмну архітектуру, яка складається з модулів сприйняття, локалізації, планування маршруту та керування рухом. Окремо розглянуто архітектуру взаємодії системи з хмарною інфраструктурою, що забезпечує моніторинг, обмін даними та підтримку сервісів автономного транспорту.

Третє завдання передбачало виконання математичного та імітаційного моделювання руху транспортного засобу. Для його реалізації було використано кінематичну модель типу bicycle model, яка дозволила описати рух транспортного засобу з урахуванням швидкості, кута орієнтації, колісної бази та кута повороту коліс. На основі цієї моделі проведено імітаційне моделювання слідування заданій траєкторії та обходу перешкод. Отримані результати підтвердили можливість використання запропонованої моделі для дослідження поведінки автономного транспортного засобу в умовах міського середовища.

Четверте завдання стосувалося реалізації та дослідження алгоритмів локалізації, злиття сенсорних даних і розпізнавання транспортних засобів на базі YOLO. У межах його виконання було розроблено підхід до інтеграції сенсорних даних із використанням розширеного фільтра Калмана, що дозволяє підвищити точність визначення положення транспортного засобу. Також проведено експериментальну апробацію моделі YOLO11s для задачі розпізнавання транспортних засобів. Для цього використано набір даних Traffic Dataset (v1), виконано навчання моделі, проаналізовано графіки втрат, метрики Precision, Recall, mAP50, mAP50-95 та матриці помилок. Результати підтвердили працездатність обраного підходу, хоча також виявили потребу в подальшому збільшенні навчального набору, балансуванні класів та оптимізації параметрів навчання.

П'яте завдання полягало у розробці користувацького інтерфейсу та оцінюванні ефективності запропонованої системи. У межах цього завдання було запропоновано концепцію програмного інтерфейсу, що включає мобільний застосунок користувача та диспетчерський модуль для моніторингу автономних транспортних засобів. Розроблена структура інтерфейсу забезпечує взаємодію між користувачем, серверною частиною, диспетчерським модулем і безпілотним таксі. Оцінювання ефективності системи здійснено на основі результатів імітаційного моделювання та експериментальної апробації моделі розпізнавання.

Таким чином, усі поставлені у магістерській роботі завдання виконано в повному обсязі. У роботі сформовано цілісну архітектурну модель кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», розроблено її апаратну та програмну структуру, виконано математичне й імітаційне моделювання, реалізовано підходи до локалізації та детекції транспортних засобів, а також запропоновано користувацький інтерфейс для взаємодії із системою.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованих рішень та перспективність використання кіберфізичних систем у сфері автономного транспорту. Практичне значення полягає в тому, що розроблені рішення можуть бути використані для вдосконалення автономних платформ, логістики, роботизованого транспорту та інтелектуальних сервісів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Waymo. Autonomous driving technology. URL: <https://waymo.com> (дата звернення: 21.02.2026).
2. Cruise. Autonomous vehicles. URL: <https://getcruise.com> (дата звернення: 21.02.2026).
3. Apollo Go. Autonomous ride-hailing service. URL: <https://apollo.auto> (дата звернення: 21.02.2026).
4. Zoox. Autonomous mobility. URL: <https://zoox.com> (дата звернення: 21.02.2026).
5. Waymo LLC. Waymo research: autonomous vehicle research publications. URL: <https://waymo.com/research/> (дата звернення: 21.02.2026).
6. Alcalá E., Sellart L., Puig V., Quevedo J., Saludes J., Vázquez D., López A. Comparison of two non-linear model-based control strategies for autonomous vehicles. *arXiv preprint*. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1710.03457.
7. Maitra A. An approach for modelling a common network for autonomous vehicles. 2020.
8. Badue C., Guidolini R., Carneiro R. V., Cardoso V. B., Forechi A., Jesus L., Berriel R., Paixão T. M., Mutz F., Veronese L., Oliveira-Santos T., De Souza A. F. Self-driving cars: a survey. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 165. P. 113816. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113816.
9. Faisal A., Yigitcanlar T., Kamruzzaman M., Currie G. Understanding autonomous vehicles: a systematic literature review on capability, impact, planning and policy. *Journal of Transport and Land Use*. 2019. Vol. 12, No 1. P. 45–72.
10. Grigorescu S., Trasnea B., Cocias T., Macesanu G. A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics*. 2020. Vol. 37, No 3. P. 362–386. DOI: 10.1002/rob.21918.
11. Pendleton S. D., Andersen H., Du X., Shen X., Meghiani M., Eng Y. H., Rus D., Ang M. H. Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles. *Machines*. 2017. Vol. 5, No 1. P. 6. DOI: 10.3390/machines5010006.

12. Schwarting W., Alonso-Mora J., Rus D. Planning and decision-making for autonomous vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018. Vol. 1. P. 187–210. DOI: 10.1146/annurev-control-060117-105157.
13. Grigorescu S., Trasnea B., Cocias T., Macesanu G. A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics*. 2020. Vol. 37, No 3. P. 362–386. DOI: 10.1002/rob.21918.
14. Koopman P., Wagner M. Autonomous vehicle safety: an interdisciplinary challenge. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2017. Vol. 9, No 1. P. 90–96. DOI: 10.1109/MITS.2016.2583491.
15. Koopman P., Fratrick F. How many operational design domains, objects, and events? *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*. 2019. Vol. 2, No 2. P. 117–123. DOI: 10.4271/12-02-02-0001.
16. Petit J., Shladover S. E. Potential cyberattacks on automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015. DOI: 10.1109/TITS.2014.2342271.
17. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
18. Shalev-Shwartz S., Shammah S., Shashua A. On a formal model of safe and scalable self-driving cars. *arXiv preprint*. 2017. arXiv:1708.06374.
19. Bosch. Self-driving cars: lights, camera, action! URL: <https://www.bosch.com/stories/mpc3-self-driving-car-camera> (дата звернення: 22.02.2026).
20. AVLView. Learn how vehicle tracking works. URL: <https://avlview.com/gps-tracking-blog/how-vehicle-tracking-works/> (дата звернення: 22.02.2026).
21. Klein L. Sensor systems for FRP lightweight structures: automotive features based on serial sensor products. *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 3088. DOI: 10.3390/s19143088.

22. IMU Sensor. URL: <https://evelta.com/sensors/motion-sensors/imu-sensor/> (дата звернення: 22.02.2026).
23. ISO. ISO 26262-1:2018 Road vehicles — Functional safety. International Organization for Standardization, 2018.
24. ISO. ISO/PAS 21448:2019 Road vehicles — Safety of the intended functionality (SOTIF). International Organization for Standardization, 2019.
25. ISO/SAE. ISO/SAE 21434:2021 Road vehicles — Cybersecurity engineering. International Organization for Standardization, 2021.
26. Jiang L., Ma G., Guo W., Sun Y. YOLO-DH: robust object detection for autonomous vehicles in adverse weather conditions. *Electronics*. 2025. Vol. 14, No 22. P. 4476. DOI: 10.3390/electronics14224476.
27. Murendeni R. Using a YOLO deep learning algorithm to improve 3D object detection in autonomous driving. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 16, No 1. P. 9. DOI: 10.3390/wevj16010009.
28. Kumar K., Bhardwaj R., Verma K. K. Real-time object detection in autonomous vehicles using YOLOv8. *Journal of Recent Innovations in Computer Science and Technology*. 2025. Vol. 2, No 2. P. 11–18. DOI: 10.70454/JRICST.2025.20211.
29. Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. YOLOv8 by Ultralytics. *Ultralytics*. 2023. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата звернення: 22.02.2026).
30. Redmon J., Farhadi A. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. *arXiv preprint*. 2022. arXiv:2207.02696. URL: <https://arxiv.org/abs/2207.02696> (дата звернення: 22.02.2026).
31. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023.
32. Caesar H., Bankiti V., Lang A., Vora S., Liong V., Xu Q., Krishnan A., Pan Y., Baldan G., Beijbom O. nuScenes: a multimodal dataset for autonomous driving. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2023.

33. Zhang Z., Sun H., Zheng N. Real-time object detection for autonomous driving using YOLO-based models: a survey. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 115432–115450.
34. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y. M. YOLOv9: learning what you want to learn using programmable gradient information. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2402.13616.
35. Parekh D., Poddar N., Rajpurkar A., Chahal M., Kumar N., Joshi G. P., Cho W. A review on autonomous vehicles: progress, methods and challenges. *Electronics*. 2022. Vol. 11, No 14. P. 2162.
36. Bathla G., Bhadane K., Singh R. K., Kumar R., Aluvalu R., Krishnamurthi R. та ін. Autonomous vehicles and intelligent automation: applications, challenges, and opportunities. *Mobile Information Systems*. 2022. Vol. 2022, No 1. P. 7632892.
37. Ignatious H. A., Khan M. An overview of sensors in autonomous vehicles. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 198. P. 736–741.
38. Ahmed M., Seraj R., Islam S. M. S. The k-means algorithm: a comprehensive survey and performance evaluation. *Electronics*. 2020. Vol. 9, No 8. P. 1295. DOI: 10.3390/electronics9081295.
39. Bachute M. R., Subhedar J. M. Autonomous driving architectures: insights of machine learning and deep learning algorithms. *Machine Learning with Applications*. 2021. Vol. 6. P. 100164. DOI: 10.1016/j.mlwa.2021.100164.
40. Bu F., Le T., Du X., Vasudevan R., Johnson-Roberson M. Pedestrian planar LiDAR pose (PPLP) network for oriented pedestrian detection based on planar LiDAR and monocular images. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5, No 2. P. 1626–1633. DOI: 10.1109/LRA.2020.2967319.
41. Caesar H., Bankiti V., Lang A., Vora S., Liong V., Xu Q., Krishnan A., Pan Y., Baldan G., Beijbom O. nuScenes: a multimodal dataset for autonomous driving. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2020. P. 11621–11631.
42. Chen G., Mao Z., Yi H., Li X., Bai B., Liu M., Zhou H. Pedestrian detection based on panoramic depth map transformed from 3D-LiDAR data. *Periodica*

Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2020. Vol. 64, No 3. P. 274–285. DOI: 10.3311/PPee.14805.

43. Chiang K.-W., Tsai G.-J., Li Y.-H., Li Y., El-Sheimy N. Navigation engine design for automated driving using INS/GNSS/3D LiDAR-SLAM and integrity assessment. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No 9. P. 1564. DOI: 10.3390/rs12091564.

44. Chowdhury A., Karmakar G., Kamruzzaman J., Jolfaei A., Das R. Attacks on self-driving cars and their countermeasures: a survey. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 207308–207342. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3037452.

45. Dai Y., Lee S.-G. Perception, planning and control for self-driving system based on on-board sensors. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12, No 10. P. 1–14. DOI: 10.1177/1687814020956494.

46. Dang D., Gao F., Hu Q. Motion planning for autonomous vehicles considering longitudinal and lateral dynamics coupling. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No 9. P. 3180. DOI: 10.3390/app10093180.

47. Faisal A., Kamruzzaman M., Yigitcanlar T., Currie G. Understanding autonomous vehicles: a systematic literature review on capability, impact, planning and policy. *Journal of Transport and Land Use*. 2019. Vol. 12, No 1. P. 45–72. DOI: 10.5198/jtlu.2019.1405.

48. Gandia R. M., Antonialli F., Cavazza B. H., Neto A. M., de Lima D. A., Sugano J. Y., Nicolai I., Zambalde A. L. Autonomous vehicles: scientometric and bibliometric review. *Transport Reviews*. 2019. Vol. 39, No 1. P. 9–28. DOI: 10.1080/01441647.2018.1518937.

49. García Cuenca L., Puertas E., Fernandez Andrés J., Aliane N. Autonomous driving in roundabout maneuvers using reinforcement learning with Q-learning. *Electronics*. 2019. Vol. 8, No 12. P. 1536. DOI: 10.3390/electronics8121536.

50. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2013.

51. Gupta A., Anpalagan A., Guan L., Khwaja A. S. Deep learning for object detection and scene perception in self-driving cars: survey, challenges, and open issues. *Array*. 2021. Vol. 10. P. 100057. DOI: 10.1016/j.array.2021.100057.
52. Hong J. W., Cruz I., Williams D. AI, you can drive my car: how we evaluate human drivers vs. self-driving cars. *Computers in Human Behavior*. 2021. Vol. 125. P. 106944. DOI: 10.1016/j.chb.2021.106944.
53. Hong J. W., Wang Y., Lanz P. Why is artificial intelligence blamed more? Analysis of faulting artificial intelligence for self-driving car accidents in experimental settings. *International Journal of Human–Computer Interaction*. 2020. Vol. 36, No 18. P. 1768–1774. DOI: 10.1080/10447318.2020.1801224.
54. Hussain R., Zeadally S. Autonomous cars: research results, issues, and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No 2. P. 1275–1313. DOI: 10.1109/COMST.2018.2869360.
55. Jung Y., Seo S.-W., Kim S.-W. Curb detection and tracking in low-resolution 3D point clouds based on optimization framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. Vol. 21, No 9. P. 3893–3908. DOI: 10.1109/TITS.2019.2930910.
56. Lee J. D., Kolodge K. Exploring trust in self-driving vehicles through text analysis. *Human Factors*. 2020. Vol. 62, No 2. P. 260–277. DOI: 10.1177/0018720819830361.
57. Lee M., Atkison T. VANET applications: past, present, and future. *Vehicular Communications*. 2020. Vol. 28. P. 100310. DOI: 10.1016/j.vehcom.2020.100310.
58. Li C., Wang R., Li J., Fei L. Face detection based on YOLOv3. *Recent Trends in Intelligent Computing, Communication and Devices*. Vol. 1006 / ed. by V. Jain et al. Singapore : Springer, 2020. P. 277–284. DOI: 10.1007/978-981-15-1097-9_25.
59. Li G., Yang Y., Qu X. Deep learning approaches on pedestrian detection in hazy weather. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, No 10. P. 8889–8899. DOI: 10.1109/TIE.2019.2955413.

60. Liu Q., Mo Y., Mo X., Lv C., Mihankhah E., Wang D. Secure pose estimation for autonomous vehicles under cyber attacks. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2019. P. 1583–1588.
61. Miglani A., Kumar N. Deep learning models for traffic flow prediction in autonomous vehicles: a review, solutions, and challenges. *Vehicular Communications*. 2019. Vol. 20. P. 100184. DOI: 10.1016/j.vehcom.2019.100184.
62. Ortega J., Lengyel H., Szalay Z. Overtaking maneuver scenario building for autonomous vehicles with PreScan software. *Transportation Engineering*. 2020. Vol. 2. P. 100029. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100029.
63. SAE International. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles : SAE Standard J3016. SAE International, 2018.
64. Sommer F., Dürrwang J., Kriesten R. Survey and classification of automotive security attacks. *Information*. 2019. Vol. 10, No 4. P. 148. DOI: 10.3390/info10040148.
65. Wasala A., Byrne D., Miesbauer P., O’Hanlon J., Heraty P., Barry P. Trajectory based lateral control: a reinforcement learning case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 94. P. 103799. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103799.
66. Wu X., Qiao B., Su C. Trajectory planning with time-variant safety margin for autonomous vehicle lane change. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No 5. P. 1626. DOI: 10.3390/app10051626.
67. Yaqoob I., Khan L. U., Kazmi S. M. A., Imran M., Guizani N., Hong C. S. Autonomous driving cars in smart cities: recent advances, requirements, and challenges. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34, No 1. P. 174–181. DOI: 10.1109/MNET.001.1900280.
68. Yurtsever E., Lambert J., Carballo A., Takeda K. A survey of autonomous driving: common practices and emerging technologies. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 58443–58469. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.

69. Zhang S., Yang J., Schiele B. Occluded pedestrian detection through guided attention in CNNs. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2018. P. 6995–7003.

70. Zhao J., Liang B., Chen Q. The key technology toward the self-driving car. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*. 2018. Vol. 6, No 1. P. 2–20. DOI: 10.1108/IJIUS-08-2017-0008.

71. Self Driving Car Hardware/Firmware. URL: <https://sinaaghli.com/projects/proj-phd-selfdriving.html> (дата звернення: 22.03.2026).

72. The Software-defined Autonomous Vehicle. URL: <https://www.lannerinc.com/tw/news-and-events-tw/eagle-lanner-tech-blog/the-software-defined-autonomous-vehicle> (дата звернення: 22.03.2026).

73. AVerMedia Carrier Board D315 built for NVIDIA® Jetson AGX Orin™ Module. URL: https://www.mybotshop.de/AVerMedia-Carrier-Board-D315-built-for-NVIDIA-Jetson-AGX-Orin-Module_3 (дата звернення: 22.03.2026).

74. ADAS and Autonomous Vehicle Testing With Velodyne Lidar Data Acquisition. URL: <https://dewesoft.com/blog/adas-testing-with-velodyne-lidar-data-acquisition> (дата звернення: 22.03.2026).

75. TEF810x Fully-Integrated 77 GHz Radar Transceiver. URL: <https://www.nxp.com/products/TEF810X> (дата звернення: 22.03.2026).

76. High accuracy, down-sized stereo camera using optical design and image processing technology. URL: <https://www.optowl.com/en/products/sensing/stereo-camera.html> (дата звернення: 22.03.2026).

77. MPU 6050 Gyro & Accelerometer IMU. URL: <https://robo.com.cy/products/mpu-6050?srsId=AfmBOorlW0AyEk0Owsb6lJJVHrUZWy7NHAUsxeTsWehON9MqRrNZDsk7> (дата звернення: 22.03.2026).

78. Електронна система керування рульовим механізмом. URL: <https://www.capitalone.com/cars/learn/finding-the-right-car/what-is-steerbywire> (дата звернення: 22.03.2026).

79. What is brake-by-wire and how does it work? URL: <https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/brake-by-wire> (дата звернення: 22.03.2026).

80. What is electronic throttle control? URL: <https://www.pistonheads.com/news/ph-features/what-is-electronic-throttle-control-ph-explains> (дата звернення: 22.03.2026).

81. Keysight Technologies. Automotive Ethernet: the in-vehicle networking of the future. URL: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/educ/2024/automotive-ethernet> (дата звернення: 22.03.2026).

82. Простий фільтр Калмана: приклад з Arduino та BMP280. URL: <https://arduino.ua/art250-prostii-filtr-kalmana-priklad-z-arduino-ta-bmp280?srsltid=AfmBOopjDW6x1jluY-iiyOSXRbHZjGKPnUcOJUbBm8bkjI1-q3VqSYUn> (дата звернення: 29.04.2026).

83. Стопчак О. О. Кіберфізична система “Безпілотне таксі”. *Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки наслідки (до 40-х роковин аварії на Чорнобильській АЕС)* : збірник тез VI Міжнародної наукової конференції, 23–24 квітня 2026 р. / упоряд.: А. А. Криськов, О. М. Горішна, Н. В. Габрусєва. Тернопіль : ФОП Осадца Ю. В., 2026. С. 151–152.

84. Середовище для створення дизайну інтерфейсів користувача Figma. URL: <https://www.figma.com/> (дата звернення: 30.04.2026).

85. YOLO Ultralytics. Офіційна документація. URL: <https://docs.ultralytics.com/> (дата звернення: 30.04.2026).

86. Traffic v1 Computer Vision Model. URL: <https://universe.roboflow.com/traffic-seou7/traffic-v1-oioya> (дата звернення: 30.04.2026).

ДОДАТОК А (обов'язковий)

Публікація

УДК 004.9

Стопчак О.

Хмельницький національний університет, Україна

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА «БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ»

***Анотація.** У роботі розглянуто концепцію безпілотного таксі як складної кіберфізичної системи, де фізичні процеси руху інтегровані з цифровими алгоритмами аналізу даних у режимі реального часу. Запропоновано багаторівневу архітектуру системи, що включає рівні сенсорики (з використанням LiDAR, Radar, GNSS), сприйняття (алгоритми YOLO), локалізації, планування та керування. Описано механізм злиття даних (sensor fusion) для формування моделі середовища. Запропоноване рішення забезпечує баланс між точністю позиціонування, швидкодією та безпекою автономного руху в динамічному міському середовищі.*

***Ключові слова:** кіберфізична система, безпілотне таксі, багаторівнева архітектура, злиття даних, автономний рух.*

Stopchak O.

Khmelnytskyi National University, Ukraine

CYBER-PHYSICAL SYSTEM “UNMANNED TAXI”

***Abstract.** The paper considers the concept of an unmanned taxi as a complex cyber-physical system, where physical motion processes are integrated with digital data analysis algorithms in real time. A multi-level system architecture is proposed, including the levels of sensor technology (using LiDAR, Radar, GNSS), perception (YOLO algorithms), localization, planning, and control. A sensor fusion mechanism is described for forming an environment model. The proposed solution provides a balance between positioning accuracy, speed, and safety of autonomous movement in a dynamic urban environment.*

***Keywords:** cyber-physical system, unmanned taxi, multi-level architecture, data fusion, autonomous movement.*

Безпілотне таксі є складною кіберфізичною системою, у якій фізичні процеси руху транспортного засобу безпосередньо залежать від цифрових алгоритмів аналізу сенсорних даних [1]. Основною особливістю такої системи є необхідність забезпечення роботи в режимі реального часу за умов динамічного міського середовища [2]. На відміну від індивідуальних автономних автомобілів, концепція безпілотного таксі передбачає інтеграцію транспортного

*VI Міжнародна наукова конференція «ВОЄННІ КОНФЛІКТИ ТА ТЕХНОГЕННІ КАТАСТРОФИ:
історичні та психологічні наслідки»*

засобу з інтелектуальною інфраструктурою, диспетчерськими сервісами, хмарними платформами та мобільними застосунками [3]. Таким чином, система безпілотного таксі є повноцінною кіберфізичною системою, що поєднує фізичні компоненти (сенсори, приводи, транспортний засіб) з програмними алгоритмами, мережевими сервісами та системами обробки даних.

Запропонована архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» має багаторівневу структуру – рис. 1.

Сенсорний рівень. Використовуються LiDAR, Radar, відеокамери, GNSS та IMU. Дані з різних сенсорів надходять до модуля злиття даних (sensor fusion), що формує узгоджену модель навколишнього середовища.



Рис. 1 – Багаторівнева архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Рівень сприйняття (Perception). Реалізуються алгоритми детекції та класифікації об'єктів (зокрема на основі YOLO), розпізнавання дорожньої розмітки та світлофорів.

Рівень локалізації. Інтеграція GNSS та IMU забезпечує стабільне визначення положення транспортного засобу навіть за часткової втрати супутникового сигналу.

Рівень планування. Формується безпечна траєкторія руху з урахуванням дорожніх правил та динамічних перешкод.

Рівень керування. Контролер реального часу формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів із забезпеченням стабільності руху.

Ключовими особливостями запропонованої архітектури є: модульність та масштабованість, розподіл задач між контуром реального часу та високопродуктивним обчислювальним модулем, резервування критичних сенсорів, підтримка fail-safe режиму, можливість оновлення програмного забезпечення. Запропонований підхід дозволяє забезпечити баланс між швидкістю, точністю позиціонування та безпечністю автономного руху.

Джерела та література

1. Choi B., Seo W., Yang J. H. HMI Interfaces of Unmanned Automated Taxi Services: What Is Essential Information?. Communications in Computer and Information Science. Cham, 2023. P. 422–430. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-49215-0_50.

2. Onboard path planning for unmanned aircraft automated taxi using a virtual line-graph / S. Benders et al. AIAA SCITECH 2023 Forum, National Harbor, MD & Online. Reston, Virginia, 2023. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2023-0396>.

3. State-Based Behavioral Modeling Framework for Electric Taxis: Extending from Traditional Fleets to Unmanned Fleets / Z. Lu et al. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2026. URL: <https://doi.org/10.3233/atde251471>.

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Презентація

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем



Кіберфізична система «Безпілотне таксі»

Здобувач: Стопчак Олександр
Олександрович
Науковий керівник: к.т.н. доцент, Березька
Катерина Миколаївна

Хмельницький - 2026

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробити кіберфізичну систему «Безпілотне таксі» на основі сучасних методів автономного керування, комп'ютерного зору та злиття сенсорних даних для забезпечення безпечного й ефективного функціонування автономного транспортного засобу в умовах міського середовища.

Об'єктом дослідження є процес функціонування автономного транспортного засобу в складі кіберфізичної системи безпілотного таксі.

Предметом дослідження є методи, моделі та програмно-апаратні засоби побудови кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», зокрема алгоритми локалізації, комп'ютерного зору, злиття сенсорних даних та автономного керування транспортним засобом.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- Провести аналіз сучасних систем безпілотного таксі, архітектур автономного транспорту та сенсорних технологій.
- Розробити апаратну й програмну архітектуру кіберфізичної системи «Безпілотне таксі».
- Виконати математичне та імітаційне моделювання руху транспортного засобу.
- Реалізувати й дослідити алгоритми локалізації, злиття сенсорних даних та детекції транспортних засобів на базі YOLO.
- Розробити користувацький інтерфейс і провести оцінювання ефективності запропонованої системи.

НАУКОВА НОВИЗНА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наукова новизна отриманих результатів:

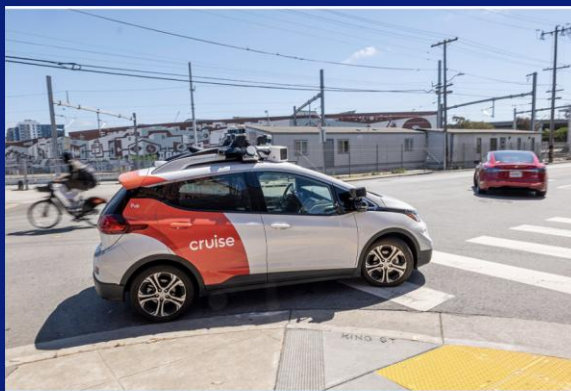
- набув подальшого розвитку підхід до побудови кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» на основі інтеграції модулів комп'ютерного зору, локалізації та автономного керування, який, на відміну від існуючих рішень, поєднує алгоритми детекції транспортних засобів на базі YOLO із механізмами злиття сенсорних даних та забезпечує функціонування системи в режимі реального часу;
- удосконалено архітектуру програмно-апаратної взаємодії компонентів автономного транспортного засобу шляхом розподілу функцій між сенсорною підсистемою, edge-обчисленнями та хмарною інфраструктурою, що дозволило підвищити ефективність обробки даних і забезпечити масштабованість системи;

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», що може бути використана як основа для створення автономних транспортних платформ, систем інтелектуальної міської мобільності та роботизованих сервісів перевезення.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Стрімкий розвиток автономного транспорту та зростання потреб у створенні інтелектуальних кіберфізичних систем, здатних забезпечити безпечне, ефективне та автономне керування транспортними засобами в умовах сучасного міського середовища.;
- Проблеми перевантаження дорожньої інфраструктури, високого рівня аварійності, людського фактора та недостатньої ефективності логістичних процесів.;
- Використання безпілотних транспортних засобів дозволяє зменшити кількість дорожньо-транспортних пригод, підвищити безпеку перевезень, оптимізувати транспортні потоки та покращити якість міської мобільності;
- Розвиток концепцій Smart City та Industry 4.0 формує потребу у створенні масштабованих автономних транспортних платформ, здатних інтегруватися з хмарною інфраструктурою та цифровими сервісами міської інфраструктури;
- Таким чином, дослідження, присвячене розробці кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки спрямоване на вирішення важливих задач автономного керування транспортними засобами та розвитку інтелектуальних транспортних систем.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ



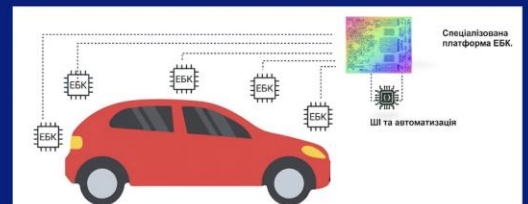
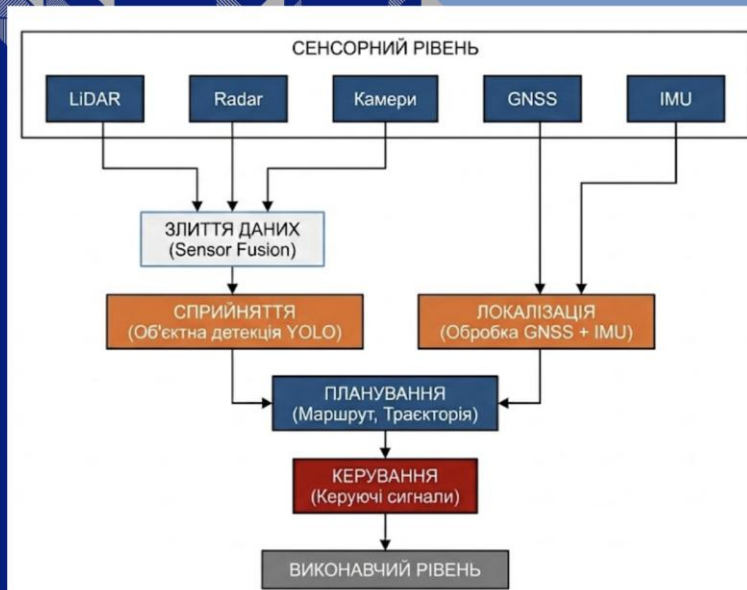
Зображення безпілотного автомобіля
компанії Cruise

- Методи комп'ютерного зору;
- Методи локалізації та навігації;
- Методи планування траєкторії;
- Методи керування рухом;
- Методи злиття сенсорних даних;
- Методи обробки даних у кіберфізичних системах.

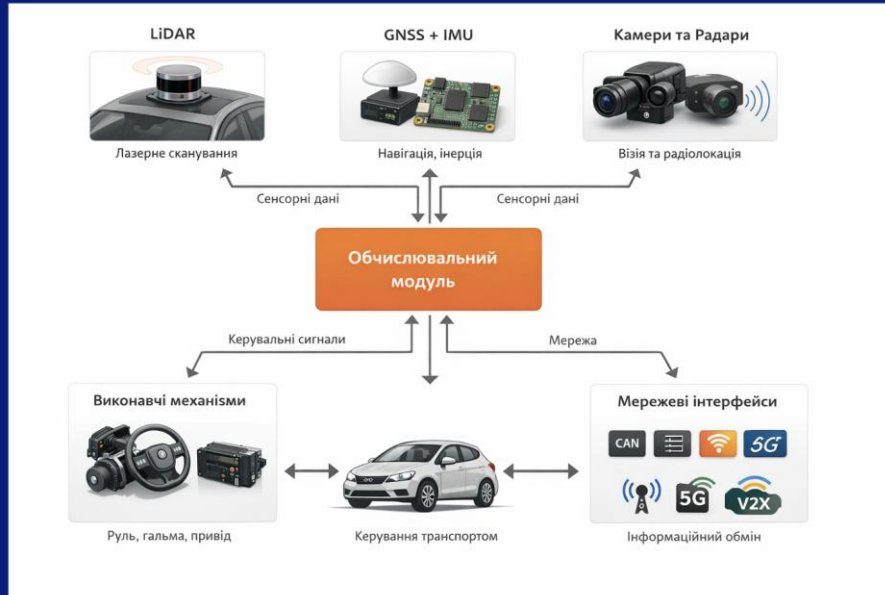
АНАЛІЗ ВІДОМИХ РІШЕНЬ НА РИНКУ

Критерій	Waymo	Cruise	Apollo Go	Zoox
Рівень автономності	SAE Level 4	SAE Level 4	SAE Level 4	SAE Level 4
Тип транспортної платформи	Модифікований серійний автомобіль	Модифікований електромобіль	Серійні авто + власні моделі	Спеціально спроектований автономний електромобіль
Сенсорна система	LiDAR + Radar + Камери	LiDAR + Radar + Камери	LiDAR + Камери + V2X	LiDAR + Radar + Камери
Наявність HD-карт	Так	Так	Так	Так
Архітектура обчислень	Бортова + хмарна	Бортова централізований контроль	+ Інтеграція з міською інфраструктурою	Повністю автономна бортова система
Інтеграція мобільним сервісом	з Waymo One	Cruise App	Apollo Go App	Власний сервіс
Географія експлуатації	США	США	Китай	США (тестування)

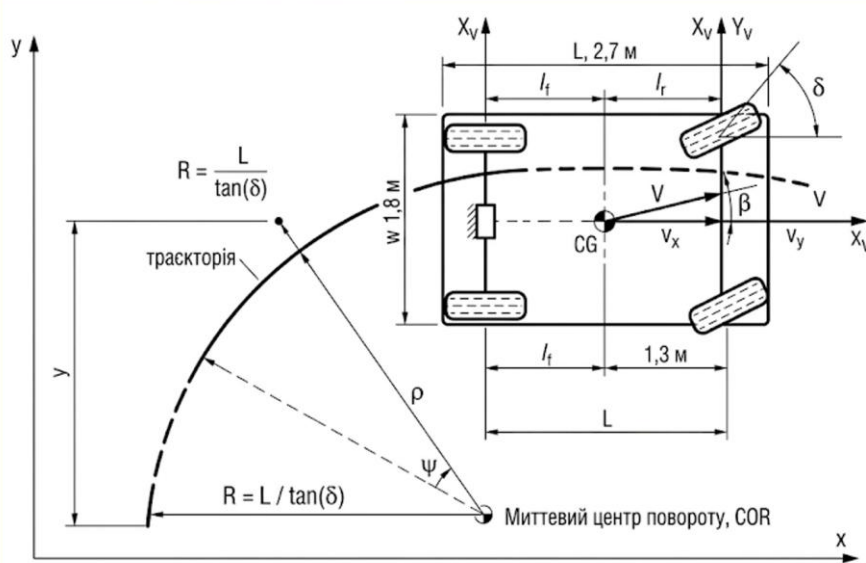
АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ



СТРУКТУРНА СХЕМА КОМПОНЕНТІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ»



КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ АВТОМОБІЛЯ

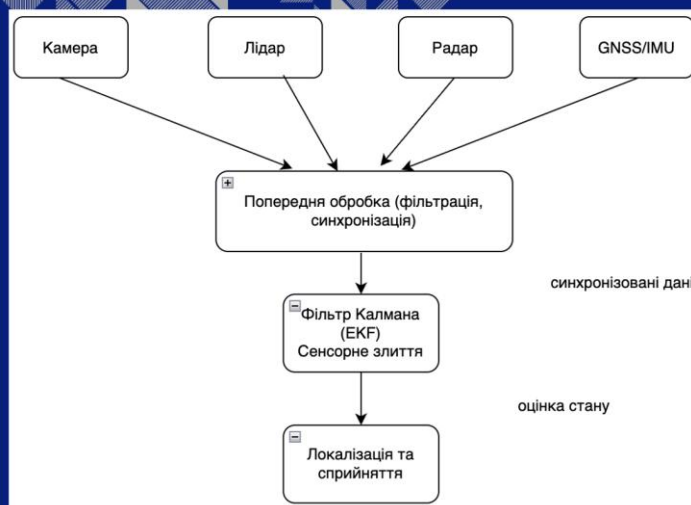


- ρ - траєкторія
- δ - кут повороту передніх коліс, 25°
- ψ - кут гартування, 15°
- \dot{h} - курс, $20^\circ/\text{с}$
- CG - Центр мас
- ρ - радіус повороту в CG, 10 м
- V - швидкість, 20 м/с
- l_f - відстань до передньої осі, 1,4 м
- l_r - відстань до задньої осі, 1,3 м
- CG - Центр мас
- β - кут ковзання, 3°
- v_x - повздовжня швидкість
- v_y - поперечна швидкість
- x, y - глобальні координати X_w, Y_w
- x, y - глобальні координати X_w, Y_w
- Y_v - система координат автомобіля

ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ PID ТА MPC

Критерій	PID-регулятор	MPC
Принцип роботи	Реактивне керування (на основі похибки)	Прогнозуюче керування
Обчислювальна складність	Низька	Висока
Врахування обмежень	Обмежене	Повне врахування
Точність слідування траєкторії	Середня	Висока
Стійкість до збурень	Обмежена	Висока
Використання моделі	Необов'язкове	Обов'язкове
Придатність для реального часу	Висока	Залежить від ресурсів

АЛГОРИТМ ЗЛИТТЯ СЕНСОРНИХ ДАНИХ ТА ФІЛЬТР КАЛМАНА



Обчислення матриці коваріації похибки

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q},$$

де \mathbf{F}_k - матриця Якобі функції переходу,
 \mathbf{Q} - матриця шуму процесу.

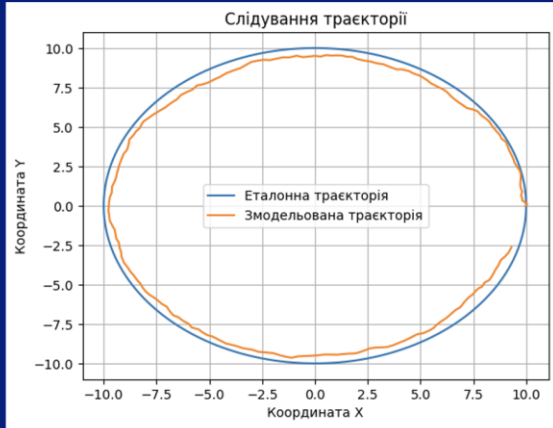
Оновлення оцінки стану здійснюється за допомогою коефіцієнта Калмана:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R})^{-1},$$

де \mathbf{H}_k - матриця Якобі функції вимірювання,
 \mathbf{R} - матриця шуму вимірювань.

Алгоритм злиття сенсорних даних з урахуванням фільтра Калмана

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ»

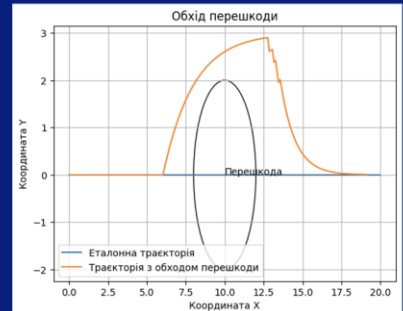


Слідування транспортного засобу еталонній траєкторії

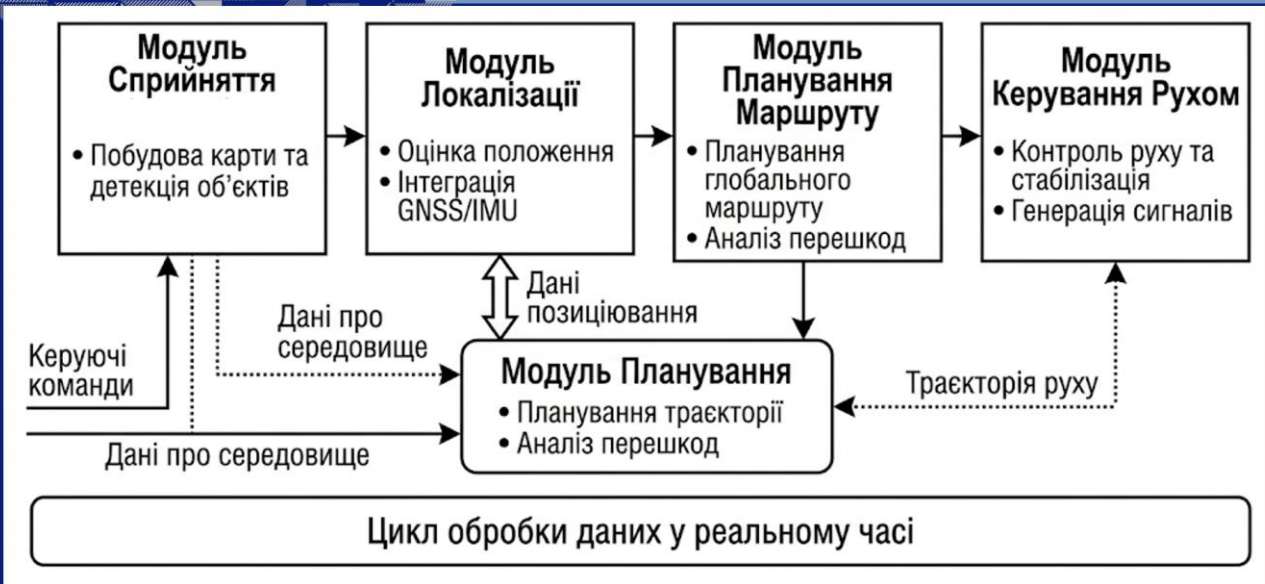


Залежність похибки слідування траєкторії від часу

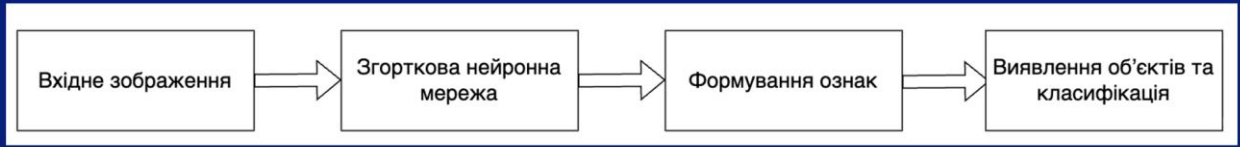
Обхід перешкоди транспортним засобом



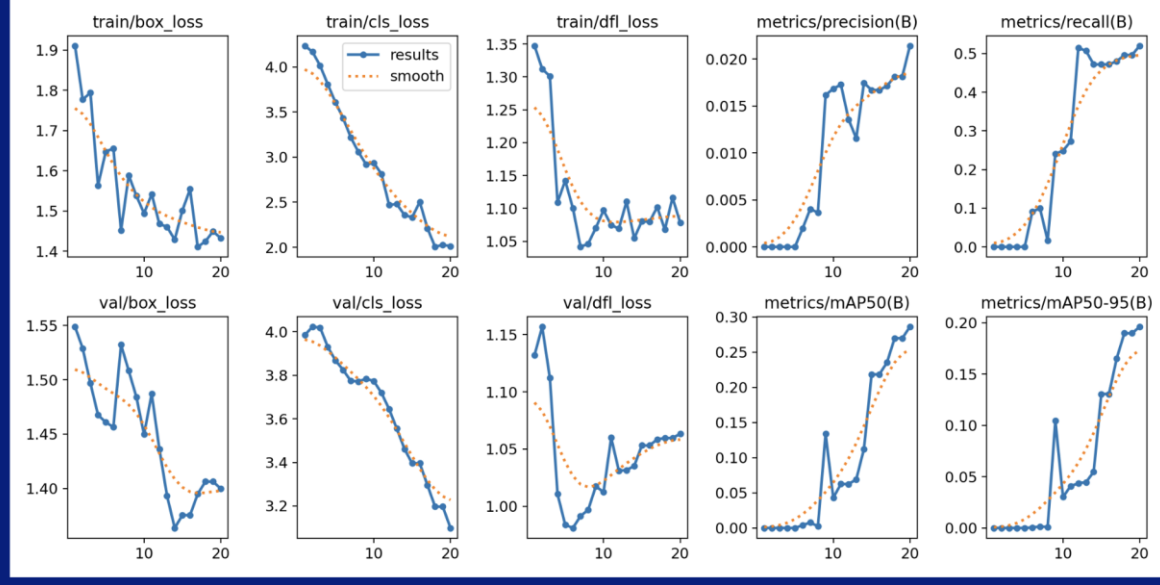
СТРУКТУРНА СХЕМА МОДУЛІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ»



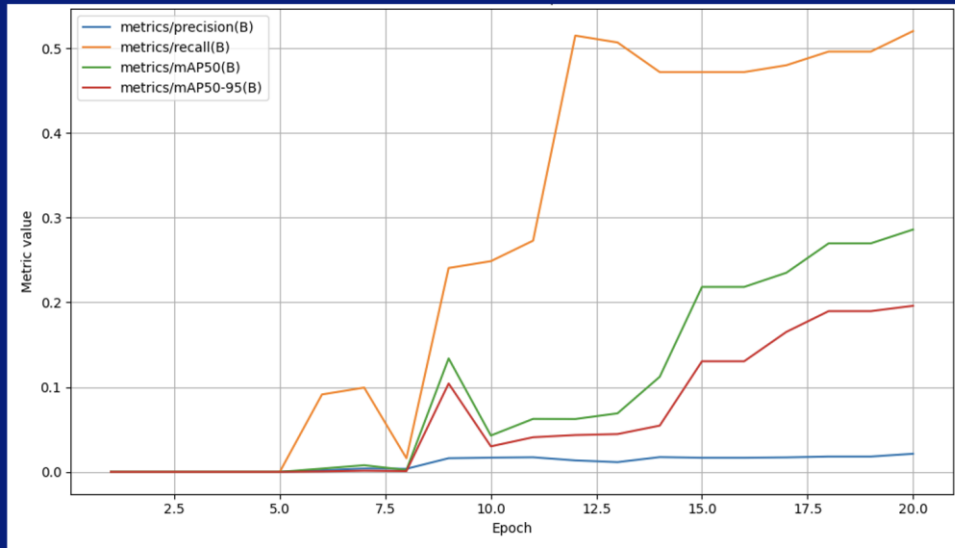
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ – МОДУЛЬ СПРИЙНЯТТЯ



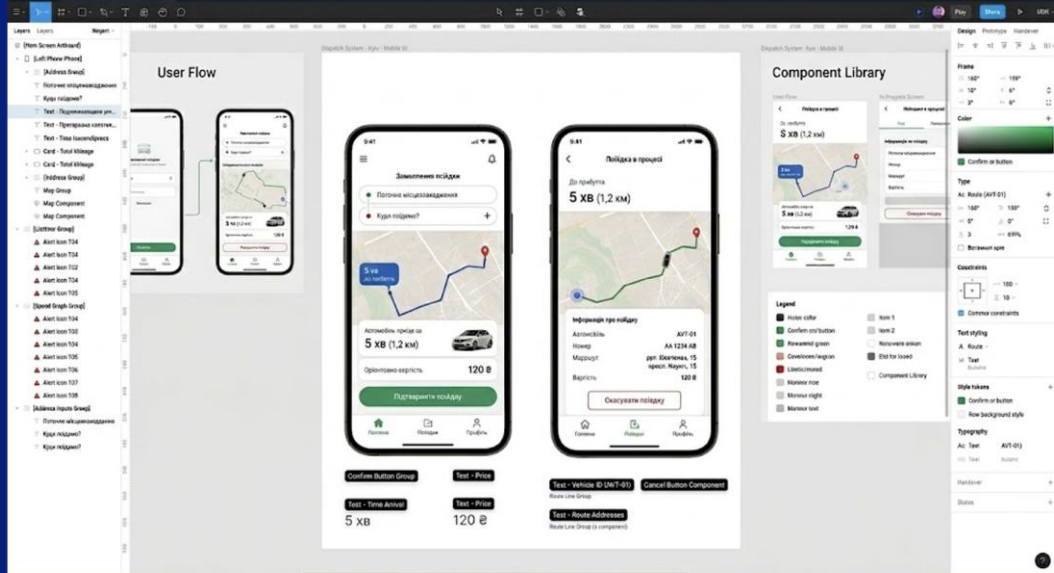
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА



ІНТЕРФЕЙС КОРИСТУВАЧА



ВИСНОВКИ

- У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання розробки кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» на основі сучасних методів автономного керування, комп'ютерного зору та інтелектуальної обробки даних.
- У ході виконання роботи проведено аналіз сучасних систем безпілотного транспорту, архітектур автономних платформ та сенсорних технологій, що використовуються в автономних транспортних засобах. На основі проведеного аналізу сформовано технічні вимоги до кіберфізичної системи та визначено основні принципи її побудови.
- У роботі розроблено апаратну та програмну архітектуру системи «Безпілотне таксі», що включає сенсорну підсистему, обчислювальний модуль, модулі локалізації, планування маршруту та керування рухом. Запропоновано архітектуру взаємодії з хмарною інфраструктурою та реалізовано модель інтеграції компонентів у єдину кіберфізичну систему.
- Виконано математичне та імітаційне моделювання руху транспортного засобу, що дозволило дослідити особливості функціонування системи в умовах автономного руху. Для підвищення точності локалізації реалізовано алгоритм злиття сенсорних даних на основі розширеного фільтра Калмана.
- У межах експериментальної частини проведено апробацію моделі детекції транспортних засобів на базі архітектури YOLO11s. Отримані результати підтвердили можливість використання сучасних нейронних мереж для задач комп'ютерного зору в автономних транспортних системах. Аналіз метрик якості, графіків навчання та матриць помилок дозволив оцінити ефективність роботи моделі та визначити напрями її подальшого вдосконалення.
- Також у роботі розроблено концепцію програмного інтерфейсу користувача, що включає мобільний застосунок та диспетчерський модуль для моніторингу й керування транспортними засобами.

ПУБЛІКАЦІЇ

- О. Стопчак. Кіберфізична система “Безпілотне таксі”. Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки наслідки (до 40-х роковин аварії на Чорнобильській АЕС): Збірник тез VI Міжнародної наукової конференції, 23-24 квітня 2026 р. / упоряд. А.А. Криськов, О.М. Горішна, Н.В. Габрусєва – Тернопіль: ФОП Осадца Ю. В., 2026. ст. 151-152.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система «Безпілотне таксі»
 Автор Олександр СТОПЧАК
 Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
 Науковий керівник: к.т.н., доцент Катерина БЕРЕЗЬКА

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

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

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
 - 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
 - 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
 - 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел
- Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 10,55%; та системою Anti-Plagiarism складає 19%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

18.05.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Підпис



Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег САВЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Катерина БЕРЕЗЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Олександр Стопчак

Тема: Кіберфізична система «Безпілотне таксі»

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень ____; кількість сторінок записки 85

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень. У роботі розглянуто актуальну задачу розробки кіберфізичної системи автономного транспортного засобу типу «Безпілотне таксі» на основі сучасних методів комп'ютерного зору, сенсорного злиття даних та алгоритмів автономного керування.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню ____
Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз сучасних систем автономного транспорту, методів комп'ютерного зору, сенсорних систем та архітектур безпілотних транспортних платформ.

У другому розділі розроблено апаратну та програмну архітектуру кіберфізичної системи «Безпілотне таксі», обґрунтовано вибір сенсорної підсистеми, обчислювального модуля та мережевої інфраструктури.

У третьому розділі виконано математичне та імітаційне моделювання руху транспортного засобу, реалізовано алгоритм сенсорного злиття даних на основі розширеного фільтра Калмана та описано інтеграцію модулів у єдину систему.

У четвертому розділі реалізовано програмний інтерфейс користувача та проведено експериментальну апробацію моделі детекції транспортних засобів на базі архітектури YOLO11s. Проведено аналіз метрик якості та результатів роботи моделі.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній проблемі розвитку автономного транспорту та інтелектуальних транспортних систем. У роботі використано сучасні методи комп'ютерного зору, машинного навчання та сенсорного злиття даних. Запропонована архітектура системи є модульною та придатною до подальшого масштабування. Позитивною стороною роботи є поєднання математичного моделювання, алгоритмів локалізації та практичної реалізації моделі детекції транспортних засобів.

5. Негативні сторони роботи: У роботі недостатньо детально розглянуто питання оптимізації алгоритмів для роботи в умовах складних погодних умов та високої інтенсивності дорожнього руху. Також потребують подальшого дослідження питання підвищення точності моделі детекції та розширення навчального датасету.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: —

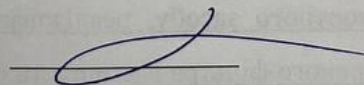
9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 75.00 (С)

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

Богданович Леонід Іванович, зав. каф. ІІІІ ХДУ

“15” 05 2026р.



Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Олександра СТОПЧАКА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІМ-24-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

1 травня 2026 року



Mon May 18 08:28:54 EEST 2026, Медзатий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 19.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилоч в документах: 13%

ID: 271569 Назва: МКР Кіберфізична система «Безпілотне таксі» Додано в БД: 2026-05-18 Автора: Олександр СТОПЧАК Керівники: Катерина БЕРЕЗЬКА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	109756	878	21923 (20%)	213 (24%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269836	Назва: Звіт з НДП Кіберфізична система «Безпілотне таксі» Додано в БД: 2026-03-17 Автора: Стопчака О.О. Керівники: Капустян М.В. Консультанти: Опоненти:	20378 (19.0%)	201 (23.0%)

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Олександр СТОПЧАК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система «Безпілотне таксі»

Експерт: Катерина БЕРЕЗЬКА

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 10.55%

Коефіцієнт подібності 2: 3.69%

Мікропробіли: 14

Заміна букв: 6

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-05-18 07:52:18.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2026-05-18

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт