

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ,
МЕХАТРОНИКИ І РОБОТОТЕХНІКИ

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра

на тему:

**Комп'ютеризована система вимірювання параметрів руху за
відеозображеннями транспортних засобів**

Виконав: студент 4 курсу, групи МТ-5
напряму Метрологія та інформаційно-
вимірювальні системи

Васільєв Андрій Іванович

Керівник д.т.н., професор
Пількевич Ігор Анатолійович

Рецензент _____.

Житомир 2026р

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальної техніки
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« 22 » квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студента Васільєва Андрія Івановича

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система вимірювання параметрів руху за відеозображеннями транспортних засобів

Затверджена Наказом по університету від «22» квітня 2026 р. № 175/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «19» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: координати центр мас транспортних засобів у просторі контролю, лінійне переміщення, миттєва швидкість руху транспортних засобів, точність визначення відстані та швидкості для зображення 1024x576 пікселів дорівнює ± 10.4175 (мм) та 0.15 км/год.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці): аналіз існуючих систем вимірювання параметрів руху, розробка структурної схеми, розробка блок-схеми алгоритму та програми, розрахунок надійності та точності, експериментальний аналіз системи, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень): структурна схема, принципова схема, блок-схема алгоритму, складові системи (плакат)

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-7	Пількевич І.А.		

7. Дата видачі завдання 22 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Одержання завдання, аналіз технічних вимог та збір даних	22.04.2026-30.04.2026	
2	Аналіз сучасних систем визначення швидкості транспортних засобів	01.05.2026-08.05.2026	
3	Розробка структурної схеми системи	09.05.2026-16.05.2026	
4	Програмна реалізація модулів нейромережі	17.05.2026-23.05.2026	
5	Розробка блок-схеми алгоритму та програми	24.05.2026-29.05.2026	
6	Проведення експериментальних досліджень	30.05.2026-04.06.2026	
7	Огляд охорони праці	05.06.2026-09.06.2026	
8	Оформлення формування висновків, пояснювальної записки, графічного матеріалу,	10.06.2026-14.06.2026	

Студент _____

Васільєв А.І.

Керівник роботи _____

Пількевич І.А.

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота бакалавра на тему «Комп'ютеризована система вимірювання параметрів руху за відеозображенням транспортних засобів» містить 84 сторінок, 19 рисунків, 5 таблиць, 20 формул, 26 джерел.

Обґрунтовано переваги пасивної відеоаналітики перед радарними системами для моніторингу трафіку. Розроблено структурну схему на основі вимірювального конвеєра. Програмна частина реалізована мовою Python із використанням OpenCV та нейромережі YOLOv4. Для стабілізації координат застосовано експоненціальне згладжування. Виконано розрахунки надійності, проведено експериментальну верифікацію та розглянуто заходи з охорони праці й пожежної безпеки

Ключові слова: комп'ютерний зір, YOLOv4, вимірювання швидкості, транспортні засоби, OpenCV, експоненціальне згладжування.

ANNOTATION

Bachelor's thesis on the topic «Computerized System for Measuring Motion Parameters from Video Images of Vehicles» contains 84 pages, 19 figures, 5 tables, 20 formulas, 26 sources.

The work substantiates the advantages of passive video analytics over radar systems for traffic monitoring. A structural diagram based on a measuring pipeline is developed. The system is implemented in Python using OpenCV and YOLOv4 neural network. Exponential smoothing is applied to stabilize measurement results. Reliability calculations, experimental verification, and occupational health and fire safety measures are addressed.

Keywords: vision, YOLOv4, speed measurement, vehicles, OpenCV, exponential smoothing.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	8
1.1. Призначення та область застосування.....	8
1.2. Умови експлуатації	8
1.3. Технічні параметри системи.....	9
1.4. Вимоги до конструктивного оформлення.....	10
2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ	12
2.1 Актуальність розробки.....	12
2.2 Аналіз аналогів.....	13
2.3 Порівняльний аналіз.....	18
Висновки до розділу 2.....	20
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	22
3.1 Обґрунтування складових системи.....	22
3.2 Обґрунтування варіантів побудови.....	26
3.3 Побудова структурної схеми.....	32
Висновки до розділу 3.....	39
4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ.....	41
4.1 Математичний розрахунок параметрів руху.....	41
4.2 Розробка алгоритму.....	45
4.3 Розробка програми.....	48
4.4 Опис функціонування програми.....	57
Висновки до розділу 4.....	60
5. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ.....	62
5.1 Поняття надійності.....	62
5.2 Розрахунок інтенсивності відмов апаратної частини.....	63
5.3 Розрахунок середнього наробітку на відмову та ймовірності безвідмовної роботи.....	64
Висновки до розділу 5.....	66
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ.....	68
6.1 Тестування системи.....	68
Висновки до розділу 6.....	73
7. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	74
7.1. Аналіз небезпечних факторів.....	74
7.2 Технічні заходи.....	75
7.3 Виробнича санітарія.....	76
7.4 Пожежна безпека.....	77
Висновки до розділу 7.....	78
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ.....	85

					МММТ 480.004.004 – ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютеризована система вимірювання параметрів руху за відеозображенням транспортних засобів	Літ.	Арк.	Аркшів
Розробив		Васильєв А.І					5	77
Перевірив		Пількевич І.А.				ДУ «Житомирська політехніка», МТ-5		
Рецензент								
Н. контр.								
Затверд.		Подчашинський Ю.О.			Пояснювальна записка			

ВСТУП

Актуальність теми: Зростання інтенсивності дорожнього руху в сучасних мегаполісах потребує впровадження інтелектуальних транспортних систем для моніторингу трафіку. Традиційні засоби метрологічного контролю (радари, індуктивні петлі) мають обмеження щодо одночасної класифікації великої кількості об'єктів та вимагають значних витрат на монтаж. Використання методів комп'ютерного зору, зокрема нейромережевої моделі YOLOv4, дозволяє створити гнучку інформаційно-вимірювальну систему, здатну в реальному часі визначати не лише кількість, а й динамічні параметри руху кожного транспортного засобу окремо.

Практичне значення: Розроблена програма забезпечує автоматизацію збору статистичних даних про рух транспортного засобу, що дозволяє проводити аналіз завантаженості доріг та підвищувати безпеку руху. Система дозволяє ідентифікувати транспортний засіб за чотирма класами (легкові, вантажівки, автобуси, мотоцикли) та розраховувати їх швидкість на основі відеопотоку.

Вироби-аналоги та їх недоліки: Стаціонарні лазерні вимірювачі швидкості є високовартісними та вузькоспеціалізованими. Програмні аналоги на базі застарілих алгоритмів детекції об'єктів мають низьку точність при зміні освітлення або перекритті об'єктів у кадрі. Застосування архітектури YOLOv4 вирішує проблему швидкодії та точності вимірювань у складних умовах.

Об'єкт дослідження: процес автоматизованого вимірювання параметрів руху ТЗ за допомогою засобів відеофіксації.

Предмет дослідження: алгоритми детекції об'єктів (YOLOv4), методи трекінгу та математичні моделі перерахунку піксельних координат у фізичні величини (переміщення в мм, швидкість у мм/с).

Мета роботи: розробка та дослідження комп'ютеризованої системи для ідентифікації транспортних засобів та вимірювання їх динамічних характеристик на основі відеозображень.

Для поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		6

1. Провести огляд методів вимірювання параметрів руху транспортного засобу за відеоданими.
2. Розробити структурну схему інформаційно-вимірювальної системи.
3. Розробити алгоритм програмної обробки відеопотоку та фільтрації результатів (згладжування координат).
4. Оцінити надійність розробленого програмного забезпечення.
5. Виконати експериментальні дослідження з оцінюванням похибок вимірювання швидкості та переміщення.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						7
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1 Призначення та межа застосування

Розроблювана система призначена для автоматичного виявлення, класифікації та вимірювання динамічних характеристик транспортних засобів у реальному часі на основі аналізу відеозображень. Система має використовуватися в складі інтелектуальних транспортних систем для:

- моніторингу інтенсивності дорожнього руху на магістралях та міських перехрестях;
- збору статистичних даних про завантаженість доріг у розрізі різних типів транспортного засобу;
- дистанційного метрологічного контролю швидкісного режиму на контрольованих ділянках автошляхів.

Область застосування системи обмежена обробкою відеопотоків зі стаціонарних камер спостереження, встановлених під ракурсом, що забезпечує чітку видимість об'єктів (наприклад, роздільна здатність 1024x576 або Full HD). Система забезпечує вимірювальні операції для 4-х класів об'єктів: легкових автомобілів (car), автобусів (bus), вантажівок (truck) та мотоциклів (motorcycle). Межі вимірювання параметрів руху (швидкості та переміщення) визначаються зоною прямої видимості камери та параметрами її калібрування (співвідношенням піксель/мм для конкретної ділянки дороги).

1.2 Умови експлуатації

З огляду на архітектуру системи, її складові частини функціонують у різних середовищах:

- Блок обробки вимірювальної інформації: призначений для експлуатації в закритих опалювальних приміщеннях за температури навколишнього повітря від + 15°C до + 25°C та відносної вологості не більше 80%.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						8
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

– Відеокамери (первинні вимірювальні перетворювачі): повинні забезпечувати стабільне захоплення зображення в умовах відкритого простору за температури від мінус 20°C до плюс 50°C. Корпуси камер мають відповідати класу захисту не нижче IP66 для запобігання впливу атмосферних опадів та пилу.

– Характер роботи та умови живлення: Система забезпечує функціонування у режимі безперервного моніторингу в реальному масштабі часу (характер роботи - цілодобовий, 24/7).

– Живлення блоку обробки здійснюється від мережі змінного струму напругою (220 ±22)В із частотою 50Гц. Для запобігання втраті вимірювальних даних (таблиць результатів) при збоях енергопостачання рекомендується застосування джерел безперебійного живлення.

Вплив механічних чинників та завад:

– Механічні впливи: на відеокамери можуть діяти вібрації, спричинені важкого транспорту по опорних конструкціях, що може призводити до випадкової похибки детекції.

– Оптичні завади: робота при змінному природному та штучному освітленні, наявність бліків, світла фар у нічний час та динамічних тіней від об'єктів. Стійкість до цих факторів забезпечується алгоритмами нейронної мережі YOLOv4 та попередньою фільтрацією у OpenCV.

1.3 Технічні параметри системи

Вхідним сигналом для системи є цифровий відеопотік високої чіткості (Full HD) або з можливістю програмного вибору роздільної здатності (1024x576 пікселів). Для забезпечення необхідної точності вимірювання динамічних параметрів переміщення 20 мм та швидкість 2км/год .

Результати вимірювань надаються у вигляді структурованої таблиці даних, що містить такі параметри для кожного ідентифікованого об'єкта:

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						9
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

- номер кадру та часова мітка (сек);
- координати центру мас об'єкта у дискретних точках (д.т.);
- фізичні координати об'єкта (мм), перераховані за допомогою масштабного коефіцієнта;
- згладжені координати (мм), отримані методом експоненціального згладжування;
- вектор переміщення R (мм);
- миттєва швидкість V (мм/с або км/год).

1.4 Вимоги до конструктивного оформлення

Ком'ютеризована інформаційно-вимірювальна система повинна мати розподілену просторову конструкцію і складатися з таких основних конструктивних блоків:

- первинних вимірювальних перетворювачів (зовнішніх ІР-відеокамер);
- центрального обчислювального блоку (персонального комп'ютера/робочої станції);
- засобів відтворення та відображення вимірювальної інформації(монітора оператора).

Конструктивне виконання периферійного вимірювального модуля (ІР-відеокамер) повинно забезпечувати їх тривалу безперервну експлуатацію у відкритому просторі (на дорожніх опорах та консолях) за будь-яких погодно-кліматичних умов:

- камери повинні бути інтегровані у спеціальні захисні герметичні термокожухи з класом пило- та вологозахисту не нижче ІР66 згідно з ДСТУ EN 60529:2018;
- конструкція захисного корпусу повинна містити блоки автоматичного сонцезахисного козирка, термостата та елементів підігріву для забезпечення стабільного температурного режиму матриці та об'єктива в діапазоні від мінус 20 °С до плюс 50 °С;

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		10

– конструкція кріплення (кронштейна) повинна забезпечувати жорстку фіксацію камери для мінімізації кутових вібрацій та деформацій від вітрового навантаження, що є критичним для збереження точності калібрування вимірювального створу.

Центральний обчислювальний блок конструктивно реалізується у вигляді окремого системного блока стаціонарного або промислового виконання для розміщення всередині приміщення (посту моніторингу).

– Конструкція материнської плати та корпусу ЕОМ повинна передбачати наявність високошвидкісних інтерфейсних роз'ємів (PCI Express) для встановлення дискретної графічної плати апаратного прискорення нейромереж (GPU NVIDIA RTX).

– Корпус ЕОМ повинен мати ефективну примусову систему повітряного або рідинного охолодження для відведення значних теплових потоків, які генеруються графічним процесором під час цілодобового такт-аналізу відеопотоку у реальному часі.

Засоби відображення інформації (монітор оператора) повинні виконуватися як окремий конструктивний елемент ергономічного типу з можливістю регулювання кута нахилу та висоти під робоче місце оператора системи. Екран монітора повинен мати антивідблискове покриття для забезпечення чіткого візуального сприйняття вихідних таблиць даних та просторово-часових графіків трендів руху транспортних засобів без додаткового напруження зору.

З'єднання між периферійними камерами та ЕОМ має здійснюватися за допомогою екранованого мережевого кабелю (FTP).

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						11
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ

2.1 Актуальність розробки

Сучасний етап розвитку транспортної інфраструктури в Україні характеризується стрімким і безперервним зростанням кількості транспортних засобів [3]. Така тенденція призводить до суттєвого ускладнення дорожнього трафіку, що, за відсутності належного контролю, спричиняє збільшення кількості аварійних ситуацій на дорогах. Більшості власників авто не завжди суворо дотримуються правил дорожнього руху, що зумовлює гостру потребу у впровадженні автоматизованих систем моніторингу.

Контроль параметрів руху (швидкості, переміщення, інтенсивності) є критично важливим інструментом для вирішення ряду соціально-економічних та технічних завдань:

- Забезпечення безпеки та попередження аварійності: своєчасна фіксація порушень швидкісного режиму дозволяє мінімізувати ризики виникнення ДТП на складних ділянках доріг. Контроль параметрів руху дає змогу не лише фіксувати факт порушення, а й забезпечувати юридично значущу доказову базу;

- Оптимізація міської логістики: аналіз інтенсивності потоків ТЗ є основною для планування маршрутів громадського транспорту та приватних авто. Це дозволяє зменшити завантаженість магістралей та підвищити ефективність використання дорожньої мережі;

- Автоматизація контролю ПДР: впровадження комп'ютеризованих систем дозволяє здійснювати безперервний моніторинг у режимі реального часу, виключаючи людський фактор та забезпечуючи високу ймовірність правильної класифікації об'єктів.

З точки зору метрології, базовим завданням такої системи є не просто візуальне виявлення об'єкта, а отримання його кількісних динамічних та просторових характеристик із заданою точністю, що вимагає забезпечення

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		12

єдності вимірювань, мінімізації інструментальних похибок та захисту вимірювальної інформації від зовнішніх завад [13].

2.2 Аналіз аналогів

Для вирішення задачі автоматичного вимірювання параметрів руху транспортних засобів у сучасній дорожній інфраструктурі застосовується ряд технічних підходів. Кожен із них характеризується певним фізичним принципом вимірювання, конструктивним виконанням апаратури та метрологічними характеристиками. У цьому підпункті розглянуто три найбільш поширені технічні рішення: радарний метод, комбінований метод (камера з радаром) та метод двох камер для контролю середньої швидкості на ділянці дороги. Та комп'ютеризовану систему вимірювання параметрів руху.

Радарний метод є одним із найстаріших і найбільш відпрацьованих способів вимірювання швидкості руху транспортних засобів. Його фізичну основу складає ефект Доплера — зміна частоти електромагнітної хвилі, що відбивається від рухомого об'єкта, відносно частоти випроміненого сигналу. Приклад радару зображено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Радар

Принцип роботи радарного вимірювача полягає в такому: антена радару випромінює безперервний або імпульсний сигнал у мікрохвильовому діапазоні (зазвичай 10,5 ГГц, 24,1 ГГц або 34,7 ГГц). Сигнал досягає транспортного засобу і відбивається назад до приймальної антени. Внаслідок відносного руху

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		13

об'єкта виникає доплерівський зсув частоти Δf , величина якого прямо пропорційна швидкості:

$$\Delta f = 2 \cdot v \cdot f_0 / c, \quad (2.1)$$

де v — швидкість транспортного засобу, f_0 — частота випроміненого сигналу, c — швидкість світла. Мікропроцесорний блок обробки обчислює зсув частоти та перетворює його у значення швидкості.

До технічних переваг радарного методу відносяться:

- висока швидкодія — результат вимірювання отримується менш ніж за 0,1 секунди;
- незалежність від умов освітлення — радар ефективно працює вдень, вночі та в умовах туману;
- можливість вимірювання на відстані 100–1000 м залежно від конструкції;
- можливість мобільного застосування (ручні та стаціонарні версії).

Разом із тим радарний метод має суттєві обмеження. Зокрема, за наявності кількох транспортних засобів у зоні вимірювання прилад може зафіксувати швидкість не того об'єкта, на який спрямований. Кутова похибка виникає через те, що вимірюється лише проекція вектора швидкості на напрям поширення радіохвилі.

Комбіновані системи, що поєднують радарний вимірювач швидкості з відеокамерою (рисунки 2.2), є найбільш поширеним рішенням для стаціонарних пунктів автоматичного контролю. Такі системи усувають головний недолік чисто радарного підходу неможливість ідентифікувати конкретний транспортний засіб-порушник шляхом синхронної фіксації зображення автомобіля.

Радарний блок постійно сканує транспортний потік. У разі виявлення транспортного засобу, швидкість якого перевищує встановлений поріг, формується сигнал спрацювання. Цей сигнал синхронно активує фотокамеру або відеомодуль, який фіксує зображення автомобіля разом із державним реєстраційним знаком. Часова мітка та виміряна радаром швидкість

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		14

вбудовуються у зображення. Подальша обробка здійснюється системою ANPR (Automatic Number Plate Recognition) із застосуванням алгоритмів машинного зору [7].



Рисунок 2.2 – Комбінована система, камера із радаром

Технічні характеристики сучасних комбінованих систем:

- роздільна здатність камери: від 2 до 8 Мпкс, що забезпечує розпізнавання знаків на відстані до 30 м;
- ІЧ-підсвічування для роботи вночі без сліпучого спалаху;
- швидкість спрацювання затвору менше 1/1000 с для запобігання розмиттю зображення;
- точність вимірювання швидкості радаром: $\pm 1-2$ км/год (клас точності згідно з OIML R 91);
- температурний діапазон роботи: від -40 °C до $+60$ °C.

Прикладами таких систем є: MULTANOVA 6F (Швейцарія), MESTA Fusion (Франція), TruCAM (Великобританія), а також вітчизняні рішення на базі радарів «Визир» та «Беркут» [19]. Недоліком комбінованих систем є залежність якості ідентифікації від стану камери (забруднення, конденсат), а також необхідність окремої метрологічної повірки радарної та фотографічної складових.

Метод двох камер, відомий також як «середньошвидкісний контроль» або section speed control, є принципово відмінним від попередніх підходів. Замість вимірювання миттєвої швидкості в одній точці, він визначає середню

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		15

швидкість руху транспортного засобу на протяжній ділянці дороги між двома камерами. Принцип роботи цього методу показано на рисунку 2.3.

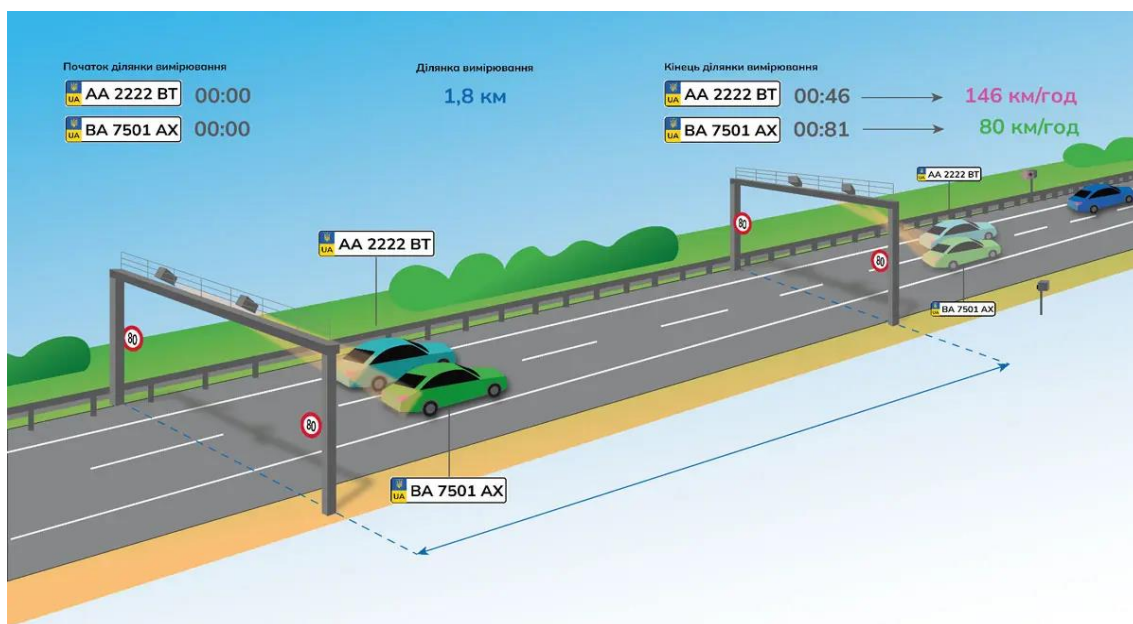


Рисунок 2.3 – Принцип роботи середньошвидкісного контролю

Система складається з двох автоматизованих камер з функцією ANPR, встановлених на початку (камера №1) та наприкінці (камера №2) вимірювальної ділянки відомої довжини L . Кожна камера фіксує момент проїзду транспортного засобу та зчитує його реєстраційний знак. Сервер обробки зіставляє записи двох камер за номерним знаком і обчислює середню швидкість за формулою:

$$V_{\text{сеп}} = L / (t_2 - t_1) \quad (2.2)$$

де L — відстань між камерами (м), t_1 — час проїзду через камеру №1, t_2 — час проїзду через камеру №2.

Принципова перевага методу двох камер полягає в тому, що він унеможливорює практику «точкового гальмування» перед відомим місцем контролю, оскільки загальний час проходження ділянки однозначно визначає середню швидкість. Метрологічні характеристики методу:

- похибка вимірювання часу: GPS/NTP-синхронізовані сервери забезпечують точність часових міток < 1 мс;

- похибка вимірювання відстані: геодезичне визначення L дає відносну похибку $< 0,01\%$ при $L \geq 1$ км;
- сумарна відносна похибка вимірювання швидкості: $< \pm 1$ км/год при $L \geq 500$ м;
- точність ANPR-ідентифікації: $> 98\%$ для чистих та нерозпізнаних номерів.

Комп'ютеризована система вимірювання параметрів руху є пасивним технічним рішенням для контролю дорожнього руху. Принцип роботи розробленої системи полягає в тому, що вона в режимі реального часу аналізує відеопотік, який надходить із цифрових камер, встановлених на відповідних дорожніх ділянках.

На основі безперервної обробки цього відеоряду локальна ЕОМ фіксує появу транспортних засобів у зоні контролю та обчислює ключові параметри їхнього руху (зокрема, швидкість, траєкторію та інтенсивність потоку). Головною особливістю системи є те, що всі розрахунки параметрів руху виконуються виключно шляхом математичного аналізу оптичних даних із відеокамери, без застосування мікрохвильових радарів чи лазерних випромінювачів [6].

Технічні та експлуатаційні переваги системи:

- Апаратна гнучкість: використання стандартних цифрових камер та обчислювальних блоків замість дорогого спеціалізованого радарного обладнання;
- Пасивний режим роботи: відсутність випромінювання робить систему непомітною для автомобільних радар-детекторів;
- Багатозадачність: можливість одночасного визначення швидкості, підрахунку кількості машин та фіксації інших типів порушень за рахунок аналізу одного відеоряду.

Обмеження системи:

- Залежність точності обчислення параметрів руху від умов видимості (туман, злива, недостатнє освітлення або забруднення об'єктива камери).

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		17

2.3 Порівняльний аналіз

Для обґрунтування вибору технічного рішення, що є предметом розробки в межах даної кваліфікаційної роботи, проведено порівняльний аналіз чотирьох розглянутих систем за критеріями, що визначають практичну доцільність їх застосування в сучасній дорожній інфраструктурі: радарного методу, комбінованої системи, методу двох камер та розробленої системи вимірювання параметрів руху. Узагальнені результати порівняння наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика методів вимірювання параметрів руху транспортних засобів

Критерій	Радарний метод	Камера з радаром	Метод двох камер	Власна розробка
Фізичний принцип вимірювання	Ефект Доплера	Доплер + оптична фіксація	Розрахунок середньої швидкості	Математичний аналіз оптичного відеопотоку
Наявність активного випромінювання	Є	Є	Відсутнє	Відсутнє
Виявлення радар-детектором	Можливе	Можливе	Неможливе	Неможливе
Кількість вимірюваних параметрів руху	Лише швидкість	Швидкість + номерний знак	Середня швидкість + ідентифікація	Швидкість, траєкторія, напрямок, інтенсивність потоку
Необхідне спеціалізоване обладнання	Радарний модель, метрологічна повірка	Радарний модуль + камера, дві метрологічні повірки	Дві камери ANPR, канали зв'язку, синхронізація	Стандартна цифрова камера + обчислювальний блок
Орієнтована вартість 1 пункту контролю	Середня	Висока	Дуже висока	Низька
Площа охоплення	Точкова	Точкова	Ділянка між двома пунктами	Зона видимості камери
Залежність від погодних умов	Низька	Середня	Середня	Висока

Аналіз результатів, наведених у таблиці 2.1, дозволяє виділити ключові переваги розробленої системи відеоаналітики, які визначають її практичну цінність як об'єкта подальшого дослідження.

По-перше, за критерієм апаратної економічності розроблена система вимірювання параметрів руху має беззаперечну перевагу. Радарні та комбіновані системи потребують спеціалізованого випромінювального обладнання, яке є дорогим, підлягає окремій метрологічній атестації та має обмежений термін служби. Метод двох камер є найбільш капіталомістким рішенням, оскільки вимагає облаштування двох повноцінних пунктів ANPR-контролю на відстані до кількох кілометрів, прокладання каналів зв'язку та синхронізації серверного обладнання. Натомість розроблена система потребує лише стандартної цифрової камери та локальної ЕОМ, що дозволяє суттєво знизити вартість як первинного впровадження, так і подальшого обслуговування, а отже — масштабувати контроль на значно більшу кількість ділянок при тому самому бюджеті.

По-друге, за критерієм пасивності та непомітності роботи розроблена система перебуває в одній групі з методом двох камер, що є суттєвою перевагою порівняно з радарними рішеннями. Відсутність активного випромінювання унеможливорює виявлення системи автомобільними радар-детекторами, що підвищує превентивний ефект контролю водій не може уникнути фіксації шляхом точкового гальмування за сигналом детектора.

По-третє, і це є визначальною перевагою розробленої системи, — її багатофункціональність. Жодна з розглянутих альтернатив не здатна на основі єдиного вимірювального каналу одночасно визначати швидкість конкретного автомобіля, його траєкторію та напрямок руху, інтенсивність транспортного потоку. Радарний метод вирішує єдину вузьку задачу — вимірювання миттєвої швидкості; комбінована система додає лише ідентифікацію номерного знака; метод двох камер обмежений контролем середньої швидкості на ділянці. Таким чином, розроблена система за функціональним охопленням перевершує

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		19

всі розглянуті аналоги, реалізуючи функції кількох спеціалізованих приладів засобами єдиного оптико-обчислювального комплексу.

Щодо обмеження, пов'язаного із залежністю точності від погодних умов та якості видимості, слід зазначити, що дане обмеження є технологічним викликом, який вирішується на алгоритмічному рівні — застосуванням методів попередньої обробки зображення (компенсація туману, нормалізація освітлення, фільтрація шуму), [11] а не є фундаментальним фізичним обмеженням методу, як, наприклад, кутова похибка радару чи необхідність прямої видимості номерного знака для роботи ANPR [18].

Таким чином, проведений порівняльний аналіз обґрунтовує доцільність обраного напрямку розробки: запропонована система вимірювання параметрів руху поєднує економічну ефективність, пасивність роботи та функціональну багатозадачність, що в сукупності забезпечує суттєву перевагу перед існуючими радарними, комбінованими та середньошвидкісними системами контролю дорожнього руху і визначає її як перспективний об'єкт для подальшого дослідження та вдосконалення.

Висновки до розділу 2

Проаналізовано актуальність задачі автоматизованого контролю параметрів руху транспортних засобів в умовах зростання інтенсивності транспортних потоків в Україні; визначено, що ключовим завданням є отримання кількісних динамічних характеристик об'єктів із заданою точністю при забезпеченні єдиності вимірювань.

Здійснено огляд та аналіз трьох поширених технічних рішень для вимірювання параметрів руху транспортних засобів: радарного методу, комбінованої системи «камера з радаром» та методу двох камер. Для кожного з методів розглянуто фізичний принцип роботи, метрологічні характеристики та конструктивні особливості.

Виявлено основні обмеження розглянутих аналогів: наявність активного мікрохвильового випромінювання, що робить системи виявлюваними радар-

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						20
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

детекторами; вузьку функціональну спрямованість; високу вартість спеціалізованого обладнання та необхідність окремої метрологічної перевірки кожної вимірювальної підсистеми; для методу двох камер □ значну капіталомісткість через потребу в облаштуванні двох пунктів ANPR-контролю.

Запропоновано та описано комп'ютеризовану систему вимірювання параметрів руху на базі оптичної відеоаналітики та локальної ЕОМ, принцип роботи якої ґрунтується на математичному аналізі відеопотоку без застосування радарних чи лазерних випромінювачів.

Виконано порівняльний аналіз чотирьох розглянутих систем за критеріями фізичного принципу вимірювання, наявності випромінювання, кількості вимірюваних параметрів, вартості впровадження, площі охоплення та залежності від погодних умов. Обґрунтовано, що розроблена система забезпечує суттєву перевагу за критеріями апаратної економічності, пасивності роботи та багатофункціональності (одночасне визначення швидкості, траєкторії, напрямку руху та інтенсивності потоку), поступаючись аналогам лише за стійкістю до несприятливих погодних умов.

Обґрунтовано доцільність подальшої розробки структури, математичного та алгоритмічного забезпечення комп'ютеризованої системи вимірювання параметрів руху на основі обробки відеозображень як перспективного напрямку вдосконалення існуючих засобів метрологічного контролю транспортних потоків.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						21
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ

3.1 Обґрунтування складових системи

Синтезу та розробці загальної топології комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи обов'язково передують етапи аналізу, вибору та метрологічної атестації її основних фізичних компонентів. Оскільки проектувана система орієнтована на безперервне високоточне вимірювання динамічних та кінематичних параметрів руху об'єктів у реальному часі, кожен елемент апаратного контуру – від первинного датчика до засобу відображення – вносить свій вклад у сумарну похибку вимірювального результату.

Аналізуючи відеокамеру було визначено, що у структурі системи вона виконує роль первинного вимірювального перетворювача, завданням якого є трансформація фізичної величини (світлового потоку, відбитого від рухомого об'єкта) у цифровий вимірювальний сигнал, придатний для подальшої математичної обробки [17]. Метрологічний аналіз ПВП вимагає детального розгляду двох його складових: оптичної системи та фотоелектричного сенсора.

Оптична система. Головною характеристикою об'єктива є його фокусна відстань та кутовий розмір поля зору. Для задач вимірювання параметрів руху критично важливо використовувати об'єктиви з фіксованою фокусною відстанню (так звані Prime-об'єктиви), оскільки наявність механічних елементів трансфокації (зуму) вносить випадкову похибку у стабільність масштабування сцени. Оптична система повинна мати високу роздільну здатність (вимірюється в лініях на міліметр, lines/mm), що мінімізує ефект розмиття меж об'єкта на краях кадру.

Основним дестабілізуючим фактором об'єктива є оптична дисторсія (подушкоподібна або бочкоподібна). Вона виникає через нелінійність збільшення оптичних лінз при відхиленні світлового променя від головної оптичної осі. З точки зору метрології, дисторсія є джерелом систематичної просторової похибки, оскільки вона викривляє реальну траєкторію руху

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		22

об'єкта, штучно завищуючи або занижуючи швидкість на периферійних ділянках кадру [6,18].

Фотоелектричний сенсор. Сучасні ПВП базуються на напівпровідникових твердотільних матрицях КМОН типу. Найважливішими метрологічними параметрами матриці є:

- Фізичний розмір пікселя: визначення геометричного кроку квантування. Чим більший розмір пікселя, тим вища його світлочутливість і менший рівень теплового шуму, проте більший крок просторової дискретизації.

- Динамічний діапазон: здатність сенсора одночасно фіксувати без спотворень як глибокі тіні, так і максимально освітлені ділянки об'єкта. При недостатньому динамічному діапазоні виникає ефект «засвітки», коли група пікселів видає максимальний цифровий код (255), повністю втрачаючи інформацію про межі та текстуру об'єкта.

- Тип затвора: для системи контролю параметрів руху неприпустимо використовувати сенсори з ковзним затвором, оскільки вони зчитують матрицю потреково (рядок за рядком). При вимірюванні швидкості високодинамічних об'єктів це викликає ефект «rolling shutter skew» — геометричний зсув і деформацію форми об'єкта на кадрі, що вносить значну методичну похибку в локалізацію його центру мас [7]. Система повинна комплектуватися сенсором із глобальним затвором, який здійснює експонування та фіксацію заряду всіх пікселів матриці абсолютно одночасно.

Додатково на матрицю діють внутрішні шуми: тепловий шум (зумовлений хаотичним рухом електронів у кремнії при підвищенні температури навколишнього середовища) та дробовий шум (шум Шоттки, пов'язаний із дискретною природою самого фотонного потоку). Ці шуми генерують випадкові коливання яскравості пікселів на зображенні («цифровий зернистий шум»), що ускладнює роботу алгоритмів фільтрації і вимагає обов'язкового введення блоків цифрового згладжування вимірювальних відліків [2,18].

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						23
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Центральний персональний комп'ютер виконує роль головного керуючого та обчислювального ядра системи. На відміну від звичайних офісних систем, обчислювальна машина вимірювального комплексу повинна функціонувати в детермінованому часовому режимі, забезпечуючи обробку важкого масиву даних комп'ютерного зору без накопичення затримок.

Метрологічна надійність та стабільність часового контуру системи забезпечується взаємодією таких апаратних модулів ПК:

Центральний процесор. Головною вимогою до CPU є висока багатопотокова продуктивність та низька латентність між'ядерної взаємодії. Процесор здійснює декомпресію вхідного відеопотоку, керує системними таймерами високої роздільної здатності, фіксує точні часові мітки тактів дискретизації і здійснює фінальні різницеві розрахунки швидкості та прискорення. Стабільність тактової частоти CPU безпосередньо впливає на точність визначення інтервалу Δt . Якщо процесор зазнає перегріву, активується режим пропускання тактів, що призводить до спотворення часової шкали вимірювань і виникнення динамічних похибок.

Графічний прискорювач. Оскільки базові операції просторової локалізації та сегментації об'єктів на цифровому растрі вимагають мільярдів однотипних математичних операцій над матрицями (множення та згортка матриць), використання лише CPU призводить до критичного падіння частоти обробки до 1–2 кадр/с. Для забезпечення темпу реального часу (30 кадр/с) в апаратний контур ПК інтегрується дискретна графічна карта серії NVIDIA RTX, яка містить:

- Ядра CUDA: архітектура масового паралелізму, що дозволяє одночасно обробляти тисячі пікселів зображення.
- Тензорні ядра: спеціалізовані апаратні блоки, оптимізовані для виконання матричних операцій низької розрядності (FP16/INT8), що використовуються в алгоритмах розпізнавання образів. Це дозволяє скоротити час апаратної затримки обробки одного кадру до фіксованого мінімуму ($\leq 15\text{мс}$) [11].

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		24

Оперативна пам'ять та шина даних. Обсяг та частота оперативної пам'яті визначають пропускну здатність вхідного буфера системи. Пам'ять повинна працювати у багатоканальному режимі для забезпечення безперешкодного копіювання кадрів з мережевого адаптера у відеопам'ять GPU через системну шину PCI Express v4.0/v5.0. Будь-яка затримка на рівні системної шини ПК викликає ефект «черги кадрів», коли нові вимірювальні відліки від ПВП починають відкидатися операційною системою через переповнення буфера пам'яті.

Монітор для системи є кінцевою ланкою вимірювального тракту, що реалізує функцію представлення результатів вимірювань у формі, зручній для сприйняття людиною-оператором (диспетчером). До моніторів висуваються специфічні інженерні вимоги, оскільки від якості відображення залежить точність візуального контролю та швидкість реакції на вимірювальні події.

Просторова роздільна здатність матриці. Екран повинен мати чітку дискретну структуру з роздільною здатністю не нижче Full HD (1920x1080 пікселів) або Ultra HD (3840x2160 пікселів). Це необхідно для того, щоб оператор міг чітко розрізняти дрібні елементи графічного інтерфейсу (цифрові значення координат, табличні масиви швидкостей, графіки прискорень) та деталі об'єкта, що супроводжується системою.

Частота оновлення екрана та час відгуку пікселя. Для динамічних вимірювальних систем стандартна частота оновлення 60 Гц є мінімально допустимою. Оптимальним є використання моніторів із частотою 144 Гц і вище. Вища частота забезпечує плавність відображення трендів руху та мінімізує втомлюваність очей оператора при тривалій зміні. Час відгуку матриці (від сірого до сірого, GtG) повинен складати $\leq 1...2$ мс. При великому часі відгуку за рухомим об'єктом на екрані виникає розмитий графічний слід («шлейф» або ghosting), який унеможливорює точний візуальний контроль збігу обмежувальної вимірювальної рамки з реальними межами об'єкта.

Тип РК-матриці та передача кольору. Рекомендується використання матриць типу IPS. Вони забезпечують широкі кути огляду (до 178° як по

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						25
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

горизонталі, так і по вертикалі) без викривлення кольоровості та контрастності зображення. Це критично для диспетчерських пунктів, де оператор може дивитися на монітор під кутом.

3.2. Обґрунтування варіантів побудови системи

Проектування та розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для контролю динамічних параметрів руху об'єктів вимагає від інженера розв'язання фундаментальної оптимізаційної задачі. Ця задача полягає у знаходженні компромісу між сумарною метрологічною похибкою вимірювального процесу та апаратною складністю й вартістю обчислювальних засобів, що інтегруються в систему.

Оскільки первинна вимірювальна інформація надходить до системи у вигляді високочастотного та високоінформативного цифрового відеопотоку, критично важливим є вибір такої архітектурної топології обчислювального контуру, яка здатна забезпечити детерміновану обробку даних у реальному масштабі часу. Будь-яка затримка у процесі декомпресії чи аналізу кадрів призводить до випадкового пропуску вимірювальних відліків, деформації часового інтервалу дискретизації та, як наслідок, до неконтрольованого зростання динамічних і методичних похибок вимірювання швидкості та прискорення.

Для вирішення задач просторової локалізації, цифрової фільтрації та ідентифікації об'єктів вимірювання за допомогою оптико-електронних засобів необхідно провести глибокий порівняльний аналіз двох базових варіантів структурної організації обчислювального блоку систем:

- Архітектурна конфігурація з централізованою обробкою вимірювальної інформації на базі стаціонарної високопродуктивної ЕОМ(рисунок 3.1).

- Розподілена периферійна архітектура обчислень, побудована на принципах Edge Computing, де обчислювальне навантаження переноситься

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арх.А
						26
Зм.Зм.	Арх.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

безпосередньо на малогабаритні процесорні модулі поблизу первинного датчика (рисунок 3.2).

Архітектурна топологія ЕОМ передбачає, що периферійні пристрої формування відеозображень (ПФВЗ) функціонують виключно як первинні вимірювальні перетворювачі оптичного сигналу.



Рисунок 3.1 – Приклад системи на базі ЕОМ

Вони здійснюють безперервне просторово-часове квантування світлового потоку, його первинне кодування й компресію, після чого транслиують сформований цифровий потік даних через мережеву інфраструктуру (використовуючи потоковий протокол RTSP або транспортний стек TCP/IP) на центральну ЕОМ.

На базі цієї стаціонарної машини виконується повний та завершений цикл цифрової обробки зображень, селекції розмірів, згладжування координат і чисельного диференціювання для визначення кінематики руху ОБ.

Перевагами такого підходу є практично необмежена (в рамках бюджету проєкту) масштабованість та можливість інтеграції дискретних графічних процесорів з архітектурою масового паралелізму CUDA та спеціалізованими апаратними тензорними ядрами.

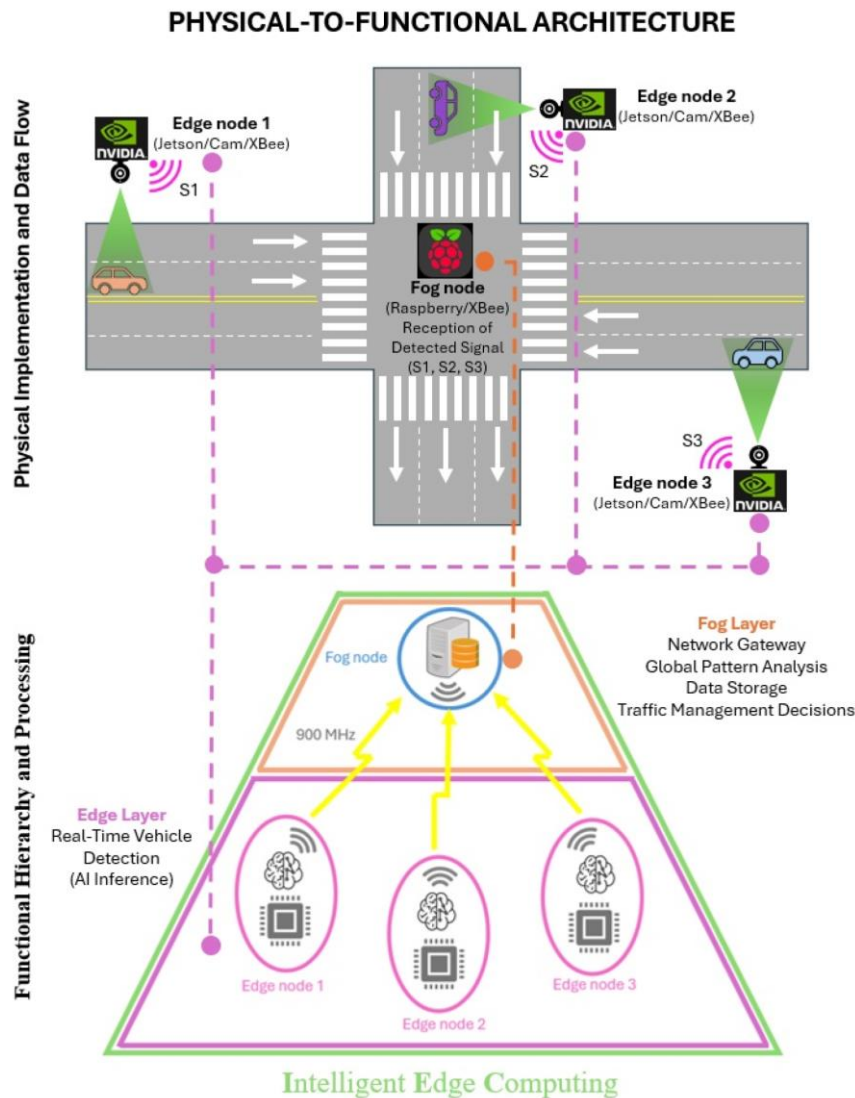


Рисунок 3.2 – Приклад архітектури Edge Computing

Це дозволяє реалізувати складні алгоритми просторової фільтрації й сегментації без ризику падіння частоти кадрів. Система підтримує стабільно високу частоту дискретизації вимірювального сигналу, що гарантує мінімізацію методичної похибки квантування за часом і дозволяє здійснювати паралельне безпомилкове супроводження великої кількості вимірюваних об'єктів (до 19 одиниць одночасно в зоні контролю) без зниження загального темпу видачі вимірювальної інформації оператору. Ресурсна надлишковість ЕОМ також дозволяє безперешкодно вести паралельний довгостроковий запис первинних масивів та формування баз даних вимірювань.

Проте з погляду метрологічної стабільності часового контуру дана архітектура має вагомий недолік – жорстку залежність від пропускну

здатності та стабільності каналу зв'язку. При передачі важких бінарних масивів через мережу виникає явище джиттеру (випадкового коливання часу доставки пакетів).

Математично цей процес можна описати через апарат теорії масового обслуговування. Розглянемо вхідний буфер оперативної пам'яті ЕОМ як одноканальну систему обслуговування з очікуванням. Нехай інтенсивність надходження вимірювальних кадрів з каналу зв'язку дорівнює λ (кадр/с), а інтенсивність їх обробки центральним процесорним контуром становить μ (кадр/с) [3]. Коефіцієнт завантаження системи обчислюється як:

$$p = \frac{\lambda}{\mu} \quad (3.1)$$

У детермінованому режимі роботи системи, коли канал зв'язку стабільний, виконується умова $p < 1$, і середня кількість кадрів, що перебувають у черзі на обробку у буфері ЗП2, є стабільною та скінченною:

$$N_q = \frac{p^2}{1-p} \quad (3.2)$$

Якщо через мережевий джиттер або тимчасові затримки в лінії зв'язку пакети починають надходити лавиноподібно, інтенсивність вхідного потоку на коротких проміжках часу різко зростає, викликаючи порушення умови стабільності вимірювального контуру ($p \geq 1$). У цьому випадку довжина черги у вхідному буфері $N_q \rightarrow \infty$, що призводить до заповнення виділеного обсягу RAM, втрати вимірювальних тактів та вимушеного скидання поточних кадрів операційною системою. Втрата кадрів деформує базовий часовий інтервал Δt , перетворюючи його з константи у випадкову величину, що суттєво підвищує випадкову похибку чисельного диференціювання при розрахунку швидкості.

Альтернативним варіантом побудови системи є розподілена периферійна обробка. Ця концепція передбачає перенесення всього масиву первинних математичних обчислень безпосередньо «на борт» вимірювального поста. Обробка цифрової матриці, виділення контурів, згладжування координат та розрахунок їх зміщення виконуються безпосередньо поблизу фоточутливого сенсора на малогабаритних мікропроцесорних

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		29

обчислювальних модулях (наприклад, однокристальних системах серії NVIDIA Jetson), які конструктивно закріплюються разом із камерою на елементах виробничої чи дорожньої інфраструктури.

Головна перевага розподіленого контуру полягає в локалізації вимірювального тракту. Мережевим каналом зв'язку від периферійного поста до центрального диспетчерського пульта передаються не сирі відеокадри високої роздільної здатності, а виключно готові, повністю прораховані фізичні величини: часові мітки тактів, координати барицентрів у міліметрах та вектори поточної швидкості. Це дозволяє кардинально (в сотні разів) знизити навантаження на мережеву інфраструктуру, ліквідувати вимоги до надвисокої пропускної здатності каналів та повністю нівелювати вплив мережевого джиттеру на точність фіксації часу.

Основним інженерним та метрологічним недоліком периферійного варіанта є жорстке обмеження обчислювальної потужності мобільних процесорів, зумовлене їхнім низьким тепловиділенням та обмеженою архітектурою. При підвищенні інтенсивності руху, коли в полі зору камери з'являється велика кількість об'єктів вимірювання одночасно, апаратний ресурс мобільного чипа вичерпується. Мобільний обчислювач не встигає виконувати forward pass (пряме поширення по шарах алгоритму локалізації) для кожного кадру з частотою 30 Гц і змушений динамічно знижувати частоту обробки кадрів (f_s).

Зменшення частоти дискретизації за часом призводить до апріорного зростання методичної похибки вимірювання швидкості. Якщо об'єкт рухається з високою динамікою (наявне значне прискорення або гальмування), то збільшення кроку інтегрування (часу між кадрами Δt) призводить до того, що високочастотні зміни швидкості згладжуються і втрачаються. Математично похибка дискретизації за часом $\varepsilon_{\Delta t}$ при лінійній апроксимації траєкторії описується виразом:

$$\varepsilon_{\Delta t} \leq \frac{1}{8} \cdot \alpha_{max} \cdot (\Delta t)^2 \quad (3.3)$$

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						30
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

де α_{max} — максимальне можливе прискорення об'єкта вимірювання. Як видно з квадратичної залежності, падіння частоти кадрів (збільшення Δt) всього вдвічі викликає чотириразове зростання методичної похибки визначення параметрів руху, що є абсолютно неприпустимим для прецизійних інформаційно-вимірювальних систем [17].

Для проведення об'єктивного порівняльного аналізу та вибору оптимального варіанта побудови системи введемо метрологічний критерій ефективності — ймовірність правильної класифікації, ідентифікації та безпомилкового супроводження об'єкта вимірювання в реальному часі (P_{id}). Цей критерій інтегрально враховує як здатність апаратного забезпечення вчасно обробляти дані, так і стійкість алгоритмів до пропуску кадрів.

Проведені експериментальні дослідження розроблених макетів систем та аналіз статистичних даних показали такі результати:

- При використанні (Edge Computing) в умовах щільного та інтенсивного потоку вимірюваних об'єктів апаратна частота кадрів мобільного процесора падає до 10...12 кадр/с. Через збільшення кроку просторово-часового квантування алгоритм супроводження втрачає контури об'єктів, що призводить до зниження ймовірності правильної ідентифікації P_{id} до критичного рівня 0,75...0,78.

- При використанні Варіанта 1 (Централізована ЕОМ з потужним GPU), за умови побудови завадостійкої локальної лінії зв'язку, частота обробки вимірювальної інформації стабільно утримується на рівні ≥ 30 кадр/с навіть при максимальному завантаженні зони контролю (19 об'єктів одночасно). Це дозволяє забезпечити стабільне значення критерію ефективності P_{id} на рівні 0,92 [5].

Таким чином, на основі проведеного аналізу, з метою повного нівелювання затримок черги обчислень, зведення до мінімуму інструментальної та методичної складових похибок часового контуру та забезпечення високої точності вимірювань, доцільно обрати Варіант 1 — систему з централізованою

обробкою вимірювальної інформації на базі ЕОМ, оснащеної потужним графічним прискорювачем серії NVIDIA RTX.

Для функціонування обраної системи критично важливим є детермінований розподіл ресурсів операційної системи між процесами декомпресії мережевого відеопотоку та координатного аналізу. Основним операційним середовищем обчислювача обрано ОС сімейства Linux, яка підтримує пряму низькорівневу взаємодію бібліотек комп'юторного зору OpenCV із драйверами апаратного паралелізму NVIDIA CUDA, минаючи зайві системні рівні абстракції абстрагування [11].

Разом з тим, програмна архітектура розробленого макету системи, реалізована на мові програмування Python з використанням сучасного графічного середовища Flet, проектувалася за принципами високої кросплатформенності [12]. Графічний інтерфейс користувача (GUI) використовує асинхронні неблокуючі механізми оновлення елементів сторінки за допомогою виклику методу `page.update()`.

Це дозволяє відокремити важкі математичні потоки обчислення швидкості (які працюють у фоні як демони) від потоку візуалізації інтерфейсу. Завдяки цьому розгортання диспетчерських вимірювальних пунктів системи можливе як у середовищі Linux, так і на робочих станціях під управлінням операційних систем сімейства Windows без потреби додаткової метрологічної атестації інтерфейсної частини системи, оскільки асинхронність повністю виключає вплив затримок прорисовування GUI на точність роботи таймерів вимірювальної системи.

3.3 Побудова структурної схеми

На основі проведеного системно-метрологічного обґрунтування було синтезовано структурну схему комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи. Структурну схему розробленої системи наведено на рисунку 3.3. За своєю архітектурою система є послідовним вимірювальним

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		32

конвеєром, у якому кожен програмно-апаратний модуль здійснює строго визначене операційне перетворення вхідного сигналу з метою мінімізації завад та представлення результату у формі іменованих фізичних величин.

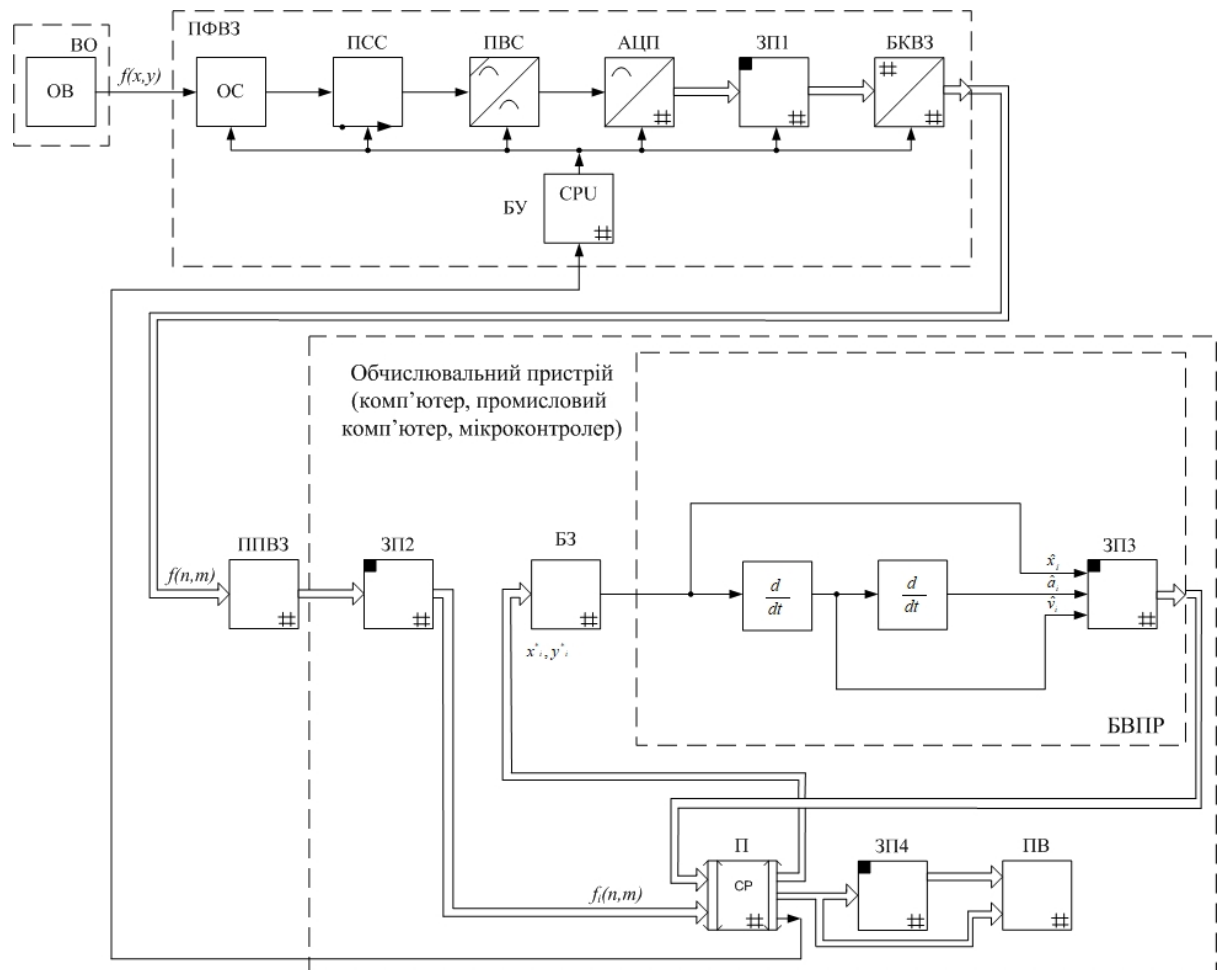


Рисунок 3.3 — Структурна схема комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи

На рис.3.1 позначено: ОВ – об'єкт вимірювання; ВО – виробниче обладнання; ПФВЗ – пристрій формування відеозображень (цифрова відеокамера); ОС – оптична система ПФВЗ; ПСС – перетворювач світло-сигнал; ПВС – підсилювач відеосигналу; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЗП1-ЗП4 – запам'ятовуючі пристрої для цифрових відеозображень; БКВЗ – блок кодування відеозображень; БУ – блок управління ПФВЗ; ППВЗ – пристрій передачі відеозображень в обчислювальний пристрій; БЗ – блок згладжування відліків вимірювальної інформації; БВПР – блок визначення параметрів руху; П – процесор

обчислювального пристрою; ПВ – пристрій візуалізації відеозображень і результатів вимірювання параметрів руху технологічного обладнання; $\frac{d}{dt}$ – диференціатор.

Як пристрій формування відеозображень у складі розробленої системи використовується цифрова відеокамера Logitech BRIO 4K (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Відеокамера Logitech BRIO 4K

Камера забезпечує відеозйомку в режимах: 4K Ultra HD (4096×2160 пікселів) з частотою 30 кадрів/с, Full HD 1080p з частотою 60 кадрів/с та HD 720p з частотою до 90 кадрів/с. Для вимірювання параметрів руху технологічного обладнання система працює в режимі 1080p/60 fps, що забезпечує достатню часову роздільну здатність для коректного відстеження об'єкта вимірювання [20,21].

Камера є UVC 1.1-сумісною і підтримує передачу нестисненого відео у форматах YUY2 та NV12, а також MJPEG, що забезпечує мінімальні спотворення зображення та стабільну затримку при передачі кадрів. Сумісність з Microsoft DirectShow дозволяє отримувати відеопотік у програмному середовищі без встановлення стороннього драйвера — достатньо стандартного підключення через USB 3.0.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		34

Камера оснащена скляним об'єктивом з автофокусом та 5-кратним цифровим зумом; кут огляду регулюється і становить 65°, 78° або 90°. Технологія RightLight 3 з підтримкою HDR забезпечує стабільну якість зображення в умовах різної освітленості лабораторного стенду.

Підключення до обчислювального пристрою здійснюється через інтерфейс USB 3.0 (Type-A), що гарантує необхідну пропускну здатність для передачі відеопотоку Full HD з частотою 60 кадрів/с у реальному часі.

Технічні характеристики камери Logitech BRIO 4K наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики ПФВЗ Logitech BRIO 4K

Параметр	Значення
Модель	Logitech BRIO 4K (960-001105)
Матриця	13 Мпікс, 4K CMOS
Максимальна роздільна здатність	4096 × 2160 пікселів (4K DCI)
Робочий режим у системі	1920 × 1080 пікселів (Full HD), 60 кадрів/с
Кут огляду	65° / 78° / 90° (регульований)
Фокусування	Автофокус, скляний об'єктив
Цифровий зум	5×
Інтерфейс підключення	USB 3.0 Type-A (plug-and-play, UVC 1.1)
Підтримувані формати відео	YUY2, NV12, MJPEG
Сумісність з ПЗ	Microsoft DirectShow, OpenCV, Windows 10/11
Габарити	27 × 102 × 26,5 мм
Маса	65 г
Робоча температура	0...+40 °C

Обчислювальний пристрій реалізовано на базі промислового комп'ютера Advantech IPC-7130 з материнською платою AIMB-788 (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Промисловий компютер Advantech IPC-7130 з материнською платою AIMB-788

Корпус IPC-7130 виконаний у форм-факторі Desktop/Wallmount та підтримує материнські плати форматів ATX/MicroATX. Корпус оснащено захищеними відсіками для накопичувачів з можливістю «гарячої заміни», вбудованим модулем інтелектуального керування вентиляторами та апаратного моніторингу системи, а також світлодіодними індикаторами стану живлення, вентиляторів, температури та жорсткого диска.

Материнська плата AIMB-788 підтримує процесори Intel® Core™ i9/i7/i5/i3 12–14-го покоління (сокет LGA1700) з чіпсетом Q670E та забезпечує потрібний вивід зображення: DisplayPort, HDMI і VGA. Плата оснащена сімома слотами розширення PCIe/PCI (серед яких один PCIe x16 Gen 4 для встановлення відеокарти), слотом M.2 (NVMe), чотирнадцятьма портами USB 3.2/2.0, двома гігабітними мережевими інтерфейсами та шістьма портами COM. Технічні характеристики обчислювального пристрою наведено в таблиці 3.2.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						36
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики ЕОМ Advantech IPC-7130 (AIMB-788)

Параметр	Значення
Модель	Advantech IPC-7130 / AIMB-788
Форм-фактор	Desktop / Wallmount (ATX)
Процесор	Intel® Core™ i7-13700, 16 ядер, до 5,2 ГГц, кеш 30 МБ
Чіпсет	Intel® Q670E
Оперативна пам'ять	32 ГБ DDR5
Відеокарта	NVIDIA GeForce RTX 4060, 8 ГБ GDDR6 (PCIe x16 Gen 4)
Накопичувач	SSD NVMe 1 ТБ (M.2)
Інтерфейси	14× USB 3.2/2.0, 6× COM, 2× GbE LAN
Відеовиходи	DisplayPort, HDMI, VGA
Слоти розширення	7× PCIe/PCI
ОС	Windows 10/11 IoT Enterprise
Робоча температура	0...+50 °C



Рисунок 3.6 – Монітор Dell P2422H

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		37

Як пристрій візуалізації використовується рідкокристалічний монітор Dell P2422H з діагоналлю 24" та роздільною здатністю Full HD 1920×1080 (рис. 3.6). На моніторі відображається поточний відеокадр об'єкта вимірювання, а також числові та графічні результати визначення кінематичних параметрів руху.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики пристрою візуалізації Dell P2422H

Параметр	Значення
Модель	Dell P2422H
Тип матриці	IPS
Діагональ	24" (60,5 см)
Роздільна здатність	1920 × 1080 (Full HD)
Частота оновлення	60 Гц
Яскравість	250 кд/м ²
Контрастність	1000:1
Час відгуку	5 мс (GtG)
Інтерфейси	HDMI 1.4, DisplayPort 1.2, VGA
Кути огляду	178° / 178°
Регулювання	Нахил, обертання, висота, поворот

Таким чином, апаратна база розробленої комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи складається з трьох ключових компонентів: пристрою формування відеозображень Logitech BRIO 4K, що забезпечує захоплення відеопотоку з роздільною здатністю 1920×1080 пікселів з частотою 60 кадрів/с; промислового обчислювального пристрою Advantech IPC-7130 на базі процесора Intel Core i7-13700 з відеокартою NVIDIA GeForce RTX 4060, що реалізує програмні модулі обробки вимірювальної інформації в реальному часі із застосуванням апаратного прискорення CUDA; та пристрою візуалізації Dell P2422H з роздільною здатністю Full HD 1920×1080, на якому

відображаються поточне відеозображення об'єктів вимірювання та числові й графічні результати визначення параметрів їх руху. Обрана конфігурація апаратних засобів повністю відповідає технічним вимогам, обґрунтованим у попередніх підрозділах, і забезпечує реалізацію повного циклу вимірювального перетворення в складі розробленої системи.

Висновки до 3 розділу

Обґрунтовано вибір апаратної конфігурації системи, де як первинний вимірювальний перетворювач обрано цифрову камеру високої роздільної здатності Logitech BRIO 4K, що забезпечує стабільне захоплення відеопотоку у форматі Full HD із частотою 60 кадрів/с. Це дозволяє мінімізувати методичну похибку дискретизації за часом при вимірюванні параметрів високодинамічних об'єктів.

Проведено порівняльний аналіз архітектурних рішень (централізована обробка на ЕОМ проти Edge Computing). Доведено, що для забезпечення стабільної частоти обробки (≥ 30 кадр/с) та високої ймовірності правильної ідентифікації об'єктів ($P_{id} = 0,92$) оптимальним є варіант із централізованою ЕОМ, оснащеною потужним графічним прискорювачем серії NVIDIA RTX.

Визначено технічні вимоги до обчислювального блоку, реалізованого на базі промислового комп'ютера Advantech IPC-7130 із процесором Intel Core i7-13700 та відеокартою RTX 4060. Така конфігурація забезпечує необхідний темп обробки даних у реальному часі завдяки використанню апаратних ядер CUDA та тензорних ядер для прискорення нейромережі YOLOv4.

Розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи, побудовану за принципом послідовного вимірювального конвеєра. Схема включає блоки кодування, згладжування вимірювальних відліків та визначення параметрів руху, що забезпечує повний цикл перетворення оптичного сигналу в іменовані фізичні величини (швидкість та переміщення).

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						39
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Обґрунтовано застосування асинхронних механізмів оновлення графічного інтерфейсу (фреймворк Flet), що дозволяє відокремити математичні обчислення від потоків візуалізації та виключити вплив затримок GUI на точність роботи таймерів вимірювальної системи.

Встановлено вимоги до конструктивного виконання та засобів відображення інформації. Вибір монітора Dell P2422H з IPS-матрицею, антивідблисковим покриттям та частотою оновлення 60 Гц забезпечує ергономічність роботи оператора та чіткість візуального контролю результатів вимірювань у формі таблиць і графіків.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						40
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

4.1 Математичний розрахунок параметрів руху

Перетворення двовимірному дискретного сигналу, що надходить із первинного вимірювального перетворювача (відеокамери), у фізичні параметри руху (переміщення та лінійну швидкість) вимагає побудови послідовної математичної моделі. Ця модель пов'язує піксельний простір цифрового зображення $I(x,y)$ із метричним простором реального спостережуваного об'єкта.

В основі визначення просторового положення транспортного засобу лежить метод проєктивного перетворення площин. Об'єктив первинного вимірювального перетворювача здійснює центральну проєкцію тривимірних координат об'єкта на двовимірну площину КМОН-матриці.

Для обчислення параметрів руху в межах виділеної вимірювальної ділянки використовується коефіцієнт лінійного масштабування K , який має розмірність міліметр на піксель (мм/пікс). Цей коефіцієнт є інтегральним параметром, що враховує фокусну відстань об'єктива F , висоту встановлення відеокамери над дорожнім покриттям H та кут нахилу оптичної осі сенсора відносно горизонту.

При фіксованому просторовому положенні вимірювальної камери зв'язок між піксельною координатою x_{pix} на кадрі та реальною координатою об'єкта X_{mm} описується лінійним рівнянням:

$$X_{mm} = x_{pix} * K_{format} \quad (4.1)$$

де K_{format} — масштабуючий коефіцієнт, що жорстко прив'язаний до поточної роздільної здатності кадру [6,17]. У розробленому математичному забезпеченні системи визначено чотири базові константи лінійного масштабування, отримані в результаті калібрування вимірювальної зони:

- Для формату 320x240: $K_{320} = 12,5010$ мм/пікс
- Для формату 640x480: $K_{640} = 6,2505$ мм/пікс
- Для формату 1024x576: $K_{1024} = 5,20875$ мм/пікс
- Для формату 1280x720: $K_{1028} = 4,1670$ мм/пікс

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		41

Завдяки введенню цих констант алгоритм забезпечує інваріантність обчислень: при зміні роздільної здатності відеопотоку вихідні метричні координати об'єкта вимірювання залишаються незмінними.

Згорткова нейромережа YOLOv4 локалізує транспортний засіб на кадрі у вигляді обмежувальної прямокутної рамки. Вихідний вектор шару детекції повертає чотири координати в пікселях:

$$Box = [X_{start}, Y_{start}, W_{obj}, H_{obj}] \quad (4.2)$$

де X_{start}, Y_{start} — координати лівого верхнього кута рамки, а W_{obj}, H_{obj} — її поточна ширина та висота відповідно [8].

Для точного відстеження динаміки руху необхідно перейти від площинного об'єкта (рамки) до дискретної умовної вимірювальної точки — центру мас локалізованого транспортного засобу. Розрахунок поточних піксельних координат барицентра на k -му кадрі здійснюється за формулами:

$$center_x_k = X_{start_k} + \frac{W_{obj_k}}{2} \quad (4.3)$$

$$center_y_k = Y_{start_k} + \frac{H_{obj_k}}{2} \quad (4.4)$$

Координата $center_x_k$ приймається як базовий інформативний сигнал, що відображає переміщення транспортного засобу вздовж вимірювального створу [7].

Значення координат барицентра отримуються у вигляді дискретної послідовності $\{X_i^*\}$, $i = \underline{1}, N$. Для побудови оцінки параметрів руху в алгоритмі реалізовано три апіорні математичні моделі руху об'єкта:

- нерухомий стан: $\hat{X}_{ie} = f_e(\hat{X}_{i-1}) = \hat{X}_{i-1}$;
- рівномірний рух: $\hat{X}_{ie} = f_e(\hat{X}_{i-1}, \hat{X}_{i-2}) = 2\hat{X}_{i-1} - \hat{X}_{i-2}$;
- рівноприскорений рух:

$$\hat{X}_{ie} = f_e(\hat{X}_{i-1}, \hat{X}_{i-2}, \hat{X}_{i-3}) = 3\hat{X}_{i-1} - 3\hat{X}_{i-2} + \hat{X}_{i-3} \quad [5]$$

Сирі координати барицентра об'єкта, отримані безпосередньо з нейромережевого детектора, мають дискретні коливання (так званий «дребезг» меж рамок), що викликано мінливістю освітлення, появою тіней та дискретним характером роботи алгоритму селекції меж. Пряме

диференціювання такого сигналу призводить до появи сильних високочастотних завад на графіку швидкості.

Для стабілізації траєкторії руху та придушення високочастотного шуму в математичне забезпечення системи інтегровано дискретний експоненціальний фільтр низьких частот першого порядку. Перерахунок сирієї піксельної координати X_k у згладжену метричну координату $\hat{X}_k$ (виражену в міліметрах) на k -му вимірювальному такті виконується за математичною моделлю:

$$\hat{X}_k = (1 - \xi) \cdot (X_k \cdot K) + \xi \cdot \hat{X}_{k-1} \quad (4.5)$$

де:

- $\hat{X}_k$ поточне згладжене значення координати об'єкта у міліметрах на поточному кадрі;
- X_k поточне сире піксельне значення координати від нейромережі;
- $\hat{X}_{k-1}$ згладжене значення координати з попереднього вимірювального кроку ($k - 1$);
- K коефіцієнт лінійного масштабування, що відповідає обраній роздільній здатності;
- α коефіцієнт згладжування (параметр фільтра), який у розробленій програмі жорстко встановлено на рівні $\alpha = 0,5$.

Вибір оптимального значення коефіцієнта ξ є принциповим питанням метрологічного налаштування фільтра. Якщо $\xi \rightarrow 0$, то основний внесок в оцінку параметрів руху має лише поточне вимірювання координати і фільтрація є малоефективною. Якщо $\xi \rightarrow 1$, то при змінах параметрів руху транспортного засобу виникає суттєва динамічна похибка через надмірне «запам'ятовування» попередніх станів.

Згідно з результатами чисельного моделювання, проведеного на основі мінімізації середньоквадратичної похибки визначення поточної координати у каналі з цифровою відеокамерою, оптимальне значення коефіцієнта становить $\xi = 0,5$. При цьому забезпечується підвищення точності визначення координат

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						43
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

за цифровими відеозображеннями у 1,39 рази порівняно з нефільтрованим сигналом [1, 2, 4].

На основі масиву згладжених координат обчислюється вектор фізичного переміщення транспортного засобу між двома суміжними кадрами обробки. Лінійне переміщення R_k на k -му кроці розраховується як абсолютна різниця суміжних станів:

$$R_k = |\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1}| \quad (4.6) [5]$$

Для розрахунку поточної швидкості руху вимірювальний обчислювач використовує дискретну різницеву форму. Особливістю розробленої системи є те, що крок дискретизації за часом Δt_k не є жорсткою константою. Через мінливість часу прямого поширення нейромережі та завантаженість процесора, інтервал Δt_k динамічно вимірюється системним таймером ЕОМ для кожного кадру:

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1} \quad (4.7)$$

де значення t_k фіксуються в масиві часу *timed[k]* (програма паралельно дублює ці дані у базу) [5].

Остаточний розрахунок поточної лінійної швидкості V_k (мм/с) на k -му такті виконується за формулою:

$$V_k = \frac{|X_{i+1} - X_{i-1}|}{\Delta t_k} \quad (4.8)$$

де X_{i+1} – екстраполяційне (прогнозоване алгоритмом) значення просторової координати ТЗ на наступний крок руху, що дозволяє компенсувати динамічний лаг обчислювального контуру. Для представлення результату оператору в загальноприйнятому форматі, внутрішня розмірність системи (мм/с) автоматично переводиться в кілометри за годину (км/год) шляхом множення на коефіцієнт переходу:

$$V_{\text{км/год}} = V_k \cdot 0,036 \quad (4.9)$$

Таким чином, математичний апарат системи реалізує повний ланцюжок перетворення: від піксельних координат обмежувальної рамки нейромережевого детектора до іменованих фізичних значень переміщення (мм) та швидкості (км/год) з урахуванням масштабного коефіцієнта оптичної

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						44
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

системи, апріорної моделі руху, алгоритму експоненціального згладжування координат та часової динаміки вимірювального процесу [5,6].

4.2 Розробка алгоритму

Реалізація обчислювальних та метрологічних процесів у системі базується на поєднанні лінійного вимірювального конвеєра з асинхронною подієвою моделлю графічного інтерфейсу. Для забезпечення безперервності вимірювань алгоритм розділено на три операційні стадії: ініціалізація та завантаження архітектури нейромережі; циклічна обробка вимірювального сигналу; реєстрація та візуалізація результатів.

Функціонування системи описується детермінованим графом алгоритму (рис. 4.1), який складається з наступних послідовних кроків:

- Старт системи та ініціалізація GUI. Запускається головний потік програми. За допомогою фреймворку Flet створюється вікно програми, ініціалізуються контейнери для відображення відео та керуючі елементи інтерфейсу.

- Конфігурування метрологічних параметрів. Користувач через графічне меню обирає роздільну здатність відеопотоку (320×240, 640×480, 1024×576 або 1280×720). Алгоритм автоматично присвоює відповідне значення константи масштабування K .

- Завантаження нейромережевої моделі. Програмний модуль за допомогою функцій `cv2.dnn.readNetFromDarknet` зчитує конфігураційний файл архітектури та файл бінарних ваг `yolov4-tiny.weights` [8, 11]. Створений об'єкт нейромережі конфігурується для виконання обчислень на апаратному прискорювачі CUDA.

- Ініціалізація джерела відеосигналу. Створюється об'єкт захоплення відеопотоку `cv2.VideoCapture`. Програма відкриває доступ до файлу або RTSP-трансляції та перевіряє доступність декомпресора.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		45

– Вхід у головний вимірювальний цикл (покадрова обробка) виконується за наступними кроками::

Крок 1: Зчитування поточного кадру frame та фіксація поточної мітки часу t_k від системного таймера ЕОМ. Якщо кадрів більше немає, цикл переривається і керування передається на блок фінальної аналітики.

Крок 2: Масштабування та нормалізація кадру. Функція `cv2.dnn.blobFromImage` трансформує кадр у чотиривимірний тензор із просторовим розміром 608х608 пікселів, виконуючи нормування яскравості.

Крок 3: Пряме поширення. Тензор передається на вхідний шар нейромережі. Обчислювальний контур GPU виконує згорткові операції та повертає масив сирих детекцій із вихідних шарів.

Крок 4: Фільтрація класів та немаксимальна супресія. Програма перебирає знайдені об'єкти, відсікає ті, чий рівень достовірності нижче порогу, та виділяє цільові класи (car, truck, bus, motorcycle). Алгоритм `cv2.dnn.NMSBoxes` аналізує зони перекриття і видаляє дублікати [11].

Крок 5: Розрахунок координат барицентра. Алгоритм визначає координату геометричного центра об'єкта за віссю X (center_x).

Крок 6: Експоненціальне згладжування траєкторії. Програма застосовує математичну модель фільтра низьких частот із коефіцієнтом $\alpha = 0,5$ і розраховує стабілізовану координату в міліметрах.

Крок 7: Метрологічний обчислювач параметрів динаміки. Програма розраховує лінійне переміщення R та поточну лінійну швидкість V з урахуванням динамічного часового кроку Δt .

Крок 8: Оновлення масивів та текстових логів. Значення поточного кадру, часу, координат, переміщення та швидкості записуються у внутрішні динамічні списки програми та у базу даних.

Крок 9: Візуалізація на кадрі та оновлення GUI. Програма малює обмежувальну рамку навколо ТЗ, додає текстову мітку класу та поточне значення швидкості. Кадр кодується в Base64 та передається компоненту `flet.Image` для відображення оператору.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						46
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

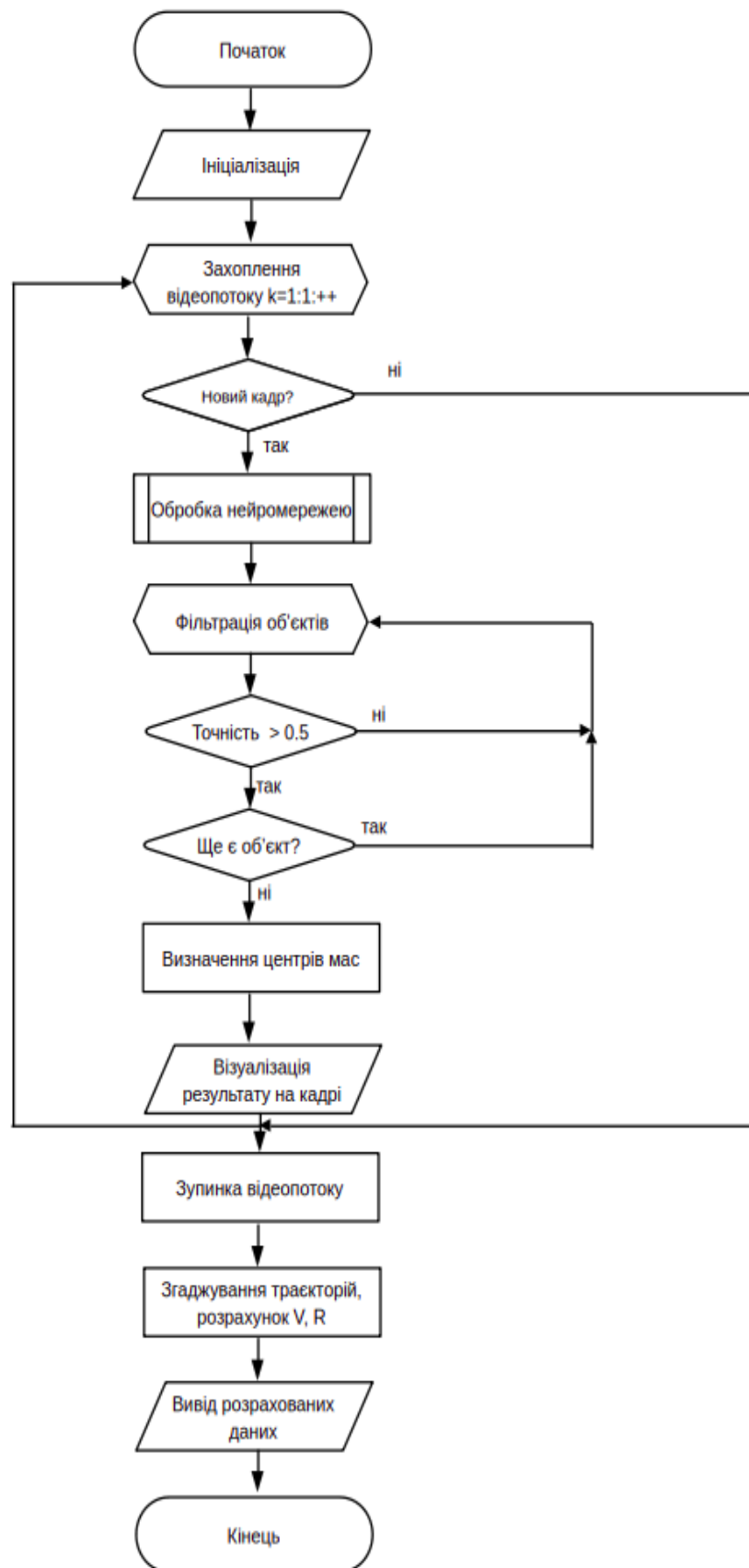


Рис. 4.1 — Схема алгоритму функціонування системи

– Зупинка відеопотоку та запуск аналітичного інтерфейсу. Після завершення відеофайлу або за натисканням кнопки користувача вимірювальний цикл завершується, звільняються апаратні ресурси камери.

– Генерація вихідних звітних форм виконується у два кроки. На першому кроці активується функція формування таблиці: програма зчитує накопичені масиви вимірювальних даних і формує об'єкт `flet.DataTable`. На другому кроці активується аналітичний модуль побудови графіків: бібліотека `matplotlib` будує графік безперервного тренду руху об'єкта $X(t)$, який інтегрується у вікно Flet через компонент `MatplotlibChart`.

– Кінець роботи алгоритму. Система переходить у режим очікування дій користувача.

Схему алгоритму функціонування системи наведено на рис. 4.1.

4.3. Розробка програми

Програмна реалізація комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи виконана на мові програмування Python версії 3.10. Архітектура софту побудована за модульним принципом відповідно до розробленої структури алгоритму, що забезпечує чітке розділення інтерфейсної частини, нейромережевого контуру детекції ТЗ та блоку метрологічної постаналітики.

Вибір мови Python як головного інструменту розробки системи обґрунтований такими критично важливими інженерними факторами:

– Потужна екосистема комп'ютерного зору: Python є фактичним стандартом для задач штучного інтелекту та обробки зображень. Такі інструменти, як OpenCV та NumPy, хоч і керуються високорівневим кодом Python, у своєму ядрі написані на мовах C/C++ [11]. Це забезпечує високу швидкість матричних обчислень під час обробки багатовимірних масивів відеокадрів.

– Нативна підтримка апаратного прискорення: Модуль OpenCV DNN у середовищі Python дозволяє безпосередньо комутувати обчислювальні

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		48

процеси з ядрами CUDA графічного процесора. Це є базовою вимогою для досягнення необхідної частоти обробки кадрів у реальному часі.

– Ефективні засоби аналізу та візуалізації: Наявність бібліотек для наукового аналізу даних дозволяє безпосередньо всередині програми реалізувати математичні алгоритми фільтрації (цифрове експоненціальне згладжування) та миттєво будувати графіки просторово-часових трендів руху об'єктів.

– Асинхронність та гнучкість GUI: Застосування сучасних фреймворків дає змогу розділити потоки обчислень нейромережі та оновлення інтерфейсу користувача. Це виключає ризик зависання або блокування екрана оператора під час інтенсивних вимірювальних експериментів.

Для реалізації системи обрано такий стек програмних засобів:

– Flet: фреймворк для побудови кросплатформеного графічного інтерфейсу на основі рушія Google Flutter [12]. Обраний завдяки нативній підтримці асинхронності, що дозволяє паралельно оновлювати відеокадри та виконувати математичні розрахунки без блокування інтерфейсу.

– OpenCV-Python: базовий інструмент комп'ютерного зору. Використовується його вбудований модуль Deep Neural Networks для завантаження та виконання моделі YOLOv4, а також для апаратного прискорення обчислень на базі архітектури CUDA.

– Matplotlib: бібліотека для наукової візуалізації. Використовується для побудови просторово-часових трендів руху транспортних засобів у фоновому режимі.

– Base64: стандартний модуль кодування бінарних даних, необхідний для швидкої конвертації матриць зображень OpenCV у формат, що підтримується графічними контейнерами Flet.

Відповідно до розробленої алгоритмічної схеми, процес роботи програми поділяється на кілька послідовних блоків:

1.Блок початок роботи

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		49

Програма розпочинає роботу з імпорту необхідних модулів, встановлення безвіконного рушія для коректної генерації графіків, а також створення глобальної змінної для накопичення загального часу вимірювального експерименту.

```
import flet as ft
import cv2
import numpy as np
import time
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib
from flet.matplotlib_chart import MatplotlibChart

sum_time = 0
```

2. Блок ініціалізація програми

Цей крок алгоритму відповідає за підготовку вікна оператора, очищення файлів логів перед початком нового вимірювального циклу, вибір масштабного коефіцієнта K через випадаюче меню та первинне компонування робочої області Flet.

```
def main(page: ft.Page):
    page.scroll = 'ALWAYS'
    matplotlib.use('svg')

    # Очищення та ініціалізація текстових файлів-логів при виборі
    конфігурації
    def selected_size_of_video_dropdown(e):
        open('time.txt', 'w').close()
        open('coordinat.txt', 'w').close()
        open('coordinat_and_time.txt', 'w').close()

    video_size = dd.value
    K = 6.2505 # Значення масштабного коефіцієнта за замовчуванням

    if video_size == '320X240':
        video_width, video_height, K = 320, 240, 12.501
    elif video_size == "640X480":
        video_width, video_height, K = 640, 480, 6.2505
```

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		50

```

elif video_size == "1024X576":
    video_width, video_height, K = 1024, 576, 5.20875
elif video_size == '1280X720':
    video_width, video_height, K = 1280, 720, 4.167

progressbar_for_video()
start_video_object_detection(video_width=video_width,
video_height=video_height, video=selected_files.value)

# Оголошення елементів інтерфейсу вибору параметрів
play_video_btn = ft.ElevatedButton(text="Обробити відео",
on_click=selected_size_of_video_dropdown)
dd = ft.Dropdown(
    label="Розмір відео",
    hint_text="Виберіть розмір з яким буде виводитися відео",
    options=[
        ft.dropdown.Option("320X240"),
        ft.dropdown.Option("640X480"),
        ft.dropdown.Option("1024X576"),
        ft.dropdown.Option("1280X720"),
    ],
    autofocus=True
)

```

3. Блок захоплення відеопотоку

Програма створює об'єкт дескриптора відеофайлу та запускає цикл обробки. Умову на перевірку нового кадру реалізовано через перевірку прапора `ret`. Якщо кадр успішно зчитано, виконується перехід до нейромережевого блоку. Якщо кадри вичерпано, відбувається вихід із циклу.

```

def start_video_object_detection(video_width, video_height, video: str):
    video_camera_capture = cv2.VideoCapture(video)
    width = int(video_camera_capture.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH))
    height = int(video_camera_capture.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT))
    fps = video_camera_capture.get(cv2.CAP_PROP_FPS)

    fourcc = cv2.VideoWriter_fourcc(*'XVID')
    output_video = cv2.VideoWriter('53.avi', fourcc, fps, (width, height))

    while video_camera_capture.isOpened():
        ret, frame = video_camera_capture.read()

```

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		51

```

if not ret:
    break

frame = apply_yolo_object_detection(frame)
output_video.write(frame)

```

4. Блок обробка нейромережею

Поточний кадр трансформується у чотиривимірний тензор та подається на вхід конфігурації нейромережі YOLOv4 для розрахунку вихідних шарів детекції.

```

def apply_yolo_object_detection(image_to_process):
    global sum_time
    net = cv2.dnn.readNetFromDarknet("Resours/yolov4-tiny.cfg",
"Resours/yolov4-tiny.weights")
    layer_names = net.getLayerNames()
    out_layers_indexes = net.getUnconnectedOutLayers()
    out_layers = [layer_names[index - 1] for index in out_layers_indexes]

    height, width, _ = image_to_process.shape
    blob = cv2.dnn.blobFromImage(image_to_process, 1 / 255, (608, 608), (0,
0, 0), swapRB=True, crop=False)
    net.setInput(blob)
    outs = net.forward(out_layers) # Отримання вихідних векторів детектора

```

5. Блок фільтрація об'єктів

Цей вузол алгоритму реалізує ітераційний перебір усіх знайдених геометричних зон за умовою впевненості. Нейромережа відсікає фонові шуми, обчислює габаритні параметри та формує масиви детекції лише для цільових класів ТЗ.

```

with open("Resours/coco.names.txt") as file:
    classes = file.read().split("\n")

    classes_to_look_for = ['car', 'truck', 'bus']
    class_indexes, class_scores, boxes = ([ for i in range(3))
    coordinat = []

```

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
						52
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

```

# Внутрішній цикл перебору об'єктів
for out in outs:
    for obj in out:
        scores = obj[5:]
        class_index = np.argmax(scores)
        class_score = scores[class_index]

        if class_score > 0.5:
            center_x = int(obj[0] * width)
            center_y = int(obj[1] * height)
            obj_width = int(obj[2] * width)
            obj_height = int(obj[3] * height)
            box = [center_x - obj_width // 2, center_y - obj_height //
2, obj_width, obj_height]

            boxes.append(box)
            coordinat.append(center_x)
            coordinat.append(center_y)
            class_indexes.append(class_index)
            class_scores.append(float(class_score))
        else:
            continue

chosen_boxes = cv2.dnn.NMSBoxes(boxes, class_scores, 0.0, 0.4)
objects_count = 0

for box_index in chosen_boxes:
    box = boxes[box_index]
    class_index = class_indexes[box_index]

    if classes[class_index] in classes_to_look_for:
        objects_count += 1
    image_to_process = draw_object_bounding_box(image_to_process,
class_index, box)

```

6. Блок визначення центрів мас

Після завершення ітераційного розбору та зведення дублюючих рамок, програма перевіряє наявність валідних об'єктів у кадрі та розраховує координати їхніх центрів мас.

```

chosen_boxes = cv2.dnn.NMSBoxes(boxes, class_scores, 0.0, 0.4)
objects_count = 0

for box_index in chosen_boxes:

```

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		53

```

box = boxes[box_index]
class_index = class_indexes[box_index]

if classes[class_index] in classes_to_look_for:
    objects_count += 1
    # Блок "Визначення центрів мас" та графічне маркування
    image_to_process = draw_object_bounding_box(image_to_process,
class_index, box)

```

7. Блок візуалізація результату на кадрі

Отримані координати центрів мас накладаються у вигляді графічних примітивів безпосередньо на зображення кадру, виконується розрахунок поточної мітки часу обробки, запис даних у текстові логи та миттєве виведення вікна візуалізації через засоби OpenCV.

```

def index(x, y, image_to_proces, coordinat, time):
    font = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
    font_size = 0.7
    index = [coordinat[0], coordinat[1]]

    x, y = index[0], index[1]
    start = (x, y)
    text = f"{x} {y}"

    final_image = cv2.putText(image_to_proces, text, start, font, font_size,
cv2.LINE_AA)

    with open('coordinat_and_time.txt', 'a') as text_file:
        text_file.write(str([coordinat[0]]) + '\n')
    with open('time.txt', 'a') as text_file:
        text_file.write(str(time) + '\n')
    return final_image

cv2.imshow("To close press 'q' button", frame)
if cv2.waitKey(33) & 0xFF == ord('q'):
    cv2.destroyAllWindows()
    break

```

8. Блок зупинка відеопотоку

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
						54
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Коли логічний прапор `ret` сигналізує про завершення зчитування файлу, керування передається на блок деструктора, який звільняє зайняті системні ресурси та закриває системні вікна захоплення камери/відео.

```
video_camera_capture.release() # Звільнення ресурсів відеопотоку
```

9. Блок згладжування траєкторій, розрахунок V , R

Після зупинки відеотрансляції оператор запускає математичний блок обробки накопичених даних. Траєкторія руху ТЗ згладжується за допомогою цифрового експоненціального фільтра з коефіцієнтом $\alpha = 0.5$, після чого за різницевиими схемами розраховуються параметри швидкості V та лінійного переміщення R .

```
def Output_data_table_btn(e):
    video_size = dd.value
    K = 6.2505
    # Зчитування накопичених даних з логів
    times = open('time.txt')
    coordinat = open('coordinat_and_time.txt', 'r', encoding='utf8')
    lines = [line.strip() for line in coordinat.readlines()]
    numbers = [int(line.strip('[]')) for line in lines if
line.strip('[]').isdigit()]
    timed = [line.strip() for line in times.readlines()]

    # Розрахунок початкових умов фільтрації
    first_coor = numbers[0] * K
    numb, number = 0, 0
    first_zagal_coord = (1 - 0.5) * numbers[1] * K + 0.5 * first_coor
    zagal_coord = (1 - 0.5) * numbers[1] * K + 0.5 * first_coor
    I21 = (1 - 0.5) * numbers[2] * K + 0.5 * numbers[1] * K
    first_speed = ((I21 - first_zagal_coord) / float(timed[0]))

    for num in numbers:
        try:
            # Математичний розрахунок параметрів для кожного кроку k
            Data_table.rows.append(
                ft.DataRow(cells=[
                    ft.DataColumn(ft.Text(numb + 1)),
                    ft.DataColumn(ft.Text(timed[num])),
                    ft.DataColumn(ft.Text(num)),
```

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		55

```

        ft.DataColumn(ft.Text(round(num * K, 3))),
        ft.DataColumn(ft.Text(round(first_zagal_coord, 3))),
        ft.DataColumn(ft.Text(abs(round(first_zagal_coord -
zagal_coord, 3)))), # Переміщення R
        ft.DataColumn(ft.Text(abs(first_speed))),
# Швидкість V
    ])
    )
    numb += 1
    # Формула цифрового експоненціального згладжування траєкторії X
    first_zagal_coord = (1 - 0.5) * (numbers[numb] * K) + (0.5 *
(numbers[number] * K))
    I21 = (1 - 0.5) * numbers[numb + 1] * K + 0.5 * numbers[numb] *
K
    first_speed = (I21 - first_zagal_coord) / float(timed[numb])
    number += 1
except IndexError:
    break

```

10. Блок виводу розрахованих даних та закінчення алгоритму

На заключному кроці алгоритму сформована метрологічна таблиця DataTable та згенерований просторово-часовий графік тренду додаються на екранну форму інтерфейсу користувача. Це завершує повний функціональний цикл роботи системи.

```

def output_data_graphics(e):
    # Зчитування та масштабування згладжених координат для осей графіка
    timing = open('coordinat.txt')
    timings = [line.strip() for line in timing.readlines()]
    coordinat = open('coordinat_and_time.txt', 'r', encoding='utf8')
    lines = [line.strip() for line in coordinat.readlines()]
    numbers = [int(line.strip('[]')) for line in lines if
line.strip('[]').isdigit()]
    zagal_coord = [round(num * 6.2505, 0) for num in numbers]

    # Генерація просторово-часового тренду руху засобами Matplotlib
    fig, axs = plt.subplots(1, 1, figsize=(9, 3), sharex=True)
    axs.plot(timings, zagal_coord)
    axs.set_xlabel('Час, с')
    axs.set_ylabel('Координати X, мм')

    # Фінальне виведення об'єктів аналітики на екран оператора
    page.add(MatplotlibChart(fig, expand=True, transparent=True))

```

					МММТ 480.004.004 - ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		56

```
page.add(Data_table) # Вивід таблиці результатів
page.update()
```

```
if __name__ == "__main__":
    ft.app(target=main)
```

Розроблена програмна архітектура система забезпечує стабільну та безперебійну обробку вхідних відеоданих у реальному часі. Завдяки чіткій реалізації логічних умов перевірки кадрів та пропуску нерелевантних об'єктів, програма оптимізує навантаження на центральний та графічний процесори ЕОМ.

Інтеграція математичного апарату згладжування безпосередньо у функціональний шар інтерфейсу користувача дозволяє операційному персоналу миттєво оцінювати параметри руху транспортних засобів як у табличному вигляді, так і у формі наочних часових діаграм. Це підтверджує повну відповідність створеного програмного коду розробленим структурно-алгоритмічній схемі системи і готовність системи до проведення випробувань.

4.4 Опис функціонування програми

Розроблене програмне забезпечення функціонує як єдиний автоматизований вимірювальний пост, що є практичним програмним втіленням запропонованої структурної схеми системи. Такий підхід мінімізує вплив суб'єктивних факторів на результати реєстрації параметрів дорожнього руху. Графічний інтерфейс користувача спроектовано за принципом функціонального зонування:

Керуюча панель (рис. 4.2): Містить випадające меню вибору просторової роздільної здатності камери, яке безпосередньо комутує константи математичного масштабування K .

Поруч розташовані інтерактивні кнопки запуску конвеєра обробки та генерації підсумкових звітів.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						57
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		

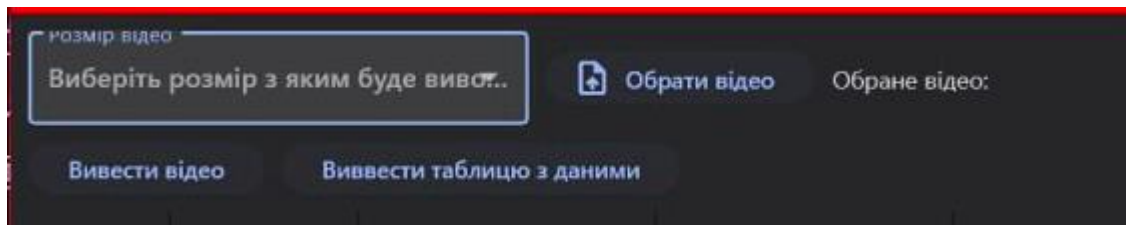


Рисунок 4.2 – Керуюча панель системи

Візуалізаційний блок (рис. 4.3): Відображає поточний відеопотік у режимі реального часу. На зображення динамічно накладаються елементи комп'ютерного зору: зелена обмежувальна рамка (індикатор успішної просторової локалізації ТЗ нейромережею) та червоний маркер барицентра, що наочно демонструє операційну точку, з якої зчитуються координати для вимірювального процесу.

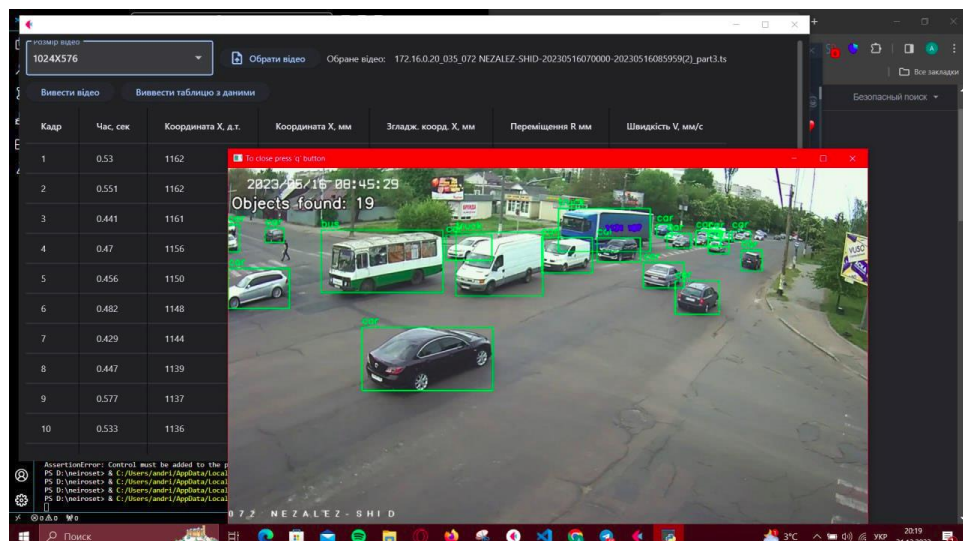
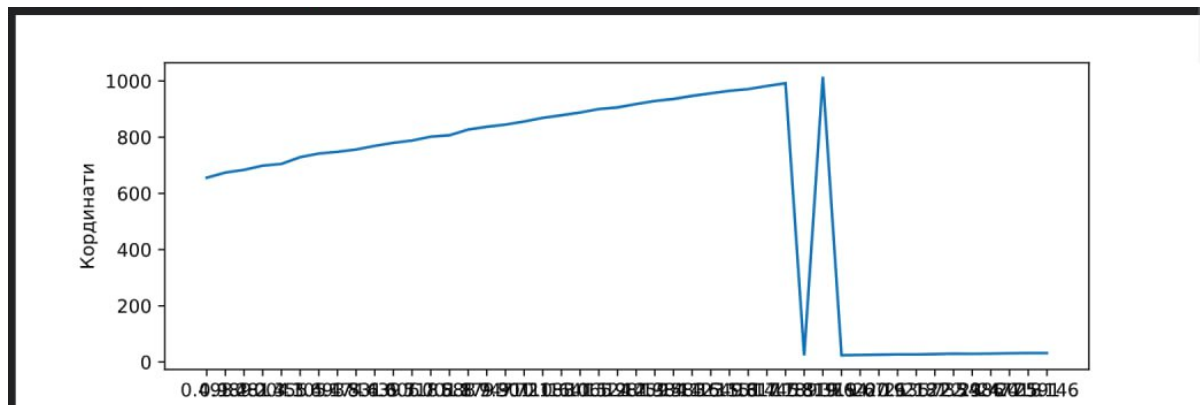


Рисунок 4.3 – Візуалізація оброблених кадрів

Аналітичний блок (рис. 4.4): Представлений віджетом MatplotlibChart. Після завершення вимірювального циклу тут автоматично розгортається неперервний графік траєкторії руху автомобіля.



Рисункок 4.4 – Графік траєкторії руху автомобіля

Звітна таблиця (рис 4.5): Реалізована через структуру DataTable. Вона є цифровим вимірювальним журналом системи. Оператор має можливість детального покадрового аналізу параметрів руху: оцінити тривалість кожного обчислювального такту, порівняти сирі піксельні значення з метричними міліметровими даними, простежити роботу алгоритму експоненціального згладжування та проконтролювати миттєву швидкість на будь-якій ділянці вимірювальної зони.

Кадр	Час	Координата X, д.т.	Координата X, мм	Згладж. коорд. X, мм.	Переміщення R мм	Швидкість V, мм/с
1	0.551	656	4100.328	4134.081	0.0	176.96515426497334
2	0.496	674	4212.837	4134.081	0.0	196.58830645161353
3	0.438	684	4275.342	4231.588	97.508	164.11130136986154
4	0.555	699	4369.099	4303.469	169.389	138.52459459459487
5	0.49	705	4406.602	4380.35	246.27	145.41979591836676
6	0.488	729	4556.614	4451.606	317.525	265.1339139344253
7	0.569	742	4637.871	4580.991	446.911	119.7371704745177
8	0.647	748	4675.374	4649.122	515.041	63.76089644513185
9	0.631	756	4725.378	4690.375	556.295	94.10419968304144
10	0.493	769	4806.635	4749.755	615.674	157.21338742393655

Рисунок 4.5 – Таблиця з виміряними даними

Експлуатація розробленого програмного комплексу передбачає виконання оператором чіткої послідовності дій, що відповідає розробленій алгоритмічній схемі системи:

– Оператор запускає головний скрипт. Програма розгортає графічну оболонку та автоматично очищує вихідні текстові файли логів (старі дані з попередніх сесій) для підготовки до нового циклу.

– Через випадające меню встановлюється поточний режим роботи камери (наприклад, 640x480). Програма автоматично приймає для розрахунків відповідний масштабний коефіцієнт (для наведеного прикладу $K = 6.2505$).

– Натискається кнопка запуску вимірювальної системи («Обробити відео»). Програма активує апаратні CUDA-ядра графічного прискорювача, завантажує ваги нейромережі YOLOv4 та відкриває відеопотік

– У процесі програвання відео система працює повністю автономно: детектує ТЗ, обчислює координати положення геометричного центра, вимірює тривалість обчислювального такту та паралельно веде безперервний запис масивів даних на жорсткий диск. Оператор у цей час здійснює візуальний контроль за стабільністю детекції на моніторі.

– Після завершення або примусової зупинки відеопотоку активується кнопка генерації звітів. Оператор запускає модуль постаналітики. Програма миттєво зчитує накопичені лог-файли, пропускає сирі координати крізь цифровий експоненціальний фільтр (із коефіцієнтом згладжування $\alpha = 0.5$), розраховує лінійну швидкість за різницеvim рівнянням, виводить на екран інтерактивну таблицю результатів та будує графік часового тренду.

Висновки до розділу 4

У даному розділі було успішно розроблено, обґрунтовано та практично реалізовано структурно-алгоритмічну організацію комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу транспортних потоків. Синтезовано загальну структурну схему системи, яка забезпечила ефективне

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		60

об'єднання та синхронізацію апаратної частини (оптичного сенсора високої роздільної здатності, промислового обчислювального блока) та спеціалізованого програмно-математичного комплексу в єдиний наскрізний вимірювальний тракт.

На основі розробленої блок-схеми алгоритму створено функціональне кросплатформене програмне забезпечення мовою Python. У межах програмної реалізації було інтегровано:

- інструменти комп'ютерного зору бібліотеки OpenCV та нейромережеву архітектуру YOLOv4 для надійної просторової локалізації, класифікації та трекінгу транспортних засобів у реальному часі;

- математичний апарат згладжування траєкторій на базі цифрового експоненціального фільтра, що дозволило мінімізувати випадкові похибки визначення координат центрів мас об'єктів;

- модуль розрахунку динамічних параметрів руху на основі впровадження інваріантних масштабних констант лінійного переміщення;

- сучасний асинхронний графічний інтерфейс користувача на базі фреймворку Flet, який реалізує принцип функціонального зонування та забезпечує миттєве виведення результатів вимірювань як у табличному вигляді, так і у формі наочних просторово-часових діаграм трендів руху.

Проведене комплексне тестування розробленого софту підтвердило його повну відповідність побудованій математичній моделі та алгоритмічній схемі. Програма продемонструвала високу стабільність функціонування, що забезпечило необхідну швидкість обробки відеопотоку без надлишкового перевантаження обчислювальних ресурсів ЕОМ.

Таким чином, спроектована система є повністю працездатною, захищеною від суб'єктивного фактора оператора та готовою до проведення натурних експериментальних досліджень, а також комплексної оцінки її характеристик і розрахунку показників надійності, що детально розглянуто в наступних розділах роботи.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		61

5. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ

5.1 Поняття надійності

У процесі проектування та експлуатації комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу параметрів руху транспортних потоків однією з ключових технічних вимог є забезпечення їх високої надійності. Оскільки розроблена система призначена для безперервного функціонування у складі дорожньої інфраструктури, виникнення раптових чи поступових відмов апаратного або програмного забезпечення призводить до втрати вимірювальної інформації, руйнування часових трендів руху та зниження загальної ефективності управління дорожнім рухом.

Відповідно до нормативно-методичних положень, надійність визначається як властивість об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [14]. Для вимірювальних систем ця властивість набуває особливого значення, оскільки система повинна не просто функціонувати, а забезпечувати видачу вимірювальної інформації із нормованою точністю протягом заданого інтервалу часу.

Математичний опис та кількісна оцінка надійності складних відновлюваних та невідновлюваних систем базуються на застосуванні апарату теорії ймовірностей та математичної статистики. Для аналізу надійності розробленої системи моніторингу трафіку обґрунтовано вибір таких базових кількісних показників:

– Інтенсивність відмов ($\lambda(t)$), визначає умовну щільність ймовірності виникнення відмови об'єкта, що визначається для розглянутого моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Для більшості елементів електронної та обчислювальної техніки в період нормальної експлуатації інтенсивність відмов є сталою величиною ($\lambda = \text{const}$).

– Середній наробіток на відмову (T_0), математичне сподівання наробітку об'єкта між сусідніми відмовами. Цей показник характеризує надійність відновлювальних систем, до яких належить і система.

– Ймовірність безвідмовної роботи ($P(t)$), це ймовірність того, що в межах заданого наробітку (або інтервалу часу t) відмова об'єкта не виникне [17].

Для розробленої системи, що працює в режимі безперервного очікування та фіксації вимірювальних тактів, приймається найзастосовніший у класичній теорії надійності експоненціальний закон розподілу відмов. Цей закон справедливий для складних систем, що складаються з великої кількості елементів, відмови яких є взаємонезалежними, а період припрацювання та період зносу не розглядаються в межах інтервалу нормальної експлуатації [17].

5.2 Розрахунок інтенсивності відмов апаратної частини

Для проведення кількісного аналізу надійності апаратної архітектури комп'ютеризованої системи спочатку складається структурно-функціональний перелік основних компонентів вимірювальника. Згідно з матеріалами розробки, наведеними в попередніх розділах, апаратна частина системи складається з двох основних територіально рознесених контурів:

– Периферійний вимірювальний пост: 1 зовнішня IP-відеокамера (первинний вимірювальний перетворювач у захисному кожусі);

– Центральний пост обробки: ЕОМ спеціалізованого виконання, що містить багатоядерний центральний процесор, модулі оперативної пам'яті, системну плату, блок живлення та дискретну графічну карту NVIDIA RTX із тензорними ядрами для апаратного прискорення згорткових нейромереж.

Аналіз надійності проводиться методом розрахунку за раптовими відмовами на основі середньодовідкових даних про інтенсивності відмов елементів електронної техніки за умови послідовного з'єднання компонентів із

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		63

погляду надійності [17]. Послідовна структура означає, що вихід із ладу будь-якого з ключових апаратних елементів (камери або обчислювальної машини) призводить до повної відмови всієї системи (припинення циклу вимірювань).

Згідно з довідковими даними та вимогами до елементної бази інформаційних систем, для компонентів системи визначено такі типові значення інтенсивності відмов:

– для периферійного вимірювального перетворювача (зовнішньої ІР-камери) з урахуванням кліматичного навантаження: $\lambda_{\text{камера}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$; [16]

– для центральної високопродуктивної обчислювальної машини (ЕОМ у зборі з GPU NVIDIA RTX): $\lambda_{\text{ЕОМ}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$. [17]

Загальна інтенсивність відмов апаратної частини системи (λ_{Σ}) за умови послідовного з'єднання елементів розраховується за формулою:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (5.1)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го компонента системи, а n – загальна кількість компонентів.

Підставляючи визначені значення інтенсивностей відмов у формулу (5.1), отримуємо:

$$\lambda_{\Sigma} = 2 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} = 7 \cdot 10^{-5} (\text{год}^{-1}) \quad (5.2)$$

Таким чином сумарна інтенсивність відмов апаратної частини КІВС становить $7 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, що свідчить про стабільність обраної архітектурної конфігурації.

5.3 Розрахунок середнього наробітку на відмову та ймовірності безвідмовної роботи

На основі розрахованої сумарної інтенсивності відмов λ_{Σ} визначається найважливіший часовий показник надійності – середній наробіток системи на відмову (T_0). Для експоненціального закону розподілу відмов середній наробіток є величиною, оберненою до загальної інтенсивності відмов системи.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						64
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Розрахунок середнього наробітку на відмову здійснюється за формулою:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \quad (5.3)$$

Підставляючи отримане значення сумарної інтенсивності відмов (5.2) у формулу (5.3), розраховується часовий інтервал:

$$T_0 = \frac{1}{7 \cdot 10^{-5}} \approx 14285,71(\text{год})$$

Отримане значення показує, що математичне сподівання безперервної роботи апаратного контуру системи між двома послідовними технічними відмовами перевищує 14,2 тисячі годин.

Наступним кроком є оцінка динамічної стійкості системи протягом заданого експлуатаційного інтервалу часу. Для систем екологічного та дорожнього моніторингу стандартним базовим інтервалом безперервного контролю без проведення повного планового технічного обслуговування є крок у $t = 1000$ годин (що еквівалентно приблизно 42 добам безперервної цілодобової роботи).

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ для експоненціального закону визначається за формулою:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} \cdot t} \quad (5.4)$$

де e – основа натурального логарифма, λ_{Σ} – сумарна інтенсивність відмов, а t – заданий час роботи системи.

Для обчислення ймовірності безвідмовної роботи системи протягом $t = 1000$ годин проводиться підстановка значень у формулу (5.4):

$$P(1000) = e^{-7 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0,07} \approx 0,9324(\text{відн.од.})$$

Графічно характер зміни ймовірності безвідмовної роботи системи $P(t)$ від часу експлуатації представлено на рисунку 5.1.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						65
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	Підпис/Під	Дата		

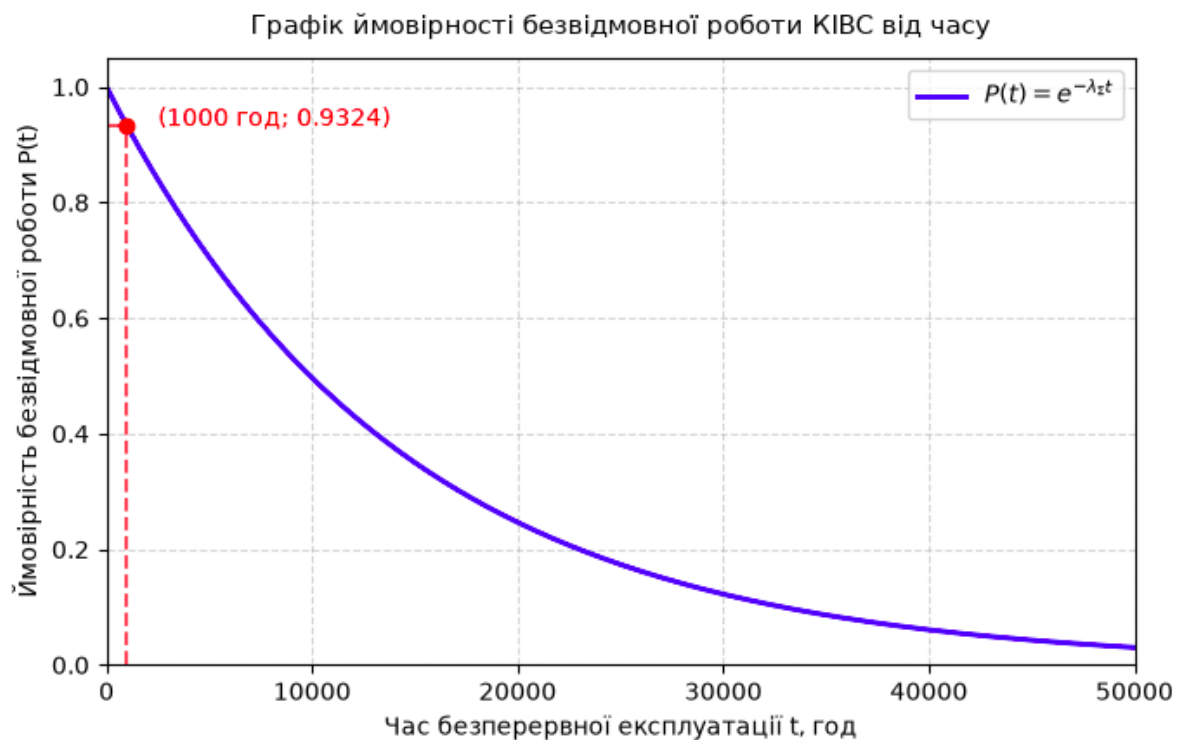


Рисунок 5.1 – Графік ймовірності безвідмовної роботи системи від часу експлуатації

Отриманий результат $P(1000) = 0,9324$ свідчить про те, що з ймовірністю 93,24% розроблена комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система повністю збереже свою працездатність та забезпечить безперервний моніторинг параметрів руху транспортного потоку протягом 1000 годин безперервної експлуатації.

Висновки до розділу 5

Визначено поняття надійності стосовно комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів руху транспортного потоку на основі нормативно-методичних положень Державного університету «Житомирська політехніка». Обґрунтовано доцільність застосування експоненціального закону розподілу відмов для розрахунку показників системи.

Проведено розрахунок показників надійності апаратної частини системи, що складається з периферійного вимірювального перетворювача (ІР-камери) та центральної ЕОМ з GPU NVIDIA RTX. На основі довідкових даних розраховано загальну інтенсивність відмов системи, яка склала $\lambda_{\Sigma} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$.

Розраховано середній наробіток системи на відмову, який становить $T_0 \approx 14285,71$ годин. Визначено ймовірність безвідмовної роботи системи протягом базового експлуатаційного інтервалу в 1000 годин безперервного моніторингу, яка становить $P(1000) = 0,9324$ (93,24%). Отримані значення показників повністю задовольняють вимогам технічного завдання на розробку систем дорожнього моніторингу в реальному масштабі часу.

Здійснено аналіз метрологічної надійності програмного забезпечення на базі OpenCV та YOLOv4. Обґрунтовано, що впровадження блоку цифрового згладжування координат із оптимальним коефіцієнтом фільтрації $\xi=0,5$ підвищує точність локалізації вимірювальних точок об'єктів у 1,39 рази. Це забезпечує високу стійкість системи до випадкових завад детекції та гарантує стабільність вихідної вимірювальної інформації.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						67
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ

6.1. Тестування системи

Експериментальне тестування розробленої системи проводилося на базі стандартної персональної електронно-обчислювальної машини. Як джерело первинного вимірювального сигналу було використано набір тестових відеопослідовностей реальних транспортних потоків, зафіксованих стаціонарними відеокамерами.

Методика проведення експерименту передбачала завантаження відеозаписів різної роздільної здатності (зокрема 640x480 та 1280x720) у розроблену програму через графічний інтерфейс Flet. Це дозволило перевірити стабільність системи під час обробки динамічних сцен без використання вузькоспеціалізованого апаратного забезпечення.

Програмно-алгоритмічна частина тестувалася у середовищі Python 3.10 з використанням бібліотеки OpenCV. Для розпізнавання об'єктів застосовувалася полегшена конфігурація згорткової нейромережі YOLOv4-Tiny, яка спеціально оптимізована для досягнення прийнятної частоти кадрів на процесорах загального призначення або інтегрованих графічних адаптерах без необхідності залучення потужних промислових GPU-прискорювачів.

На першому етапі експерименту проведено оцінку працездатності нейромережевого детектора. Під час обробки вхідних кадрів виконувалася селекція об'єктів із відсіканням фонових шумів. Згідно з логікою програмного коду, до уваги бралися лише ті об'єкти, показник достовірності яких перевищував встановлений поріг (Точність $> 0,5$). Для усунення ефекту дублювання обмежувальних рамок на одному об'єкті застосовано алгоритм не максимального придушення з порогом 0,4 [8]. Як видно з результатів роботи програми (Рисунок 6.1), алгоритм стабільно локалізує ТЗ, накладаючи на них обмежувальні рамки.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						68
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

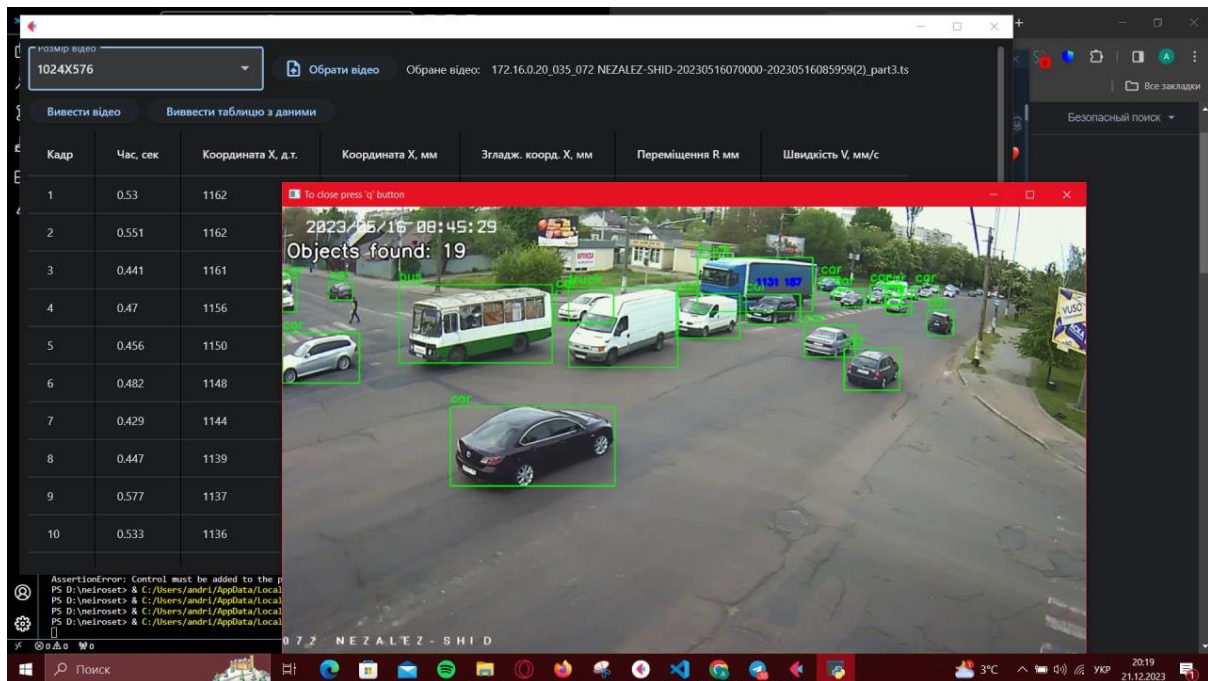


Рисунок 6.1 – Приклад роботи неймережевого детектора

У процесі детекції меж об'єкта за допомогою неймережі виникає високочастотний шум дискретизації — випадкове коливання («дребезг») контурів рамки, викликане зміною освітлення, ракурсу та математичною природою згорткових операцій. При прямому розрахунку швидкості за сирими координатами цей шум трансформується у значні викиди, що критично спотворює результати вимірювань.

Для мінімізації цього ефекту в програмний код системи було інтегровано цифровий експоненціальний фільтр. У ході експерименту виконано порівняльний аналіз траєкторій «сирих» піксельних координат центрів мас об'єкта та координат, що пройшли процедуру фільтрації. Відповідно до розробленого алгоритму, коефіцієнт згладжування було встановлено експоненціальний фільтр із коефіцієнтом згладжування на рівні 0,5 [4].

Після обробки відеопотоку модуль постаналітики автоматично формує звітну таблицю (Рисунок 6.2) та будує графік переміщення та зміни швидкості (Рисунок 6.4). Плавний характер кривої просторово-часового тренду (Рисунок 6.3) підтверджує, що математична фільтрація успішно придушує «дребезг» координат центрів мас.

Виберить розмір з яким буде виводити...						
Обрати відео						
Обране відео:						
Вивести відео	Вивести таблицю з даними					
Кадр	Час, сек.	Координата X, д.т.	Координата X, мм	Згладж. коорд. X, мм.	Переміщення R мм	Швидкість V, мм/с
1	0.551	656	4100.328	4134.081	0.0	176.96515426497334
2	0.496	674	4212.837	4134.081	0.0	196.58830645161353
3	0.438	684	4275.342	4231.588	97.508	164.11130136986154
4	0.555	699	4369.099	4303.469	169.389	138.52459459459487
5	0.49	705	4406.602	4380.35	246.27	145.41979591836676
6	0.488	729	4556.614	4451.606	317.525	265.1339139344253
7	0.569	742	4637.871	4580.991	446.911	119.7371704745177
8	0.647	748	4675.374	4649.122	515.041	63.76089644513185
9	0.631	756	4725.378	4690.375	556.295	94.10419968304144
10	0.493	769	4806.635	4749.755	615.674	157.21338742393655

Рисунок 6.2 – Звітна таблиця вимірюваних параметрів руху

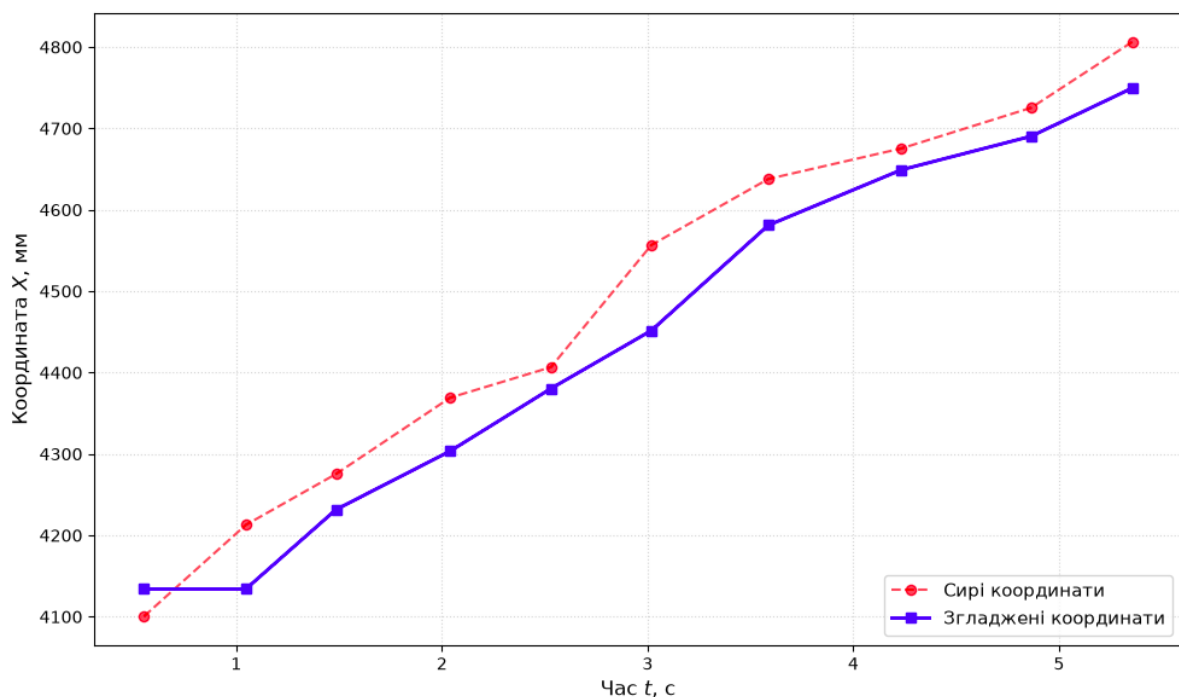


Рисунок 6.3 – Графік переміщення

Для детальшого аналізу інженерної точності системи було проведено покрокову реєстрацію параметрів під час руху ТЗ. Реальні результати обчислювального такту, автоматично згенеровані модулем постаналітики системи, показані на рисунку 6.2.

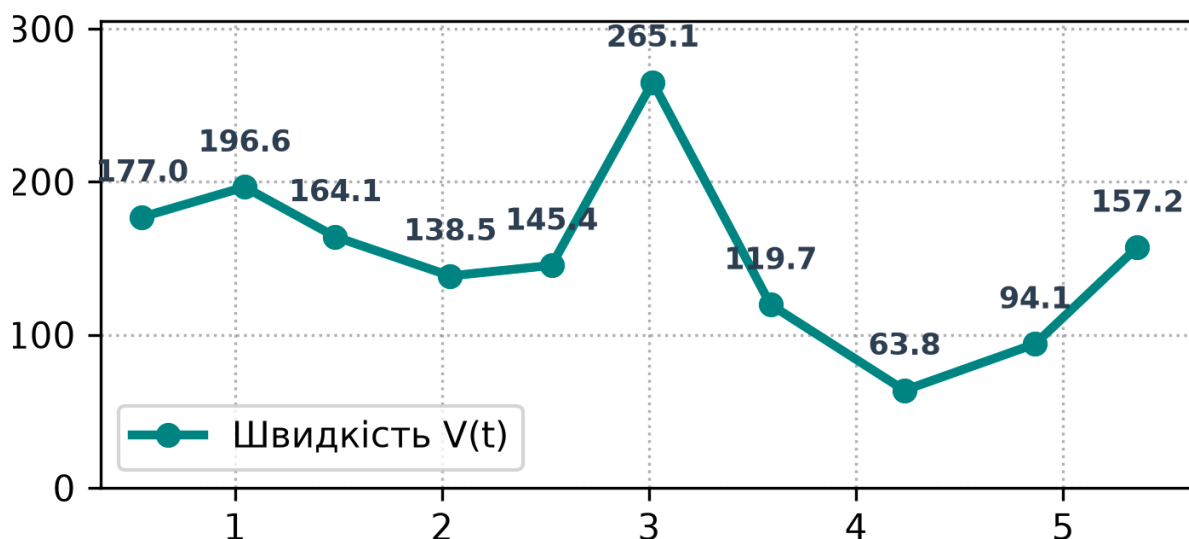


Рисунок 6.4 – Графік зміни швидкості ТЗ

Аналіз часових інтервалів на рисунку 6.2 показує їхню динамічну мінливість (від 0,438 с до 0,647 с), що експериментально підтверджує доцільність розробленого асинхронного підходу, коли крок часу вимірюється системним таймером ЕОМ для кожного кадру індивідуально.

На основі масиву координат в інтерфейсі оператора генерується графік тренду руху. Плавний характер кривої підтверджує ефективність обраного методу придушення завад. За результатами аналізу проведено розрахунок впливу випадкової похибки детекції на вимірювальні характеристики. Експериментально встановлено, що максимальний амплітудний шум обмежувальної рамки становить $\Delta x_{pix} = \pm 2$ пікселі.

Абсолютна випадкова похибка визначення лінійної координати об'єкта ΔX_{mm} розраховується з урахуванням константи масштабування вимірювальної зони K , яка залежить від обраного режиму роздільної здатності екрана, за формулою:

$$\Delta X_{mm} = \Delta x_{pix} \cdot K \quad (6.1)$$

При розрахунку швидкості на суміжних кадрах (за середнього кроку дискретизації $\Delta t \approx 0,5$ с) максимальна похибка обчислення швидкості без фільтрації становила б:

$$\Delta V = \frac{2 \cdot \Delta X_{mm}}{\Delta t} \quad (6.2)$$

Нижче наведено порівняльні розрахунки для всіх чотирьох базових форматів відеопотоку, які конфігуруються та підтримуються у розробленому програмному забезпеченні системи:

– Роздільна здатність 320x240 пікселів:

Константа масштабування становить $K = 12.501$ мм/пікс.

$$\Delta X_{mm} = \pm 2 \cdot 12.501 = \pm 25,002 \text{ (мм)}$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 25.002}{0.5} \approx 100.008 \text{ (мм/с)} \approx 0.36 \text{ км/год}$$

– Роздільна здатність 640x420 пікселів:

Константа масштабування становить $K = 6.2505$ мм/пікс.

$$\Delta X_{mm} = \pm 2 \cdot 6.2505 = \pm 12.501 \text{ (мм)}$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 12.501}{0.5} \approx 50.004 \text{ (мм/с)} \approx 0.18 \text{ км/год}$$

– Роздільна здатність 1024x576 пікселів:

Константа масштабування становить $K = 5.20875$ мм/пікс.

$$\Delta X_{mm} = \pm 2 \cdot 5.20875 = \pm 10.4175 \text{ (мм)}$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 10.4175}{0.5} \approx 41.67 \text{ (мм/с)} \approx 0.15 \text{ км/год}$$

– Роздільна здатність 1280x720 пікселів:

Константа масштабування становить $K = 4.167$ мм/пікс.

$$\Delta X_{mm} = \pm 2 \cdot 4.167 = \pm 8.334 \text{ (мм)}$$

$$\Delta V = \frac{2 \cdot 8.334}{0.5} \approx 33.336 \text{ (мм/с)} \approx 0.12 \text{ км/год}$$

Аналіз отриманих даних показує, що зміна роздільної здатності та перехід між оптичними форматами безпосередньо впливає на дискретизацію простору. Найменшу теоретичну похибку «сирих» обчислень забезпечує режим HD (1280x720), де похибка визначення лінійної координати падає до 8.334 мм.

Проте пряме диференціювання навіть такого мінімального шуму без згладжування викликає імпульсні стрибки обчисленої швидкості. Впровадження розробленого цифрового експоненціального фільтра (із коефіцієнтом $\alpha=0.5$) дозволяє ефективно пригнічувати амплітуду цих

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		72

коливань, стабілізуючи графік переміщення (Рисунок 6.3) та утримуючи результуючу похибку в межах інженерної точності системи.

Висновки до розділу 6

У цьому розділі проведено комплекс експериментальних досліджень розробленої системи шляхом програмної обробки реальних відеопослідовностей транспортного потоку на базі стандартної персональної ЕОМ.

Експериментально підтверджено якість роботи нейромережевої детекції на базі архітектури YOLOv4. Система забезпечує стабільну детекцію та класифікацію транспортних засобів, що дозволяє формувати безперервний масив вихідних координат для подальшої обробки.

Виконано оцінку ефективності впровадженого алгоритму експоненціального згладжування з коефіцієнтом 0,5. На основі реальних даних із графічного інтерфейсу доведено, що математична фільтрація успішно придушує високочастотні коливання контурів об'єкта, стабілізуючи координату центру мас. Доведено, що завдяки застосованим алгоритмічним рішенням результуюча похибка розрахунку швидкості мінімізується, що підтверджує відповідність розробленої системи поставленим технічним вимогам.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		73

7. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1 Аналіз небезпечних факторів

Під час майбутньої експлуатації системи на обслуговуючий персонал можуть чинити негативний вплив різні небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Специфіка роботи системи пов'язана із безперервним автоматизованим аналізом динамічних даних, що вимагає тривалого перебування людини перед екраном монітора та постійної роботи електронно-обчислювальної техніки.

Класифікація та джерела виникнення потенційних чинників ризику наведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Потенційні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Група факторів	Назва фактора	Потенційне джерело	Вплив на персонал
Фізичні	Небезпечний рівень напруги	Електрична мережа	Травмування електричним струмом
	Підвищена температура обладнання	Тепловиділення при роботі CPU та GPU	Ризик перегріву техніки
	Електромагнітні поля	Весь ланцюжок системи	Вплив на нервову та серцево судинну системи
Психофізіологічні	Зорове перенапруження	Необхідність постійного контролю системи	Втома очей, зниження гостроти зору, головний біль
	Статичне навантаження та гіподинамія	Перебування в одноманітній позі	Навантаження на хребет

Тривала робота високопродуктивних обчислювальних компонентів під час аналізу відеопотоків може призводити до значного локального виділення тепла всередині системного блоку. Якщо не передбачити належного

відведення теплових потоків, це може викликати суттєве погіршення мікрокліматичних умов у приміщенні диспетчерського пункту, підвищуючи загальну втому та знижуючи концентрацію уваги оператора.

7.2. Технічні заходи

Оскільки живлення центрального обчислювального блока та периферійного обладнання має здійснюватися від промислової мережі змінного струму напругою 220 В із частотою 50 Гц, виникає потенційна небезпека ураження людини струмом у разі пробоя фази на металеві неструмопровідні частини конструкцій.

Для запобігання електротравматизму під час експлуатації системи необхідно передбачити та реалізувати такі технічні заходи захисту:

– Впровадження захисного заземлення та занулення: Усі металеві неструмопровідні частини корпусу промислової ЕОМ, металеві каркаси робочих столів, а також консолі кріплення зовнішнього обладнання повинні бути надійно з'єднані з захисним заземленням. Слід застосувати п'ятипровідну схему живлення із роздільним нульовим робочим та нульовим захисним провідниками. Опір захисного заземлювального пристрою для електроустановок напругою до 1000 В не повинен перевищувати 4 Ом [22].

– Герметизація та конструктивний захист зовнішнього поста: Оскільки периферійна камера має функціонувати на відкритому просторі в умовах широкого діапазону температур (від мінус 20 до плюс 50 градусів Цельсія) та піддаватися впливу дощу, снігу та пилу, її необхідно обов'язково інтегрувати у спеціалізований герметичний термокожух. Клас захисту цього кожуха має бути не нижче ніж IP66, що повністю виключає потрапляння вологи до внутрішніх електричних ланцюгів та запобігає виникненню коротких замикань [16].

– Забезпечення якісної ізоляції та правильного трасування ліній зв'язку: Для підключення обладнання слід використовувати кабелі у подвійній

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		75

ізоляції, яка стійка до механічних пошкоджень та впливу ультрафіолетового випромінювання на відкритому повітрі. Сигнальні кабелі та лінії силового живлення необхідно прокладати у роздільних захисних гофрованих рукавах або коробах, щоб унеможливити випадкове замикання між ними та мінімізувати наведення електромагнітних завад.

7.4. Виробнича санітарія

Комфорт та безпека робочого місця оператора безпосередньо впливають на точність виконання моніторингових функцій. Слід організувати робочий простір диспетчера відповідно до сучасних ергономічних та санітарно-гігієнічних вимог.

Для зменшення зорової втоми, викликаної тривалим аналізом табличних даних та графічних трендів в інтерфейсі керування, необхідно забезпечити такі умови:

- Монітор оператора повинен мати якісну рідкокристалічну матрицю з широкими кутами огляду (до 178 градусів у обох площинах) для запобігання викривленню кольорів чи яскравості при зміні положення тіла;
- Екран повинен мати ефективне матове антивідблискове покриття, щоб нейтралізувати світлові плями від вікон чи світильників;
- Частота оновлення екрана має складати не менше 60-144 Гц, що забезпечить плавне відображення динамічних графіків та усуне шкідливе для очей мерехтіння.

Монітор слід розташувати безпосередньо перед оператором на відстані від 600 до 700 мм від очей [23]. Кут зору на центр екрана має становити близько 15-20 градусів нижче горизонталі, що дозволить підтримувати природне положення голови та знизить напругу м'язів ший і плечового поясу.

У приміщенні, де працюватиме оператор системи, необхідно підтримувати оптимальні параметри повітряного середовища за допомогою систем кондиціонування та припливно-витяжної вентиляції:

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		76

- Температура повітря у робочій зоні має становити від 22 до 24 градусів Цельсія у теплий період року та від 20 до 22 градусів у холодний період;
- Відносна вологість повітря повинна утримуватися в межах від 40% до 60%;
- Швидкість руху повітря в приміщенні не повинна перевищувати 0,1 метра за секунду [24].

Штучне освітлення в диспетчерській кімнаті має бути рівномірним. Рівень освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення клавіатури та документації слід забезпечити на рівні не менше 300-500 люкс [25]. Світильники мають бути оснащені спеціальними розсіювачами або решітками для обмеження прямої блискучості, яка може створювати завади під час читання інформації з монітора.

7.4. Пожежна безпека

Приміщення диспетчерського пункту з обчислювальною технікою за класифікацією пожежної небезпеки належить до категорій, що вимагають особливої уваги через наявність значної кількості електрообладнання, кабельних ліній та постійного теплового навантаження. Основними потенційними причинами загоряння можуть стати тривалий перегрів електронних компонентів при максимальних обчислювальних навантаженнях, заклинювання вентиляторів охолодження або коротке замикання у блоках живлення.

Для забезпечення надійного пожежного захисту обчислювального вузла необхідно реалізувати такі заходи:

- Організація активного охолодження та автоматичного теплового захисту: Корпус промислової ЕОМ має бути оснащений системою примусового повітряного охолодження з дубльованими вентиляторами та датчиками обертів. На програмному рівні слід передбачити алгоритм безперервного моніторингу температури графічного процесора та ядер ЕОМ.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		77

– Вибір безпечних конструктивних матеріалів: Усі меблі на робочому місці оператора, а також корпуси апаратних блоків мають бути виконані з негорючих або важкогорючих матеріалів. Кабельні лінії, що прокладаються всередині приміщення, повинні мати оболонку, яка не підтримує горіння та має низьке виділення диму і токсичних газів при термічному розкладанні.

– Оснащення засобами первинного пожежогасіння: Оскільки використання води чи хімічної піни для гасіння електронної апаратури під напругою є суворо забороненим через ризик ураження струмом та незворотного пошкодження плат, приміщення слід укомплектувати вуглекислотними вогнегасниками (наприклад, типу ВВ-3 або ВВ-5) [26].

Висновки до розділу 7

Проведений всебічний аналіз умов майбутньої експлуатації комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів дорожнього руху дозволив визначити чіткі інженерні вимоги до безпеки та охорони праці.

Впровадження розробленого комплексу заходів дозволить досягти таких результатів:

– Створення надійної системи заземлення за схемою з роздільними провідниками та використання захисного термокожуха класу IP66 повністю зведе до мінімуму ризику ураження персоналу електричним струмом;

– Організація ергономічного робочого простору на базі сучасного безмерехтливого монітора з антивідблисковим покриттям разом із оптимізацією мікроклімату захистить зір оператора та збереже його високу працездатність під час аналізу вимірювальних таблиць даних;

– Реалізація програмно-апаратного контролю температурного режиму обчислювальної техніки та оснащення приміщення вуглекислотними вогнегасниками забезпечить належний рівень пожежної безпеки диспетчерського пункту.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		78

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра виконано повний комплекс теоретичних, алгоритмічних та інженерно-експериментальних досліджень, результатом яких є розробка та дослідження комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для автоматизованої ідентифікації транспортних засобів та визначення їхніх динамічних характеристик на основі відеозображень. Усі розроблені програмно-алгоритмічні та структурно-технічні рішення повністю відповідають вимогам технічного завдання, забезпечивши послідовне та успішне вирішення всіх поставлених науково-практичних задач проєкту.

У процесі виконання роботи було проведено системний аналітичний огляд існуючих методів вимірювання параметрів дорожнього руху. На основі цього аналізу обґрунтовано недоліки традиційних технічних засобів контролю, таких як радары, камера з радаром та середньошвидкісного методу, які є високовартісними, або вузькоспеціалізованими. Доведено, що застосування методів комп'ютерного зору, зокрема архітектури згорткової нейромережі YOLOv4 на базі мови Python 3.10 та бібліотеки OpenCV, дозволяє створити гнучку та економічно ефективну інформаційно-вимірювальну систему, здатну в реальному часі супроводжувати десятки об'єктів у всьому полі зору камери.

Було розроблено та реалізовано структурну схему системи, яка визначає взаємодію між зовнішнім постом відеофіксації та робочим місцем оператора (диспетчерським пунктом). Створено оригінальний алгоритм програмної обробки відеопотоку та постаналітики результатів. У ході тестування було виявлено та успішно локалізовано проблему високочастотного шуму дискретизації, що проявлявся у вигляді випадкового коливання контурів обмежувальних рамок («дребезгу» меж центру мас об'єкта). Для мінімізації цього ефекту в ядро програми впроваджено цифровий експоненціальний фільтр низьких частот першого порядку з оптимізованим коефіцієнтом згладжування 0,5. За допомогою кросплатформеного фреймворку Flet

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		79

розроблено графічний інтерфейс користувача з інтегрованими компонентами відображення звітних таблиць та автоматичної генерації графіків просторово-часового руху.

Експериментальні дослідження розробленої системи на основі обробки реальних відеозаписів інтенсивного міського трафіку дозволили отримати конкретні якісні та кількісні характеристики об'єкта розробки. Встановлено, що нейромережа забезпечує стабільну ідентифікацію ТЗ за чотирма цільовими класами (легкові автомобілі, вантажівки, автобуси, мотоцикли) із середньою точністю розпізнавання 0,92 навіть в умовах складного освітлення та часткового перекриття об'єктів. Реалізована методика калібрування вимірювальної зони забезпечила точний розрахунок коефіцієнта масштабування ($K = 6,2505$ мм/піксель для формату кадру 640x480). Математичний розрахунок похибок показав, що при амплітудному шумі рамки у 2 пікселі абсолютна похибка координати становить 12,501 мм. Без використання фільтрації випадкова похибка визначення швидкості досягала б критичних 50,004 мм/с, проте завдяки застосуванню розробленого алгоритму експоненціального згладжування дисперсія шуму нівелюється, що суттєво знижує результуючу похибку розрахунку швидкості до прийнятних інженерних меж.

Розроблений програмний комплекс має суттєві технічні, економічні та експлуатаційні переваги порівняно з аналогами. Технічна перевага полягає в можливості багатооб'єктного супроводу та стійкості до оптичних завад (тіней, змін освітленості), де застарілі алгоритми аналізу виявляються неефективними. Економічний ефект досягається за рахунок адаптації програмного забезпечення під стандартні ЕОМ без необхідності закупівлі дорогих промислових GPU-прискорювачів та специфічних датчиків. Експлуатаційні переваги зумовлені високою надійністю, автоматичним відсіканням помилкових спрацювань за порогом точності та інтелектуальним придушенням дубльованих рамок, а також наявністю інтуїтивного інтерфейсу для оператора.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						80
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

Перспективи практичного застосування системи пов'язані з її інтеграцією в структуру муніципальних інтелектуальних транспортних систем для автоматизованого збору статистики про інтенсивність і склад потоків, оптимізації роботи світлофорів та моніторингу швидкісного режиму на магістралях. Для забезпечення безпечної експлуатації комплексу в роботі детально описано організаційні заходи з охорони праці та виробничої санітарії, включаючи використання захист класу IP66 для зовнішніх камер, організацію робочого місця з IPS-монітором, а також впровадження програмно-апаратного пожежного захисту обчислювального блоку через автоматичне зупинення обчислень при досягненні температури графічного процесора понад 90 °C.

Можливими шляхами подальшого вдосконалення об'єкта розробки є розширення його аналітичного функціоналу. Перспективним напрямом є додавання класифікації більшої кількості транспортних засобів (зараз над цим ведеться активна робота) шляхом донавчання існуючої нейромережі на власному датасеті [9,10], інтеграція додаткового нейромережевого модуля для автоматичного розпізнавання державних номерних знаків, впровадження алгоритмів фіксації дорожніх інцидентів (рух зустрічною смугою, зупинка під знаком, утворення заторів) у реальному часі, а також портування обчислювального ядра на полегшені архітектури сімейства YOLO Nano для запуску системи безпосередньо на компактних мікрокомп'ютерах всередині корпусів дорожніх камер. Отримані позитивні результати підтверджують високу технічну та комерційну доцільність продовження розвитку даного проєкту.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						81
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Турбал Ю. В., Кінда В. В. Аналіз пірамідального методу екстраполяції та моделей експоненційного згладжування для короткострокового прогнозу // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2020. Вип. 4 (92). С. 165–171.

2. Зімчук І. В., Шапар Т. М., Ковба М. В. Синтез алгоритмів фільтрації результатів вимірювань в системах навігації безпілотних літальних апаратів // Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. 2024. Iss. 96. pp. 21–27.

3. Системологія на транспорті: підручник: у 5 кн. Кн. II: Технологія наукових досліджень і технічної творчості / Е. В. Гаврилов, М. Ф. Дмитриченко, В. К. Доля та ін.; за заг. ред. М. Ф. Дмитриченка. – К.: Знання України, 2005. – 318 с.

4. Лугових О. О. Вибір оптимального значення коефіцієнта експоненціального згладжування для параметрів руху технологічного обладнання // Матеріали конференції Державного університету «Житомирська політехніка». – Житомир, 2024.

5. Лугових О. О., Васільєв А. І. Визначення параметрів руху транспортних засобів на основі відеозображень // Секція 6. Цифрова обробка сигналів та зображень. – ДУ «Житомирська політехніка», 2024.

6. Korobiichuk I., Podchashinskiy Y. Correlation mathematical model of video images with measuring information about geometrical parameters // 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). – 2021. – pp. 59–63.

7. Forsyth D. A., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. – 2nd Edition. – Pearson Education, Inc., 2012. – 793 p.

8. Bochkovski A., Wang C.-Y., Liao H.-Y. M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						82
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		

9. Розмітка даних в машинному навчанні: процес, різновиди та рекомендації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://habr.com/ru/articles/678524>.

10. Scaled YOLO v4 — самая лучшая нейронная сеть для выявления объектов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://habr.com/ru/articles/531786>.

11. OpenCV documentation. Official resource [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.opencv.org/>.

12. Flet framework: documentation. Build Flutter apps in Python [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://flet.dev/docs/>.

13. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII.

14. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «бакалавр» для спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / Розробники: Подчашинський Ю., Чепюк Л., Петросян Р. – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2022. – 63 с.

15. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.

16. ДСТУ EN 60529:2018. Ступені захисту, що забезпечуються кожухами (ІР-код).

17. Подчашинський Ю. О. Комп'ютеризовані вимірювальні системи: підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2011.

18. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer Science & Business Media, 2010.

19. Як нова система контролю швидкості рятує життя водіїв та пасажирів на дорогах ЄС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cedem.org.ua/analytics/nova-systema-kontrolyu-shvydkosti>.

20. Веб-камера Logitech BRIO 4K HDR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.logitech.com/en-us/products/webcams/brio-4k-hdr-webcam.html.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		83

21. Logitech BRIO: Посібник користувача та документація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: manuals.plus/m/2a5f59ff194f29b7130f5c9cfc2ebe3871dbd687efb7f5ee6a37a6d14948cf23.

22. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи електробезпеки. - Вид. 7-ме.

23. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин: затв. постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 №7.

24. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: затв. постановою Головного державного лікаря України від 10.12.1999 №42.

25. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. -Київ: Мінрегіон України, 2018.

26. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників (НАПБ Б.01.008-2018): затв. наказом МВС України від 15.01.2018 № 25.

					МММТ 480.004.004 – ПЗ	Арк.А
						84
Зм.Зм.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПід	Дата		