

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Едуард Артурович МУРАДЯН

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ
СВІТЛОФОРАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТРАНСПОРТНИХ
ПОТОКІВ/AUTOMATED ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL
SYSTEM BASED ON TRAFFIC FLOW ANALYSIS**

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота за ступенем вищої освіти "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Едуард МУРАДЯН

Науковий керівник:
к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

Дипломну роботу допущено до захисту:

" ____ " _____ 20__ р.

Завідувач кафедри

А.І.Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін

“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
МУРАДЯНУ Едуарду Артуровичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема роботи

Автоматизована система адаптивного керування світлофорами на основі аналізу транспортних потоків/Automated Adaptive Traffic Light Control System Based on Traffic Flow Analysis

керівник роботи _____ к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

затверджені наказом по університету від "01" грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої дипломної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Характеристики паркувального майданчика та параметри його функціонування
2. Вимоги до автоматичного визначення стану паркомісць у режимі реального часу.
3. Вимоги до реалізації алгоритму динамічного ціноутворення залежно від рівня завантаженості парковки.
4. Вимоги до вебінтерфейсу моніторингу та керування системою.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз сучасних методів керування транспортними потоками
2. Розроблення функціональної схеми адаптивного керування транспортними потоками
3. Математичне моделювання та дослідження адаптивної системи керування транспортними потоками

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна схема автоматизованої системи керування інтелектуальною парковкою.
2. Функціональна схема програмного забезпечення системи.
3. Вебінтерфейс моніторингу та керування парковкою.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Яцків Н.Г.		
2	Яцків Н.Г.		
3	Яцків Н.Г.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних методів керування транспортними потоками	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Розроблення функціональної схеми адаптивного керування транспортними потоками	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Математичне моделювання та дослідження адаптивної системи керування транспортними потоками	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

(підпис)

Е.А. Мурадян

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

АНОТАЦІЯ

Мурадян Е.А. Автоматизована система адаптивного керування світлофорами на основі аналізу транспортних потоків. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі розглянуто питання розроблення автоматизованої системи адаптивного керування світлофорами на основі аналізу транспортних потоків.

Розроблено структуру автоматизованої системи керування транспортними потоками, яка забезпечує збір, обробку, передачу та аналіз інформації про дорожню ситуацію. Проаналізовано основні методи аналізу транспортних потоків та обґрунтовано використання засобів комп'ютерного зору, алгоритмів прогнозування інтенсивності руху та адаптивного регулювання світлофорних фаз. Розроблено алгоритм адаптивного керування світлофорами залежно від поточного та прогнозованого транспортного навантаження.

Розроблено математичну модель системи та програмне забезпечення для моделювання процесів керування транспортними потоками у середовищі MATLAB/Simulink. Проведено дослідження ефективності роботи системи, які підтвердили можливість зменшення затримок транспортних засобів, скорочення довжини черг та підвищення пропускної здатності регульованих перехресть.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення ефективності функціонування міської транспортної інфраструктури, зменшення транспортних заторів та автоматизації процесів керування дорожнім рухом.

Ключові слова: транспортний потік, адаптивне керування, світлофорне регулювання, комп'ютерний зір, MATLAB/Simulink, прогнозування трафіку, інтелектуальна транспортна система, автоматизована система.

ABSTRACT

Muradian E.A. Automated Adaptive Traffic Light Control System Based on Traffic Flow Analysis. – Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The thesis addresses the development of an automated adaptive traffic light control system based on traffic flow analysis. An analysis of modern traffic management systems is carried out, and the feasibility of using intelligent algorithms for adaptive traffic control is substantiated.

A structure of the automated traffic flow control system is developed, which provides acquisition, processing, transmission and analysis of road traffic information. The main traffic flow analysis methods are investigated, and the use of computer vision tools, traffic intensity forecasting algorithms and adaptive traffic signal control methods is justified. An adaptive traffic light control algorithm based on current and predicted traffic load is developed.

A mathematical model of the system and software for simulation in the MATLAB/Simulink environment are developed. The efficiency of the proposed system is investigated, demonstrating the possibility of reducing vehicle delays, decreasing queue lengths and increasing the throughput of signalized intersections.

The practical significance of the work lies in the possibility of applying the developed system to improve the efficiency of urban transport infrastructure, reduce traffic congestion and automate traffic management processes.

Keywords: traffic flow, adaptive control, traffic light regulation, computer vision, MATLAB/Simulink, traffic forecasting, intelligent transportation system, automated system.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ.....	9
1.1 Аналіз сучасного стану систем керування дорожнім рухом.....	9
1.2. Методи аналізу транспортних потоків	12
1.3. Принципи адаптивного керування світлофорами.....	15
2 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ.....	19
2.1. Загальна структура системи адаптивного керування.....	19
2.2 Вибір технічних засобів автоматизації системи керування транспортними потокami.....	23
2.3. Розроблення функціональної схеми системи.....	29
2.4 Вибір технічних засобів реалізації системи.....	32
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ.....	40
3.1 Формалізація задачі керування транспортними потоками.....	40
3.2 Математичне моделювання системи адаптивного керування транспортними потокami.....	45
3.3 Розроблення алгоритму адаптивного керування транспортними потокami.....	48
3.4 Моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink.....	51
3.5 Дослідження ефективності системи адаптивного керування транспортними потокami.....	54
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
ДОДАТКИ	64

					ДП.АКІТ.10658582.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мурадян Е.А.			Автоматизована система адаптивного керування світлофорами на основі аналізу транспортних потоків/Automated Adaptive Traffic Light Control System Based on Traffic Flow Analysis	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Яцків Н.Г.					5	63
Консульт.		Яцків Н.Г.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42		
Н. Контр.								
Затверд.		Сегін А.І.						

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток міської інфраструктури та постійне зростання кількості транспортних засобів зумовлюють необхідність підвищення ефективності систем керування дорожнім рухом. Традиційні системи світлофорного регулювання, які функціонують за фіксованими часовими циклами, не забезпечують достатньої гнучкості в умовах змінної інтенсивності транспортних потоків, що призводить до виникнення заторів, збільшення часу очікування транспортних засобів та зниження пропускної здатності дорожньої мережі. Одним із перспективних напрямів удосконалення транспортної інфраструктури є впровадження інтелектуальних транспортних систем, які дозволяють здійснювати адаптивне керування дорожнім рухом на основі аналізу даних у реальному часі [2]. Використання відеоспостереження, сенсорних технологій, алгоритмів комп'ютерного зору та методів машинного навчання забезпечує можливість оперативного визначення параметрів транспортного потоку, прогнозування навантаження та автоматичного коригування режимів роботи світлофорних об'єктів [1].

Адаптивне керування транспортними потоками є актуальним завданням у сфері спеціалізованих комп'ютерних систем та кіберфізичних транспортних систем, оскільки дозволяє підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури, зменшити транспортні затримки, скоротити кількість заторів та знизити негативний вплив транспорту на навколишнє середовище. Крім того, використання сучасних алгоритмів штучного інтелекту та прогнозування забезпечує можливість реалізації самонавчальних систем керування, здатних адаптуватися до змін дорожньої ситуації.

Використання математичного моделювання та програмного середовища MATLAB/Simulink дозволяє здійснити дослідження динаміки транспортних потоків, оцінити ефективність алгоритмів адаптивного керування та виконати порівняльний аналіз із класичними методами регулювання. Це сприяє підвищенню наукової обґрунтованості рішень щодо впровадження інтелектуальних систем керування дорожнім рухом [13-15].

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У зв'язку з цим, розроблення та дослідження адаптивної системи керування транспортними потоками на основі аналізу транспортного навантаження, прогнозування інтенсивності руху та автоматичного регулювання параметрів світлофорного циклу є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності функціонування транспортної інфраструктури сучасного міста [5].

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розроблення та дослідження адаптивної системи керування транспортними потоками на основі аналізу транспортного навантаження, прогнозування інтенсивності руху та автоматичного регулювання параметрів світлофорного циклу із використанням сучасних алгоритмів комп'ютерного зору, методів машинного навчання та математичного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink [13].

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз сучасних систем керування дорожнім рухом та визначити їх основні недоліки;
- дослідити існуючі методи аналізу транспортних потоків і алгоритми адаптивного керування;
- розробити функціональну схему адаптивної системи керування транспортними потоками;
- сформулювати математичну модель транспортного потоку та світлофорного регулювання;
- розробити алгоритм адаптивного керування на основі прогнозування інтенсивності руху;
- реалізувати модель системи у середовищі MATLAB/Simulink;
- провести моделювання роботи системи при різних транспортних навантаженнях;
- виконати порівняльний аналіз адаптивного та фіксованого керування світлофорами;

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

– оцінити ефективність запропонованої системи за показниками затримок і пропускної здатності.

Об’єктом дослідження є процес керування транспортними потоками на регульованому перехресті.

Предметом дослідження є методи та засоби адаптивного керування транспортними потоками на основі аналізу транспортного навантаження та прогнозування дорожньої ситуації.

Практичне значення роботи. Розроблена адаптивна система керування транспортними потоками може бути використана для підвищення ефективності функціонування міської транспортної інфраструктури, зменшення затримок транспортних засобів, оптимізації роботи світлофорних об’єктів та покращення пропускної здатності перехресть. Використання алгоритмів прогнозування та адаптивного регулювання дозволяє забезпечити більш ефективне використання дорожньої мережі та зниження транспортного навантаження в умовах інтенсивного міського руху.

Апробація. Е. А. Мурадян, Л. В. Бабала Адаптивна система керування транспортними потоками на основі аналізу даних у реальному часі

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 20256), Тернопіль, 2026. – с.51-55.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ

1.1 Аналіз сучасного стану систем керування дорожнім рухом

Системи керування дорожнім рухом є невід’ємною складовою сучасної транспортної інфраструктури міст. Вони забезпечують регулювання потоків транспортних засобів і пішоходів, підвищення рівня безпеки, а також оптимізацію використання дорожньої мережі. У сучасних умовах зростання кількості автомобілів і ускладнення транспортних потоків особливого значення набуває ефективність систем керування світлофорами.

Існують два основні підходи до організації керування дорожнім рухом: традиційні (статичні) системи та інтелектуальні транспортні системи, що базуються на аналізі даних і адаптивному управлінні. Традиційні системи керування світлофорами функціонують за заздалегідь визначеними часовими циклами, які не змінюються залежно від реальної ситуації на дорозі [4]. Кожен сигнал (зелений, жовтий, червоний) має фіксовану тривалість, що задається під час налаштування системи. Такі системи широко використовуються завдяки своїй простоті та надійності. Вони не потребують складного обладнання чи обчислювальних ресурсів і можуть стабільно працювати протягом тривалого часу без значних змін у конфігурації. Однак основною проблемою традиційних систем є їхня негнучкість. Вони не враховують реальну інтенсивність руху, що призводить до неефективного використання часу світлофорного циклу [10].

Наприклад, на одній смузі може накопичуватися значна кількість автомобілів, тоді як інша залишається майже порожньою, але тривалість сигналів залишається незмінною. Це особливо помітно в години пік, коли виникають затори, збільшується час очікування та знижується пропускна здатність перехрестя.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

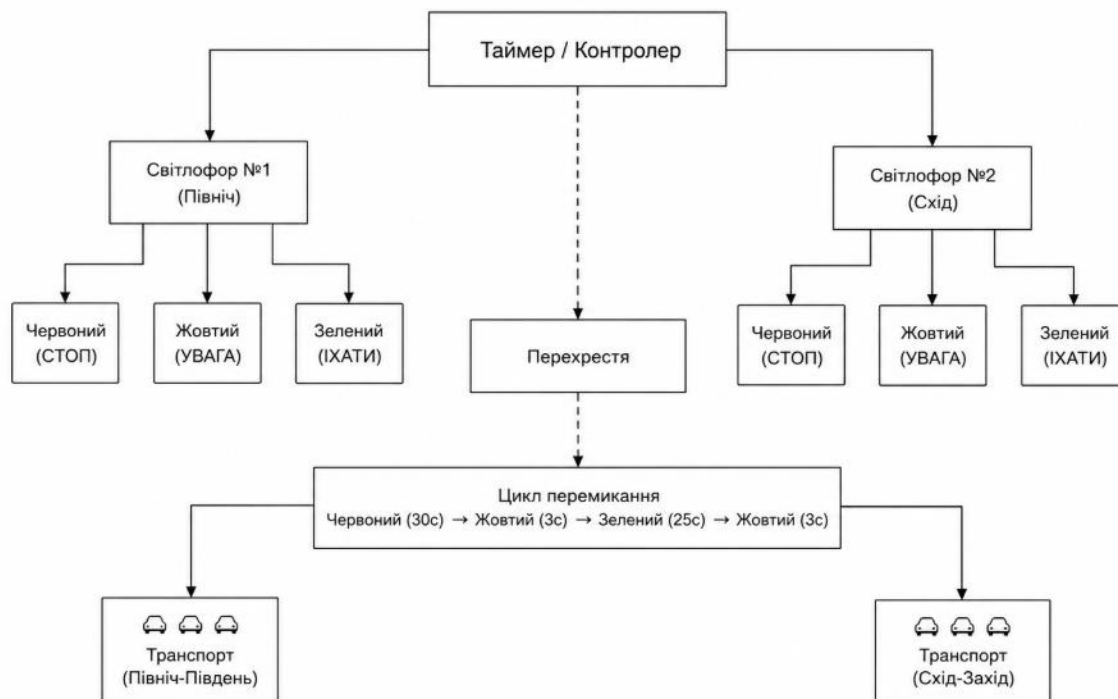


Рисунок 1.1 – Приклад роботи традиційної світлофорної системи

Інтелектуальні транспортні системи є сучасним підходом до керування дорожнім рухом, що базується на використанні інформаційних технологій, сенсорів та алгоритмів аналізу даних [8]. Основною особливістю таких систем є здатність адаптувати роботу світлофорів у режимі реального часу. ITS використовують різноманітні джерела даних, зокрема відеокамери, датчики руху, GPS-дані та інші сенсорні пристрої [12]. Отримана інформація обробляється за допомогою алгоритмів аналізу транспортних потоків, що дозволяє визначати інтенсивність руху, наявність заторів та інші параметри.

На основі цього аналізу система автоматично змінює тривалість сигналів світлофора, оптимізуючи рух транспорту. Наприклад, якщо на одному напрямку спостерігається більший потік автомобілів, система може збільшити тривалість зеленого сигналу саме для цього напрямку. Завдяки цьому досягається значне зменшення заторів, скорочення часу очікування та підвищення ефективності використання дорожньої інфраструктури. Разом з тим, такі системи потребують значних ресурсів для впровадження, включаючи сучасне обладнання, програмне забезпечення та технічне обслуговування.



Рисунок 1.2 – Структура інтелектуальної системи керування дорожнім рухом

Порівняння традиційних та інтелектуальних систем показує суттєву різницю у підходах до керування дорожнім рухом. Якщо традиційні системи працюють за фіксованими алгоритмами, то інтелектуальні системи використовують динамічні методи керування, що дозволяє значно підвищити ефективність регулювання транспортних потоків [6].

Інтелектуальні системи забезпечують гнучкість, адаптивність і можливість реагування на зміну дорожньої ситуації, тоді як традиційні системи залишаються статичними та менш ефективними в умовах сучасного міста.

Таблиця 1.1 – Порівняння систем керування дорожнім рухом

Критерій	Традиційні системи	Інтелектуальні системи
Тип керування	Фіксований	Адаптивний
Реакція на трафік	Відсутня	У реальному часі
Ефективність	Низька	Висока
Вартість	Низька	Висока
Складність	Низька	Висока

Отже, традиційні системи керування дорожнім рухом, незважаючи на свою простоту та надійність, не здатні ефективно реагувати на змінні транспортні потоки. Інтелектуальні транспортні системи, у свою чергу,

дозволяють значно підвищити ефективність регулювання дорожнього руху за рахунок адаптивного керування, що обґрунтовує необхідність їх подальшого розвитку та впровадження.

1.2 Методи аналізу транспортних потоків

Аналіз транспортних потоків є основою для ефективного керування дорожнім рухом. Він дозволяє оцінити інтенсивність руху, щільність транспортних засобів, швидкість потоку та інші параметри, необхідні для прийняття рішень щодо регулювання світлофорів.

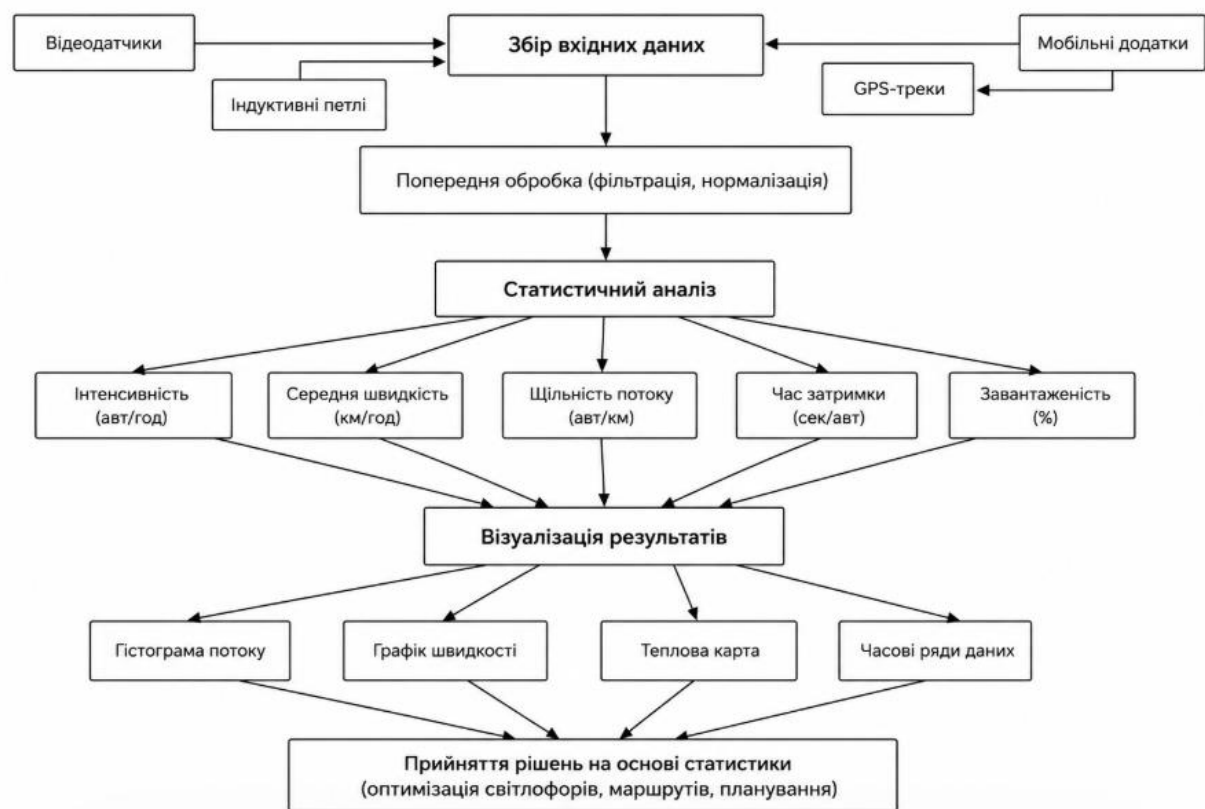


Рисунок 1.3 – Приклад статистичного аналізу транспортного потоку

Сучасні методи аналізу транспортних потоків можна поділити на кілька основних груп: статистичні методи, методи комп'ютерного зору та методи машинного навчання. Статистичні методи базуються на зборі та обробці даних про транспортні потоки за певний період часу. До таких методів належать

підрахунок кількості транспортних засобів, визначення середньої швидкості та інтенсивності руху (рис.1.3) [11].

Перевагою таких методів є простота реалізації та наочність результатів. Проте вони не дозволяють оперативно реагувати на зміни ситуації в реальному часі. Методи комп'ютерного зору використовують відеокамери для аналізу дорожньої ситуації. За допомогою алгоритмів обробки зображень визначається кількість транспортних засобів, їх швидкість і напрям руху (рис.1.4) [17].

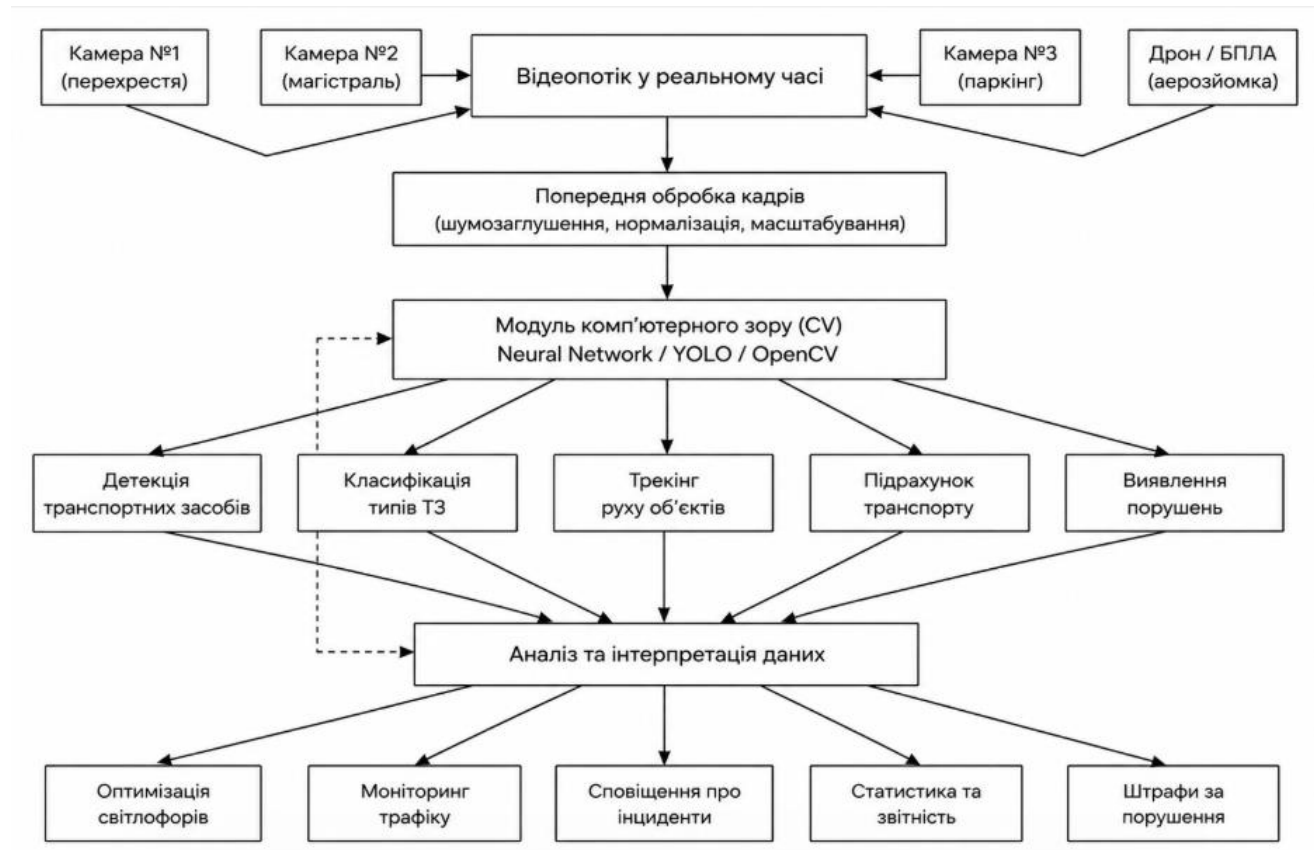


Рисунок 1.4 – Аналіз транспортного потоку за допомогою комп'ютерного зору

Ці методи дозволяють отримувати дані в реальному часі та мають високу точність. Однак вони потребують значних обчислювальних ресурсів і якісного обладнання. Методи машинного навчання застосовуються для прогнозування транспортних потоків і оптимізації керування світлофорами. Вони використовують великі обсяги даних для навчання моделей, які можуть передбачати зміну інтенсивності руху (рис.1.5) [10].

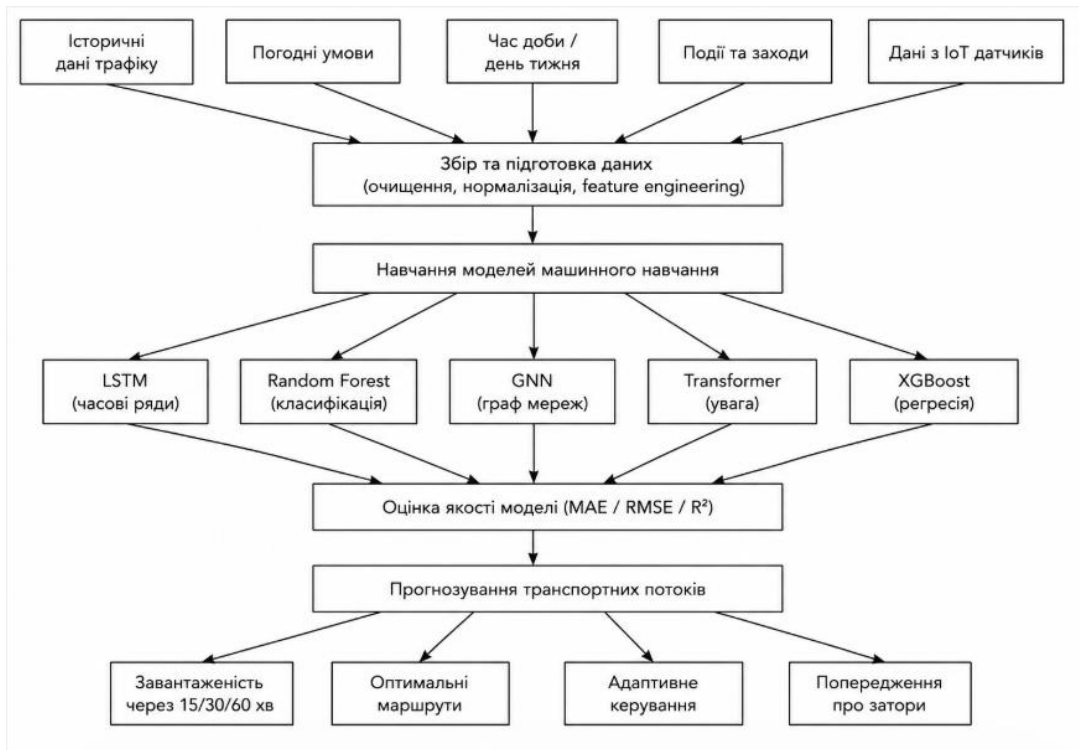


Рисунок 1.5 – Використання машинного навчання для прогнозування транспортних потоків

Такі методи є найбільш перспективними, оскільки дозволяють не лише аналізувати, а й прогнозувати дорожню ситуацію.

Таблиця 1.2 – Порівняння методів аналізу транспортних потоків

Метод	Переваги	Недоліки
Статистичні	Простота, наочність	Немає адаптивності
Комп’ютерний зір	Висока точність, реальний час	Висока вартість
Машинне навчання	Прогнозування, адаптивність	Складність реалізації

Отже, сучасні методи аналізу транспортних потоків забезпечують різний рівень точності та складності, причому найбільш ефективними є методи, що працюють у реальному часі та використовують інтелектуальні алгоритми [19].

1.3 Принципи адаптивного керування світлофорами

Адаптивне керування світлофорами є сучасним підходом до регулювання дорожнього руху, який базується на динамічній зміні режимів роботи світлофорів залежно від поточної транспортної ситуації. На відміну від традиційних систем із фіксованими часовими інтервалами, адаптивні системи враховують реальні параметри транспортного потоку, що дозволяє значно підвищити ефективність керування дорожнім рухом.

Актуальність впровадження таких систем підтверджується сучасними дослідженнями у сфері інтелектуальних транспортних систем. Зокрема, у роботах [1] показано, що використання адаптивного керування дозволяє зменшити середній час очікування на перехрестях до 30–40% порівняно з традиційними підходами. Крім того, дослідження [2] підтверджують ефективність застосування методів глибокого навчання для оптимізації світлофорного регулювання.

Основною метою адаптивного керування є мінімізація заторів, зменшення часу простою транспортних засобів та підвищення пропускної здатності дорожньої мережі. Досягнення цієї мети можливе завдяки постійному моніторингу транспортних потоків і оперативному реагуванню на зміни дорожньої ситуації.

Адаптивна система функціонує за принципом замкненого циклу керування. Вона отримує вхідні дані з різних джерел (камери відеоспостереження, датчики руху, GPS-дані), після чого здійснює їх обробку та аналіз [16]. На основі отриманої інформації система приймає рішення щодо зміни параметрів світлофорного циклу.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

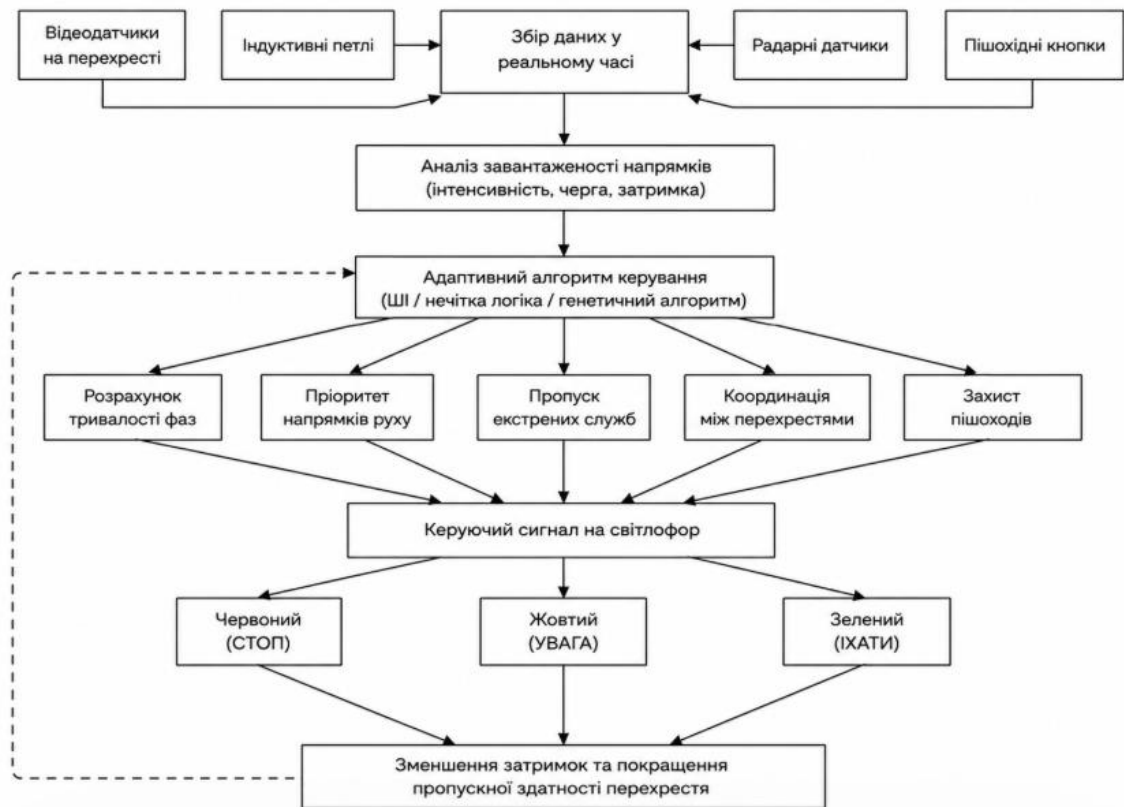


Рисунок 1.6 – Принцип роботи адаптивної системи керування світлофорами

Ключовими етапами роботи системи є:

- збір даних про транспортний потік;
- аналіз і обробка інформації;
- прийняття керуючого рішення;
- зміна тривалості сигналів світлофора;
- оцінка результатів та повторення циклу.

Такий підхід дозволяє реалізувати принцип зворотного зв'язку, що є характерним для сучасних автоматизованих систем керування.

Адаптивне керування світлофорами реалізується за допомогою різних алгоритмів оптимізації, які визначають ефективність системи. Серед них можна виділити:

- алгоритми мінімізації часу очікування, що спрямовані на скорочення затримок транспортних засобів;
- алгоритми балансування потоків, які забезпечують рівномірний розподіл транспортного навантаження між напрямками;

- прогностичні алгоритми, що використовують історичні дані для передбачення змін у транспортному потоці;
- алгоритми на основі штучного інтелекту, зокрема методи підкріплювального навчання (reinforcement learning), які дозволяють системі самостійно навчатися та покращувати свою роботу.

Сучасні дослідження [3] демонструють, що алгоритми підкріплювального навчання є найбільш ефективними для задач адаптивного керування світлофорами, оскільки вони здатні враховувати складну динаміку транспортних потоків.

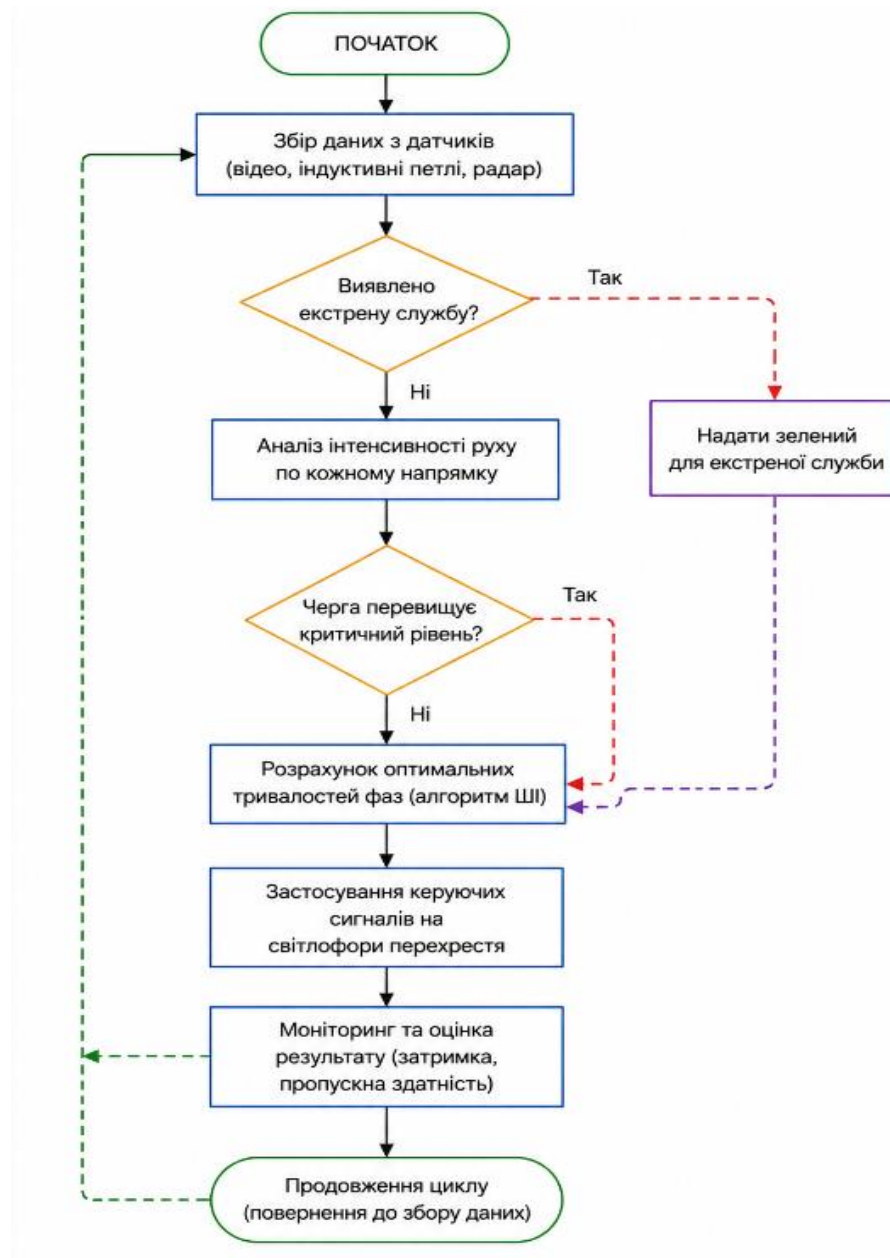


Рисунок 1.7 – Алгоритм адаптивного керування світлофорами

Адаптивні системи керування світлофорами мають ряд суттєвих переваг порівняно з традиційними системами. Вони дозволяють ефективно реагувати на зміну транспортної ситуації, що особливо важливо в умовах інтенсивного міського руху.

До основних переваг належать:

- зменшення заторів на перехрестях;
- скорочення часу очікування транспортних засобів;
- підвищення пропускної здатності дорожньої мережі;
- зниження рівня шкідливих викидів за рахунок зменшення простою транспорту.

Таблиця 1.3 – Переваги адаптивного керування

Показник	Традиційна система	Адаптивна система
Час очікування	Високий	Низький
Ефективність	Низька	Висока
Реакція на трафік	Відсутня	Є

Отже, адаптивне керування світлофорами є перспективним напрямом розвитку систем керування дорожнім рухом, який базується на використанні сучасних інформаційних технологій та інтелектуальних алгоритмів. Аналіз сучасних наукових досліджень підтверджує високу ефективність таких систем, що обґрунтовує їх доцільність для впровадження в умовах сучасних міст.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ

2.1. Загальна структура системи адаптивного керування

Система керування дорожнім рухом є складною спеціалізованою комп'ютерною системою, що функціонує у режимі реального часу та забезпечує збір, обробку й аналіз інформації про транспортні потоки з метою формування ефективних керуючих впливів. В умовах сучасного міста особливого значення набуває використання адаптивних алгоритмів, які дозволяють змінювати режими роботи світлофорів залежно від поточної ситуації на дорозі. Архітектура запропонованої системи є ієрархічною та включає три основні рівні: сенсорний, аналітичний та керуючий (рисунок 2.1) [6, 8, 11].

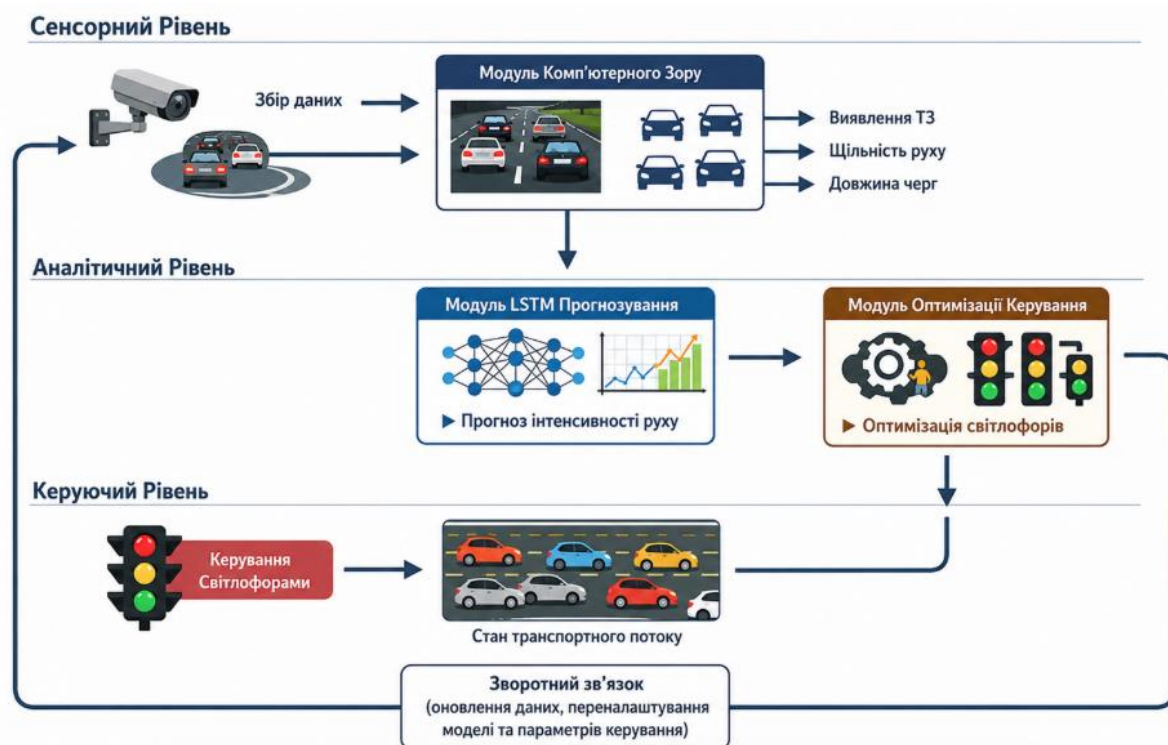


Рисунок 2.1 – Архітектура адаптивної системи керування дорожнім рухом

На сенсорному рівні здійснюється збір первинної інформації про транспортний потік. Для цього використовуються відеокамери, які передають

					ДП.АКТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

дані до модуля комп'ютерного зору. Даний модуль виконує обробку зображень та визначає основні параметри руху, зокрема кількість транспортних засобів, щільність потоку та довжину черг на перехресті. Більш детальний опис взаємодії функціональних блоків системи наведено у додатку А.

Аналітичний рівень забезпечує інтелектуальну обробку отриманих даних. У його складі функціонує модуль прогнозування на основі нейронних мереж типу LSTM, який дозволяє оцінити майбутню інтенсивність транспортного потоку. Отримані прогнозні значення передаються до модуля оптимізації керування, що визначає оптимальні параметри світлофорного циклу. Таким чином забезпечується адаптація системи до змін дорожньої ситуації у режимі реального часу.

Керуючий рівень реалізує безпосередній вплив на об'єкт керування – транспортний потік. На цьому рівні формується сигнал керування світлофорами, який змінює тривалість фаз (зелений, жовтий, червоний) залежно від розрахованих параметрів. Результатом роботи системи є зміна стану транспортного потоку, що знову фіксується сенсорами.

Важливою особливістю архітектури є наявність зворотного зв'язку, який забезпечує замкнений цикл керування. Це дозволяє системі постійно коригувати свої дії відповідно до актуального стану дорожнього руху.

Таблиця 2.1 – Характеристика рівнів системи

Рівень системи	Основні модулі	Функції
Сенсорний	Камери, модуль комп'ютерного зору	Збір і первинний аналіз даних
Аналітичний	LSTM-прогнозування, оптимізація	Прогноз та прийняття рішень
Керуючий	Світлофорні контролери	Реалізація керуючих впливів

Отже, запропонована архітектура поєднує сучасні методи комп'ютерного зору та машинного навчання з класичними підходами автоматичного керування. Це дозволяє підвищити ефективність функціонування транспортної

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

системи, зменшити затори та забезпечити більш раціональне використання дорожньої інфраструктури. Побудова ефективної системи адаптивного керування транспортними потоками потребує детального аналізу її структурних елементів, параметрів сигналів та інформаційної взаємодії між окремими модулями. З огляду на це, доцільно формалізувати основні характеристики системи у вигляді узагальненої таблиці, яка відображає ключові компоненти, їх параметри та функціональне призначення [22].

У таблиці 2.2 наведено характеристику основних елементів системи, включаючи датчики, обчислювальні модулі, контролери, а також описано взаємодію між ними та інформаційні потоки, що циркулюють у системі.

Таблиця 2.2 – Параметри сигналів у системі адаптивного керування

№	Назва сигналу	Позначення	Тип сигналу	Одиниці вимірювання	Діапазон значень	Джерело	Призначення
1	Інтенсивність руху	q	Вхідний	авто/год	0–3000	Модуль зору	Оцінка навантаження дороги
2	Щільність потоку	ρ	Вхідний	авто/км	0–200	Модуль зору	Аналіз завантаженості
3	Довжина черги	L	Вхідний	м	0–500	Модуль зору	Визначення заторів
4	Швидкість руху	v	Вхідний	км/год	0–120	Сенсори	Додатковий параметр стану
5	Прогноз інтенсивності	q_{pred}	Проміжний	авто/год	0–3000	LSTM	Прогноз майбутнього стану
6	Оптимальний час зеленого сигналу	t_g	Вихідний	с	10–120	Оптимізатор	Керування світлофором
7	Час жовтого сигналу	t_y	Вихідний	с	3–5	Контролер	Перехідний режим
8	Час червоного сигналу	t_r	Вихідний	с	10–120	Контролер	Забезпечення безпеки
9	Керуючий сигнал	$u(t)$	Вихідний	-	0/1	Контролер	Вмикання фаз
10	Стан потоку	S	Зворотний	-	0–1	Сенсори	Оцінка ефективності

Параметри сигналів, які використовуються в процесі функціонування

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

системи, мають вирішальне значення для забезпечення ефективного керування транспортними потоками. Вони визначають як вхідні дані для аналізу, так і вихідні керуючі впливи на об'єкт керування. З метою їх систематизації та подальшого використання у розрахунках, у таблиці 2.2 наведено основні сигнали системи, їх характеристики та діапазони зміни [20].

Для наочного представлення структури системи, взаємозв'язків між її елементами та напрямків передачі інформаційних потоків доцільно використати функціональну блок-схему. Така схема дозволяє відобразити принцип роботи системи у вигляді замкненого контуру керування з урахуванням зворотного зв'язку. Функціональна схема адаптивної системи керування транспортними потоками наведена на рисунку 2.2.

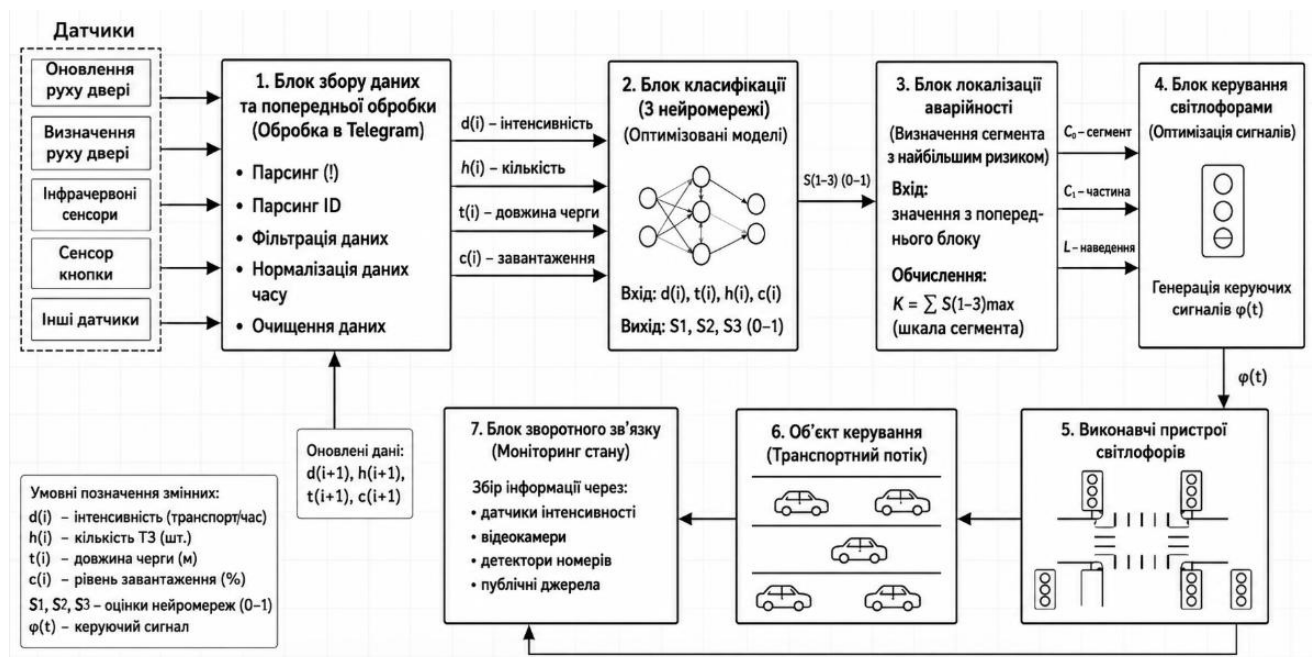


Рисунок 2.2 - Функціональна схема адаптивної системи керування транспортними потоками

Функціональна схема (рис.2.2) будується за принципом замкненого контуру керування та включає такі основні блоки:

- Блок збору даних: формує вхідні сигнали q , ρ , L , v на основі інформації з камер та сенсорів.
- Блок комп'ютерного зору: виконує обробку відеопотоку та виділення параметрів транспортного потоку.

- Блок прогнозування (LSTM): формує прогноз q_{pred} , який використовується для адаптивного керування.
- Блок оптимізації: обчислює оптимальні значення t_g , t_y , t_r на основі поточних і прогнозних даних.
- Блок керування світлофорами: генерує керуючий сигнал $u(t)$, який визначає режими роботи світлофорів.
- Об'єкт керування (транспортний потік): реагує на зміну сигналів світлофора.
- Зворотний зв'язок: забезпечує передачу інформації про новий стан системи для корекції керування.

2.2 Вибір технічних засобів автоматизації системи керування транспортними потоками

Вибір технічних засобів автоматизації є одним із ключових етапів розроблення системи адаптивного керування транспортними потоками, оскільки саме апаратно-програмна база визначає її ефективність, швидкодію, надійність та можливість інтеграції у сучасну інтелектуальну транспортну інфраструктуру.

Запропонована система реалізується як розподілена комп'ютерно-інтегрована система реального часу, що включає сенсорний рівень, рівень обробки даних (edge computing), рівень керування та рівень диспетчеризації. Вибір технічних засобів здійснюється з урахуванням вимог до систем автоматизації, а саме: детермінованість обробки, мінімальні затримки передачі даних, підтримка стандартних протоколів зв'язку, масштабованість та відмовостійкість.

Для забезпечення ефективного функціонування системи необхідно реалізувати надійний та інформативний механізм збору даних про транспортні потоки. Основними джерелами інформації є відеокамери, індукційні датчики, радарні сенсори та GPS-дані.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.4 – Порівняльні характеристики засобів збору даних [16-22]

Тип пристрою	Модель	Інтерфейс	Точність	Умови роботи	Переваги	Недоліки
IP-камера	Hikvision DS-2CD2043G2-I	Ethernet, RTSP/ONVIF	Висока	Усі погодні умови	Комп'ютерний зір	Високе навантаження
IP-камера (AI)	Dahua WizMind	Ethernet	Дуже висока	Усі умови	Вбудована аналітика	Вартість
Індукційний датчик	Loop detector	DI	Дуже висока	Обмежено	Надійність	Монтаж складний
Радарний датчик	RTMS	RS-485	Висока	Погана погода	Безконтактний	Менша точність
GPS	GNSS	TCP/IP	Середня	Залежить від сигналу	Глобальність	Затримки

Найбільш доцільним є використання IP-камер як основного джерела даних, оскільки вони забезпечують найбільш повну інформацію про транспортний потік. Інші сенсори використовуються як допоміжні для підвищення надійності системи. У порівнянні з альтернативами, відеоаналітика дозволяє отримувати значно більше параметрів без додаткового обладнання.

Обробка даних у системі здійснюється на edge-пристроях, що дозволяє зменшити затримки та підвищити швидкість системи.

Таблиця 2.5 – Порівняльні характеристики обчислювальних платформ [27-28]

Платформа	Архітектура	Продуктивність	Енерго-споживання	Підтримка AI	Призначення
Jetson Nano	CPU+GPU	Низька	Низьке	Так	Прототип
Jetson Xavier NX	CPU+GPU	Висока	Середнє	Так	Реальний час
ПК (CPU)	CPU	Середня	Високе	Обмежена	Сервер
ПК (CPU+GPU)	CPU+GPU	Дуже висока	Високе	Так	Централізована система

Для реалізації системи оптимальним є використання NVIDIA Jetson Xavier NX, оскільки дана платформа забезпечує достатню обчислювальну потужність для обробки відеопотоку та виконання алгоритмів машинного навчання у реальному часі при помірному енергоспоживанні. У порівнянні з

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПК, edge-платформи значно зменшують затримки передачі даних. Керування світлофорними об'єктами здійснюється за допомогою програмованих логічних контролерів.

Таблиця 2.6 – Порівняльні характеристики контролерів [21-23]

Контролер	Тип	Час циклу	Протоколи	Надійність	Призначення
Siemens S7-1200	ПЛК	1–10 мс	Profinet, Modbus TCP	Висока	Промислове керування
ОВЕН ПЛК110	ПЛК	10–20 мс	Modbus	Висока	Локальні системи
Arduino	МК	>10 мс	UART	Низька	Прототип
ESP32	МК	5–10 мс	Wi-Fi	Середня	ІоТ

Для промислового використання доцільно застосовувати Siemens S7-1200, оскільки він забезпечує детермінований час виконання програм, підтримку промислових протоколів та високу надійність. Мікроконтролери не відповідають вимогам систем автоматизації.

SCADA-система забезпечує диспетчеризацію, моніторинг та візуалізацію процесів. TRACE MODE використовується як програмно-апаратний компонент системи керування транспортними потоками для збору, обробки, візуалізації та диспетчерського керування інформацією, що надходить від технічних засобів автоматизації [16]. У складі СКС TRACE MODE забезпечує інтеграцію зі світлофорними контролерами, GPS/GNSS-трекерами, транспортними детекторами, ІР-камерами відеоспостереження та сенсорами дорожнього руху через стандартні мережеві протоколи TCP/IP, OPC, Modbus TCP/RTU, MQTT та SNMP.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

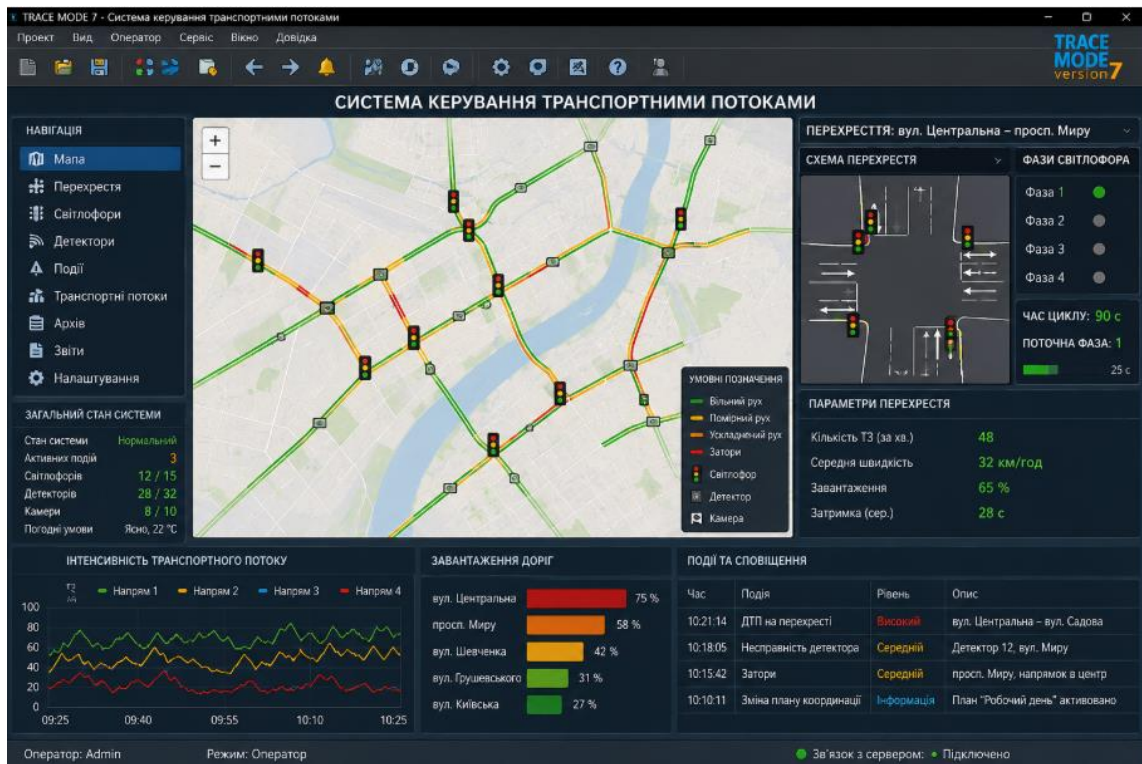


Рисунок 2.3 – Інтерфейс SCADA-системи TRACE MODE для візуалізації та керування транспортними потоками

Система підтримує роботу в локальних і розподілених мережах із передачею даних через Ethernet 10/100/1000 Мбіт/с, 4G/5G або VPN-з'єднання, що забезпечує оперативний моніторинг у режимі реального часу. Апаратна частина серверного вузла SCADA-системи реалізується на базі промислової або серверної ЕОМ, що забезпечує стабільну обробку телеметричних даних, візуалізацію параметрів транспортних потоків та централізоване диспетчерське керування. Основні технічні характеристики SCADA-системи TRACE MODE, що використовується у складі системи керування транспортними потоками, наведено в таблиці 2.7 [16].

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики SCADA-системи TRACE MODE у складі системи керування транспортними потоками

Параметр	Характеристика
Найменування системи	TRACE MODE 7 SCADA/HMI
Призначення	Моніторинг, диспетчеризація та керування транспортними потоками
Тип системи	SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)
Режим роботи	Реальний час (Real-Time)
Підтримка протоколів	OPC, Modbus TCP/RTU, MQTT, TCP/IP, SNMP
Інтерфейси зв'язку	Ethernet 10/100/1000 Mbps, RS-485, RS-232
Підключені пристрої	Світлофорні контролери, транспортні датчики, відеокамери, GPS/GNSS трекери
Візуалізація даних	Карта дорожньої мережі, графіки, журнали подій, панель оператора
Функції моніторингу	Контроль інтенсивності руху, стану світлофорів, рівня завантаження доріг
Функції керування	Адаптивне регулювання світлофорних фаз, диспетчерське керування
Архівування даних	Підтримується
Тривожні повідомлення	Автоматичне виявлення аварій та подій
Кількість операторських робочих місць	Багатокористувацький режим
Операційна система	Windows 10 / Windows Server
Мінімальний процесор	Intel Core i5 / Xeon
Оперативна пам'ять	8–16 GB RAM
Накопичувач	SSD від 256 GB
Канали зв'язку	LAN, VPN, 4G/5G
Температурний режим роботи	від +5°C до +40°C (серверне обладнання)

У складі SCADA-системи TRACE MODE для керування транспортними потоками використовується комплекс апаратних засобів, призначених для збору, передачі та обробки інформації про стан дорожнього руху в режимі реального часу. До складу системи входять відеокамери транспортного моніторингу, радарні датчики руху, індуктивні петлі, GPS/GNSS-трекери, світлофорні контролери та серверне обладнання диспетчерського центру. Зібрана інформація передається через дротові та бездротові канали зв'язку до центрального серверного вузла, де здійснюється її аналіз, прогнозування транспортної інтенсивності та формування керуючих сигналів для світлофорних об'єктів [16].

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для відеомоніторингу транспортної ситуації доцільно використовувати ІР-камери Hikvision DS-2CD2646G2-IZS [17], які забезпечують роздільну здатність 4 МП, підтримують нічне бачення до 60 м, технологію WDR 120 dB та передачу відеопотоку через Ethernet RJ-45. Для виявлення транспортних засобів застосовуються радарні датчики RTMS Sx-300, здатні визначати інтенсивність руху, швидкість транспортного потоку та рівень завантаження смуг у режимі реального часу.

Контроль наявності автомобілів на окремих смугах реалізується за допомогою індуктивних петель Reno A&E, які монтуються у дорожнє покриття та використовуються для фіксації присутності транспортних засобів перед перехрестям. Для передачі координат службового або громадського транспорту використовується GPS/GNSS-трекер Teltonika FMC920, що підтримує супутникові системи GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou та передачу даних через 4G LTE.

Керування світлофорними фазами здійснюється за допомогою дорожнього контролера Swarco ITC-3, який підтримує адаптивне керування, синхронізацію між перехрестями та інтеграцію із SCADA через промислові протоколи зв'язку. Центральний серверний вузол реалізується на базі серверної станції з процесором Intel Xeon, оперативною пам'яттю 16 GB RAM, SSD-накопичувачем 512 GB та мережевими інтерфейсами Gigabit Ethernet, що забезпечує безперервну роботу системи в режимі 24/7 [18].

Таблиця 2.8 – Апаратні засоби SCADA-системи керування транспортними потоками

Обладнання	Модель	Основні характеристики	Призначення
Відеокамера	Hikvision DS-2CD2646G2-IZS	4 МП, IR 60 м, PoE, WDR 120 dB	Відеомоніторинг транспорту
Радарний датчик	RTMS Sx-300	Вимір швидкості, щільності, інтенсивності потоку	Аналіз транспортного потоку
Індуктивна петля	Reno A&E	Детекція наявності ТЗ	Контроль смуги руху
GPS/GNSS трекер	Teltonika FMC920	GPS/GLONASS, LTE, Bluetooth	Моніторинг транспорту
Світлофорний контролер	Swarco ITC-3	Адаптивне керування фазами	Керування світлофорами

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Обладнання	Модель	Основні характеристики	Призначення
Сервер SCADA	Dell PowerEdge / Intel Xeon	16 GB RAM, SSD 512 GB	Обробка даних TRACE MODE
Комутатор мережі	Cisco CBS250	Gigabit Ethernet	Передача даних

2.3. Розроблення функціональної схеми системи

Функціональна схема системи реалізована у середовищі Simulink та відображає роботу адаптивної системи керування транспортними потоками у вигляді послідовно з'єднаних блоків із зворотним зв'язком. Кожен блок відповідає окремій функціональній підсистемі та реалізується на відповідній апаратній або програмній платформі.

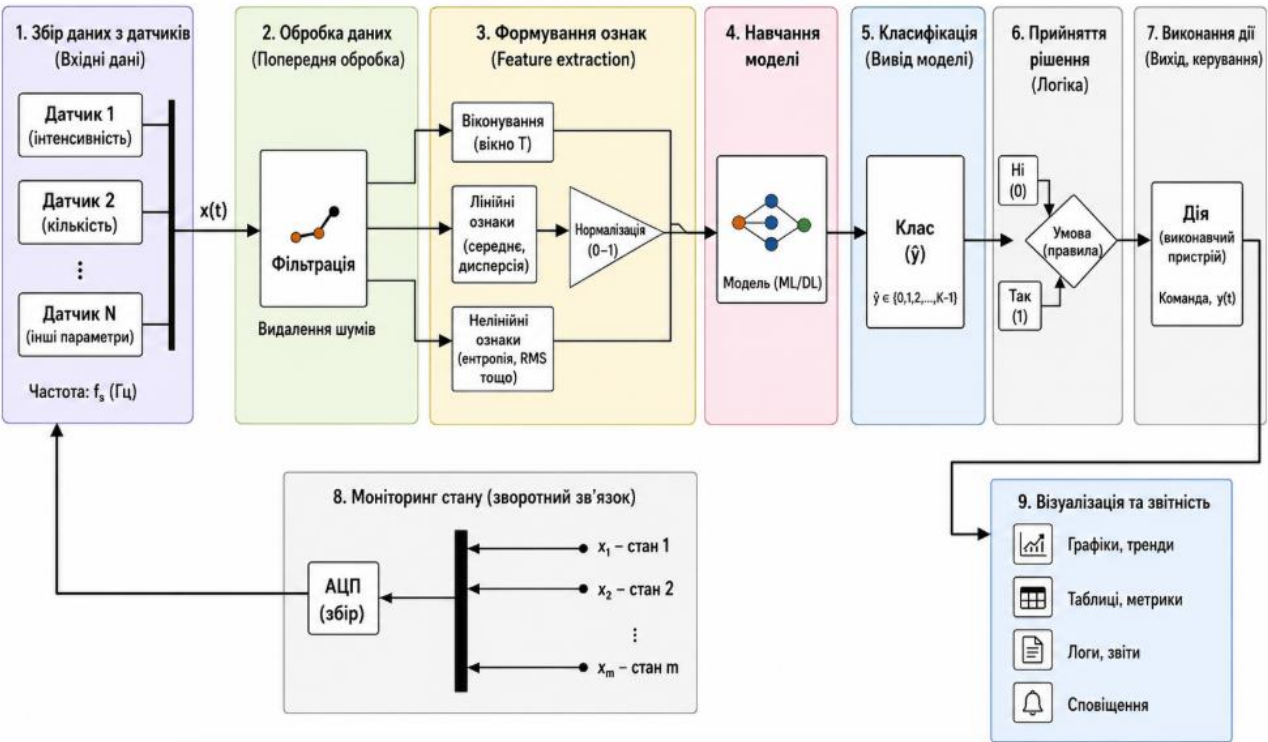


Рисунок 2.2 – Схема адаптивної системи керування транспортними потоками

Представлення системи у вигляді моделі забезпечує можливість аналізу її поведінки, дослідження динамічних характеристик та перевірки ефективності алгоритмів керування. З точки зору спеціалізованих комп'ютерних систем, кожен блок моделі відповідає окремому апаратному або програмному модулю,

який реалізується на відповідній обчислювальній платформі або пристрої автоматизації. При цьому важливим є визначення вхідних і вихідних сигналів кожного блоку, їх форматів, а також способів взаємодії між компонентами системи.

Для систематизації отриманої структури та забезпечення можливості подальшого технічного аналізу доцільно подати характеристику функціональних блоків системи у вигляді таблиці, в якій наведено їх призначення, сигнали та засоби реалізації. Характеристика основних блоків адаптивної системи керування транспортними потоками наведена у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Характеристика блоків системи та їх реалізація

№	Блок	Вхідні сигнали	Вихідні сигнали	Реалізація (плата/ПЗ)	Функція
1	Вхідні сигнали (Sensors)	Фізичні параметри	q, ρ, v, L	IP-камери, сенсори	Збір даних
2	Обробка (Computer Vision)	Відео	Параметри потоку	NVIDIA Jetson / ПК	Детекція ТЗ
3	Прогнозування (LSTM)	q, ρ	q_{pred}	Jetson / Python (TensorFlow)	Прогноз
4	Оптимізація	q, q_{pred}	t_q, t_r	MATLAB / Edge CPU	Оптимізація
5	Контролер	t_q, t_r	$u(t)$	Siemens S7-1200	Керування
6	Світлофор	$u(t)$	Сигнали	Світлофорний модуль	Виконання
7	Транспортний потік	Сигнали світлофора	$q(k+1)$	Математична модель	Динаміка
8	Зворотний зв'язок	Стан системи	$X(k+1)$	Сенсори	Оцінка
9	Візуалізація	Дані	Графіки	SCADA / Scope	Моніторинг

Детальний опис роботи блоків

1. Блок вхідних сигналів (Sensors): реалізується за допомогою відеокамер та сенсорів, які формують первинні сигнали про стан транспортного потоку. Дані передаються через інтерфейси Ethernet або RS-485 у цифровому вигляді.

2. Блок обробки даних (Computer Vision): виконує обробку відеопотоку на платформі NVIDIA Jetson або ПК. Використовуються алгоритми комп'ютерного зору (OpenCV, CNN), які забезпечують визначення параметрів:

- інтенсивність руху q ;

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- щільність ρ ;
- швидкість v ;
- довжина черги L .

3. Блок прогнозування (LSTM): реалізує прогнозування інтенсивності руху на основі часових рядів. Використовується нейронна мережа типу LSTM, що працює на edge-платформі або сервері.

4. Блок оптимізації: виконує розрахунок оптимальних параметрів світлофорного циклу:

- t_g – тривалість зеленого сигналу;
- t_r – тривалість червоного сигналу.

Реалізується у вигляді MATLAB Function або алгоритму на CPU.

5. Блок контролера (PLC): реалізується на програмованому логічному контролері (Siemens S7-1200). Забезпечує формування керуючого сигналу:

$$u(t) \in \{0,1\} \quad (2.1)$$

та передає його на виконавчі пристрої.

6. Блок світлофора (Actuator): виконує фізичну реалізацію керуючих сигналів шляхом перемикання фаз світлофора (зелений, жовтий, червоний).

7. Блок транспортного потоку (Plant): описує динаміку транспортного потоку. У моделі представлений як передавальна функція або інтеграційна система.

8. Блок зворотного зв'язку: забезпечує передачу оновлених параметрів транспортного потоку до системи, що дозволяє реалізувати адаптивне керування.

9. Блок візуалізації (SCADA/Score): використовується для моніторингу:

- параметрів потоку;
- керуючих сигналів;
- стану системи.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Отже, кожен блок моделі має відповідність до апаратних або програмних засобів, що дозволяє використовувати її як основу для подальшого моделювання та впровадження.

2.4 Вибір технічних засобів реалізації системи

Розроблена функціональна схема адаптивної системи керування транспортними потоками (підпункт 2.3) визначає вимоги до апаратного та програмного забезпечення, необхідного для її реалізації. Вибір технічних засобів здійснюється з урахуванням необхідності забезпечення роботи системи у режимі реального часу, високої надійності, масштабованості та сумісності між окремими компонентами. Система реалізується як комп'ютерно-інтегрована система, що включає сенсорний рівень, обчислювальний рівень (edge processing), рівень керування та рівень диспетчеризації.

Апаратна частина системи забезпечує збір даних, їх обробку та реалізацію керуючих впливів. До її складу входять датчики, обчислювальні модулі та контролери. Використання IP-камер як основного джерела даних забезпечує максимальну інформативність, тоді як індукційні та радарні сенсори підвищують точність і надійність системи. Для обробки даних доцільно застосовувати edge-платформи, що зменшують затримки. Контролери класу PLC забезпечують детермінованість та відповідність вимогам систем автоматизації (рисунок 2.3).

Для забезпечення ефективного функціонування системи моніторингу транспортного потоку необхідним є використання комплексу апаратних засобів, які забезпечують збір, передачу, обробку та аналіз інформації про дорожню ситуацію в режимі реального часу. До складу системи входять IP-камери відеоспостереження, індукційні датчики, радарні сенсори RTMS, GPS/GNSS-модулі та модуль збору даних. Кожен елемент виконує окрему функцію у процесі формування параметрів транспортного потоку та

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

інтегрується у єдину інформаційно-комунікаційну систему. Технічні характеристики основних компонентів системи наведено в таблиці 2.6 [16-22].

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики елементів системи моніторингу транспортного потоку

Компонент системи	Призначення	Основні технічні характеристики	Інтерфейси / Протоколи
ІР-камера (відеокамера)	Моніторинг транспортного потоку, детекція ТЗ, підрахунок авто, оцінка черг	Роздільна здатність 4–8 Мп; частота кадрів 25–30 fps; сенсор CMOS; об'єктив 2.8–12 мм; кут огляду 90–120°; ІЧ-підсвітка 50–80 м; компресія H.264/H.265; захист IP66/IP67; температура –30°C...+60°C; живлення PoE/12 В DC	Ethernet (RJ-45), RTSP, TCP/IP, HTTP/HTTPS, ONVIF
Контролер збору даних (Data Acquisition Unit)	Централізований збір, обробка та передача даних від сенсорів	Процесор ARM Cortex / Intel Atom; RAM 4–8 ГБ; пам'ять 32–128 ГБ SSD/eMMC; живлення 12–24 В DC; робоча температура –20°C...+70°C; локальна аналітика, агрегація та фільтрація даних	Ethernet, RS-485, DI/DO, USB, 4G/5G; Modbus RTU/TCP, MQTT, HTTP/HTTPS
Індукційні датчики (петлеві сенсори)	Виявлення транспортних засобів та підрахунок інтенсивності руху	Монтаж у дорожнє покриття; напруга 12–24 В DC; точність 98–99%; час реакції до 10 мс; ресурс >10 років; температура –40°C...+70°C	DI (дискретний сигнал)
Радарні сенсори (RTMS)	Вимірювання швидкості, щільності та інтенсивності транспортного потоку	Частота 24/77 ГГц; дальність до 250 м; точність швидкості ±1 км/год; контроль до 8 смуг; захист IP67; температура –40°C...+75°C	RS-485 (Modbus)
GPS/GNSS-модуль	Отримання координат, швидкості та траєкторії руху ТЗ	Підтримка GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou; точність позиціювання 1–3 м; оновлення 1–10 Гц; точність швидкості ±0.1 км/год	4G/5G (UDP/TCP)
Мережеве обладнання (СКС)	Передача даних між пристроями системи	Комутатори Gigabit Ethernet; підтримка PoE IEEE 802.3af/at; кабель UTP Cat.5e/Cat.6; захист від перенапруг	Ethernet 10/100/1000 Mbps

На основі отриманих даних від сенсорів система формує ключові параметри транспортного потоку, які використовуються для оцінювання стану дорожньої мережі, визначення рівня завантаженості та прийняття рішень щодо

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

адаптивного керування рухом транспорту. Основні параметри транспортного потоку наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Вихідні параметри транспортного потоку

Позначення	Параметр	Одиниця вимірювання	Призначення
q	Інтенсивність руху	авто/год	Кількість транспортних засобів за одиницю часу
ρ	Щільність потоку	авто/км	Кількість транспортних засобів на одиницю довжини дороги
v	Середня швидкість	км/год	Усереднена швидкість транспортного потоку
L	Довжина черги	м	Оцінка затору або накопичення транспорту

Таким чином, використання комплексу сенсорних пристроїв та централізованого модуля збору даних дозволяє забезпечити високий рівень точності моніторингу транспортної ситуації. Отримані параметри можуть бути використані для прогнозування транспортних навантажень, виявлення заторів та адаптивного регулювання транспортних потоків у межах інтелектуальної транспортної системи.

У запропонованій системі адаптивного керування транспортними потоками використовується комбінований підхід збору даних, який включає відеокамери, індукційні датчики, радарні сенсори та GPS/GNSS джерела [18]. Кожен тип датчиків формує сигнали різного типу та забезпечує отримання окремих параметрів транспортного потоку.

1. Відеокамери є основним джерелом інформації в системі та працюють у режимі безперервної передачі відеопотоку через мережевий інтерфейс Ethernet із використанням протоколів RTSP/ONVIF [17]. Функціональну схему роботи IP-камер наведено у додатку А1.

У якості основного засобу відеомоніторингу транспортного потоку доцільно використовувати IP-камеру Hikvision DS-2CD2043G2-I [17], яка належить до класу мережевих камер професійного рівня та підтримує передачу відеопотоку через Ethernet із використанням протоколів RTSP та ONVIF.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Обрана модель забезпечує роздільну здатність 4 Мп, що є достатнім для задач детекції транспортних засобів, оцінки щільності потоку, визначення довжини черг і класифікації автомобілів у режимі реального часу. Камера підтримує сучасний формат компресії H.265/H.265+, що дозволяє знизити навантаження на мережу передачі даних та зменшити вимоги до обсягу сховища відеоінформації.



Рисунок 2.5 – IP-камера Hikvision DS-2CD2043G2-I [17]

Вибір камери Hikvision DS-2CD2043G2-I обумовлений оптимальним співвідношенням функціональних можливостей, вартості та сумісності з інтелектуальними транспортними системами [17]. На відміну від базових 2 Мп камер, дана модель забезпечує достатню деталізацію для коректної роботи алгоритмів комп'ютерного зору та розпізнавання транспортних засобів. Підтримка протоколів RTSP і ONVIF забезпечує просту інтеграцію в структуру системи збору даних, а підтримка PoE дозволяє спростити побудову структурованої кабельної системи за рахунок передачі живлення та даних одним кабелем Ethernet. Крім того, захист корпусу класу IP67 дозволяє експлуатувати пристрій у складних погодних умовах, що є важливим для зовнішніх транспортних вузлів. Індукційні датчики встановлюються у дорожньому покритті та працюють на основі зміни електромагнітного поля, що виникає при наявності транспортного засобу над індукційною петлею [18]. Принцип роботи та структурну схему датчика наведено в Додатку А2.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для забезпечення високої точності виявлення транспортних засобів у системі моніторингу транспортного потоку використовується індукційний петлевий детектор. Функціональна структура детектора включає підсилення, фільтрацію, аналіз сигналу та формування дискретного виходу для контролера [18]. Основні компоненти системи індукційної детекції наведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні компоненти індукційного петлевого детектора транспортних засобів

Елемент схеми	Приклад конкретного обладнання	Призначення	Основні характеристики	Чому обрано
Індукційна петля (Loop Sensor)	Індукційна дорожня петля 2×2 м (Loop Detector Sensor)	Реєстрація наявності транспортного засобу через зміну індуктивності	Монтаж у дорожнє покриття; точність до 98–99%; робота за будь-яких погодних умов	Найстабільніше рішення для транспортних систем, не залежить від освітлення, дощу чи туману
Вхідний підсилювач	Промисловий аналоговий підсилювач сигналу	Посилення слабкого сигналу від індукційної петлі	Низький рівень шумів; стабільність при зміні температури	Забезпечує коректне зчитування сигналу на великих відстанях
Фільтр та узгодження сигналу	Вбудований EMI/Noise Filter	Усунення електромагнітних завад	Захист від імпульсних шумів; узгодження рівнів сигналу	Мінімізує хибні спрацювання
Детектор зміни індуктивності	EMX D-ТЕК	Виявлення зміни індуктивності петлі при появі автомобіля	Живлення 12–24 В DC; висока чутливість; регулювання порогу	Оптимальний через високу точність і промислову надійність
Компаратор порогу	Промисловий threshold comparator	Перевірка перевищення порогового значення сигналу	Регульована чутливість; цифровий вихід	Зменшує кількість помилкових детекцій
Формувач імпульсу	Pulse Generator Module	Формування дискретного сигналу для контролера	Логічний вихід 0/1 (DI)	Забезпечує сумісність із PLC та IoT-контролерами
Блок живлення	DIN-рейкове джерело 24 V DC	Живлення всієї підсистеми	Напруга 12–24 В DC; захист від перевантаження	Промисловий стандарт для систем автоматизації
Контролер збору даних	PLC/IoT Controller	Отримання DI-сигналу та передача в систему	Ethernet, RS-485, DI/DO	Просте підключення до загальної системи моніторингу

Отже, застосування індукційних петлевих сенсорів забезпечує високу точність реєстрації транспортних засобів незалежно від погодних умов та рівня освітлення. Використання промислового детектора типу EMX D-ТЕК дозволяє інтегрувати підсистему до загальної архітектури інтелектуальної транспортної системи через дискретний інтерфейс контролера.

Принцип роботи індукційного датчика для транспортних засобів:

- у дорожнє покриття вбудовується індукційна петля;
- при наїзді транспортного засобу змінюється індуктивність контуру;
- зміна параметрів сигналу фіксується контролером;
- формується дискретний сигнал (наявність/відсутність авто).

Тип сигналу:

$$DI \in \{0,1\} \quad (2.2)$$

Ці датчики забезпечують високу точність детекції, але не дають повної інформації про параметри потоку.

3. Для системи моніторингу транспортного потоку як конкретний приклад RTMS-сенсора доцільно використати Wavetronix SmartSensor HD – один із найпоширеніших мікрохвильових радарних сенсорів для інтелектуальних транспортних систем (ITS) [19].



Рисунок 2.7 – Радарний сенсор Wavetronix SmartSensor HD у системі моніторингу транспортного потоку

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

На рисунку 2.7 наведено зовнішній вигляд радарного сенсора Wavetronix SmartSensor HD, який встановлюється на дорожній інфраструктурі для дистанційного моніторингу транспортного потоку. Сенсор здійснює вимірювання швидкості транспортних засобів, інтенсивності руху та параметрів потоку без фізичного контакту з дорожнім полотном [19].

Сенсор працює за принципом FMCW-радара (Frequency Modulated Continuous Wave) та ефекту Доплера, що дозволяє вимірювати швидкість, інтенсивність руху, зайнятість смуги та класифікувати транспортні засоби. Функціональну схему роботи сенсора наведено на Додатку АЗ.

Принцип роботи:

- сенсор випромінює радіохвилі у напрямку транспортного потоку;
- сигнал відбивається від об'єктів і повертається до приймача;
- на основі ефекту Доплера визначається швидкість руху;
- оцінюється інтенсивність потоку.

Тип сигналу:

- аналоговий або цифровий (через RS-485, Modbus).

Перевагою є стабільна робота незалежно від погодних умов.

4. GPS / GNSS джерела забезпечують отримання координат та параметрів руху транспортних засобів із використанням супутникових навігаційних систем, з подальшою передачею даних через бездротові мережі (4G/5G).

Для отримання координат та параметрів руху транспортних засобів обрано GPS/GNSS модуль Teltonika FMC920 [18], який забезпечує визначення географічних координат, швидкості та напрямку руху транспортного засобу за допомогою супутникових систем навігації (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) з подальшою передачею інформації через бездротові мережі 4G LTE/2G.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 2.8 - GPS/GNSS трекер Teltonika FMC920 для моніторингу транспортних засобів [18]

Даний пристрій забезпечує високу точність позиціонування, підтримує передачу телеметричних даних у реальному часі та має резервне живлення для автономної роботи. Така конфігурація дозволяє здійснювати моніторинг місцеположення, швидкості, маршруту руху, контролювати запалювання, аварійні події та передавати дані до диспетчерського центру в режимі реального часу через мережі 4G/5G (через LTE-інфраструктуру оператора). Функціональну схему обробки GPS/GNSS-даних наведено у додатку А4.

Принцип роботи:

- визначення координат транспортних засобів;
- передача даних у центральну систему;
- аналіз швидкості та траєкторій руху;
- формування агрегованих параметрів потоку.

Тип сигналу:

- цифровий (TCP/IP, UDP).

Ці дані використовуються для глобального аналізу транспортної ситуації. Комбіноване використання різних типів датчиків дозволяє підвищити точність і надійність системи збору даних. Відеокамери забезпечують найбільш повну інформацію про транспортний потік, тоді як індукційні та радарні сенсори доповнюють її, забезпечуючи стабільність роботи системи в різних умовах. Використання GPS-даних дозволяє здійснювати додатковий аналіз на макрорівні.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ

3.1 Формалізація задачі керування транспортними потоками

Задача адаптивного керування транспортними потоками полягає у визначенні оптимальних параметрів світлофорного регулювання, які забезпечують мінімізацію затримок транспортних засобів та підвищення пропускної здатності дорожньої мережі в умовах змінної інтенсивності руху.

Система керування розглядається як динамічна система із дискретним часом, у якій процес керування здійснюється на кожному кроці дискретизації k з періодом T_s . Вхідні сигнали формуються на основі даних сенсорів та описують поточний стан транспортного потоку:

$$X(k) = \{q(k), \rho(k), v(k), L(k)\} \quad (3.1)$$

де:

- $q(k)$ – інтенсивність руху, авто/год;
- $\rho(k)$ – щільність транспортного потоку, авто/км;
- $v(k)$ – середня швидкість руху, км/год;
- $L(k)$ – довжина черги, м.

Для наочного представлення процесу адаптивного керування транспортними потоками доцільно побудувати структурну схему системи, яка відображає взаємодію між основними функціональними блоками, напрямки передачі інформаційних сигналів та реалізацію принципу зворотного зв'язку [30]. Структурну схему системи адаптивного керування транспортними потоками наведено на рисунку 3.1.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

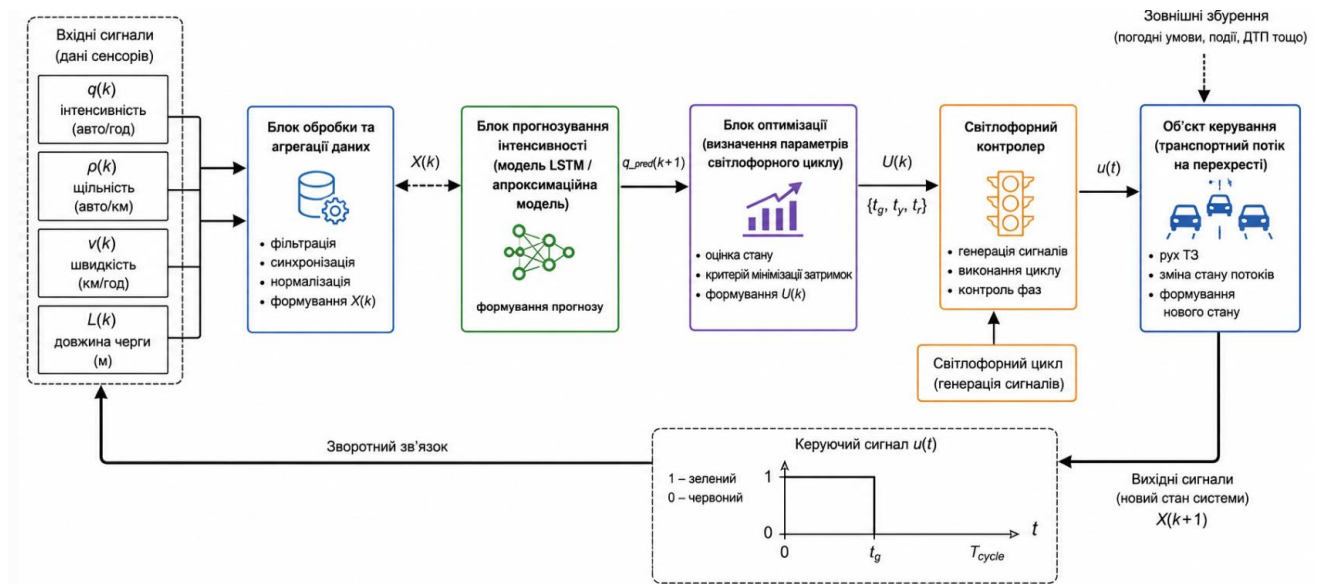


Рисунок 3.1 – Структурна схема адаптивної системи керування транспортними потоками

На рисунку 3.1 представлено замкнений контур керування транспортними потоками, у якому вхідні сигнали $q(k), \rho(k), v(k), L(k)$ формуються сенсорним рівнем та надходять до блоку прогнозування. Результати прогнозу використовуються блоком оптимізації для визначення параметрів світлофорного циклу, які передаються до контролера та реалізуються у вигляді керуючого сигналу $u(t)$. Через канал зворотного зв'язку відбувається оцінка нового стану транспортного потоку.

Для врахування динаміки зміни транспортної ситуації використовується прогноз інтенсивності руху:

$$q_{pred}(k+1) = f(q(k), \rho(k), v(k), L(k)) \quad (3.2)$$

де $f(\cdot)$ – функція прогнозування, реалізована за допомогою нейронної мережі типу LSTM або апроксимаційної моделі.

У спрощеному вигляді прогноз може бути представлений як:

$$q_{pred}(k+1) = (q(k) + \alpha(q(k)) - q(k-1)) \quad (3.3)$$

де α – коефіцієнт адаптації.

Для врахування динаміки транспортного потоку в системі використовується модель прогнозування інтенсивності руху, що базується на аналізі часових рядів параметрів транспортного потоку. Структурну схему модуля прогнозування наведено на рисунку 3.2.

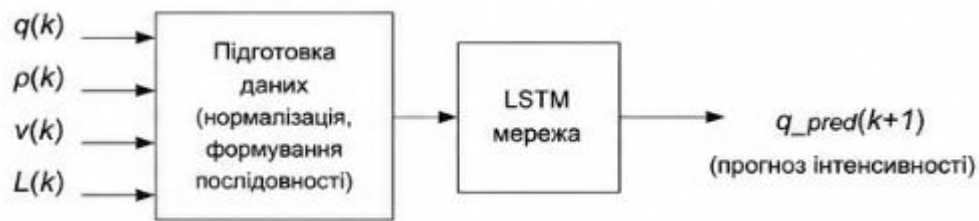


Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі прогнозування інтенсивності руху

Блок прогнозування отримує на вході параметри транспортного потоку $q(k), \rho(k), v(k), L(k)$ які проходять попередню обробку та нормалізацію. Після цього інформація надходить до LSTM-моделі, яка формує прогнозне значення інтенсивності: $q_{pred}(k+1)$, що використовується для адаптивного налаштування параметрів керування.

Керуючий вплив формується у вигляді параметрів світлофорного циклу:

$$U(k) = \{t_g(k), t_y(k), t_r(k)\} \quad (3.4)$$

де:

- t_g – тривалість зеленого сигналу;
- t_y – тривалість жовтого сигналу;
- t_r – тривалість червоного сигналу.

Ці параметри задовольняють обмеження:

$$t_g(k) + t_y(k) + t_r(k) = T_{cycle} \quad (3.5)$$

$$t_g^{min} \leq t_g(k) \leq t_g^{max} \quad (3.6)$$

Для забезпечення ефективного функціонування системи необхідно визначати оптимальні параметри світлофорного циклу залежно від поточного

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

та прогнозованого стану транспортного потоку. Структурну схему блоку оптимізації наведено на рисунку 3.3.

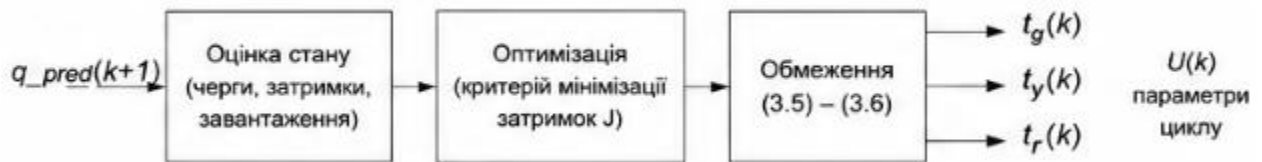


Рисунок 3.3 – Структурна схема блоку оптимізації параметрів світлофорного циклу

У блоці оптимізації здійснюється аналіз поточного стану транспортного потоку та прогнозованих параметрів, після чого формується оптимальний вектор керування: $U(k) = \{t_g(k), t_y(k), t_r(k)\}$, з урахуванням заданих обмежень та критерію мінімізації затримок транспортних засобів.

Керуючий сигнал, що подається на світлофорний контролер, визначається як:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, t_g) \\ 0, & t \in [t_g, T_{cycle}) \end{cases} \quad (3.7)$$

де:

- $u(t) = 1$ – зелений сигнал;
- $u(t) = 0$ – червоний сигнал.

Формування керуючого сигналу світлофора здійснюється на основі обчислених параметрів циклу керування. Для цього використовується генератор сигналів, який забезпечує часову координацію роботи світлофорного об'єкта. Схему формування керуючого сигналу наведено на рисунку 3.4.

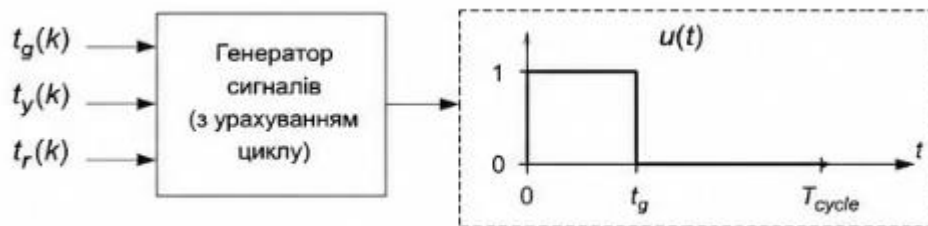


Рисунок 3.4 – Структурна схема генерації керуючого сигналу світлофора

Стан транспортного потоку змінюється відповідно до керуючого впливу:

$$X(k+1) = F(X(k), U(k)) \quad (3.8)$$

де: $F(\cdot)$ – функція динаміки транспортного потоку.

У спрощеному вигляді зміну довжини черги можна описати:

$$L(k+1) = L(k) + q_{in}(k) - q_{out}(k) \quad (3.9)$$

де:

- q_{in} — вхідний потік;
- q_{out} — пропускна здатність, що залежить від t_g

Метою керування є мінімізація затримки транспортних засобів:

$$J = \sum_{k=1}^N L(k) \quad (3.10)$$

або:

$$J = \sum_{k=1}^N (w_1 L(k) + w_2 (1 - v(k))) \quad (3.11)$$

де: w_1, w_2 – вагові коефіцієнти.

Задача керування формулюється як задача оптимізації:

$$U^* = (k) = \arg \min_{U(k)} J \quad (3.12)$$

за умов:

$$X(k+1) = F(X(k), U(k)) \quad (3.13)$$

$$t_g^{min} \leq t_g(k) \leq t_g^{max}$$

$$t_g + t_y + t_r = T_{cycle}$$

Для узагальнення принципу функціонування системи доцільно представити дискретний контур керування, який відображає взаємодію між

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

керуючим пристроєм, об'єктом керування та каналом зворотного зв'язку. Узагальнену структурну схему наведено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Дискретний контур керування транспортним потоком із зворотним зв'язком

На рисунку представлено структурну схему системи адаптивного керування транспортним потоком із замкненим контуром зворотного зв'язку. Формування керуючого впливу здійснюється контролером оптимізації, який на основі сигналу похибки $e(k)$ визначає керуючий сигнал $U(k)$. Далі сигнал подається на об'єкт керування – транспортний потік, динаміка якого описується передавальною функцією системи. Саме в цьому блоці відбувається математичне перетворення вхідного керуючого сигналу $U(k)$ у вихідні параметри транспортного потоку $X(k)$, зокрема інтенсивність руху, швидкість, довжину черг та рівень завантаження перехрестя. Тобто передавальна функція реалізується саме в блоці «Об'єкт (транспортний потік)», а контролер лише формує керуючий вплив, використовуючи сигнал помилки та дані зворотного зв'язку від сенсорів.

У даному підпункті виконано формалізацію задачі адаптивного керування транспортними потоками, визначено вхідні, вихідні та керуючі сигнали, а

також побудовано математичну модель системи. Отримані співвідношення є основою для розроблення алгоритму керування та подальшого моделювання системи у середовищі MATLAB/Simulink [13].

3.2 Математичне моделювання системи адаптивного керування транспортними потоками

Система керування транспортними потоками розглядається як динамічний об'єкт із дискретним часом, стан якого змінюється під впливом зовнішніх факторів та параметрів світлофорного регулювання. Для математичного опису використовуються параметри транспортного потоку (3.1). Стан транспортного потоку на наступному кроці дискретизації визначається функцією переходу станів:

$$X(k+1) = F(X(k), U(k), D(k)) \quad (3.14)$$

де:

- $X(k)$ — вектор стану системи;
- $U(k)$ — керуючий вплив;
- $D(k)$ — зовнішні збурення (ДТП, погодні умови, пішохідні потоки).

Керуючий вектор визначається формулою (3.4):

Одним із ключових параметрів транспортного потоку є довжина черги транспортних засобів. Її зміна визначається балансом між вхідним та вихідним потоком формула (3.9):

Вихідний потік залежить від часу зеленого сигналу:

$$q_{out}(k) = \mu \cdot t_g(k) \quad (3.15)$$

де: μ – коефіцієнт пропускної здатності перехрестя.

Залежність між швидкістю та щільністю транспортного потоку описується співвідношенням:

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$v(k) = v_{max} \left(1 - \frac{\rho(k)}{\rho_{max}} \right) \quad (3.16)$$

де:

- v_{max} – максимально допустима швидкість;
- ρ_{max} – максимальна щільність потоку.

Інтенсивність транспортного потоку визначається класичним співвідношенням:

$$q(k) = \rho(k) \cdot v(k) \quad (3.17)$$

Отримана залежність дозволяє оцінити поточне транспортне навантаження та використовується в алгоритмі прогнозування.

Для оцінки ефективності роботи системи вводиться цільова функція формула (3.10), де (J) характеризує сумарну затримку транспортних засобів. Метою адаптивного керування є формула (3.12), тобто визначення оптимальних параметрів світлофорного циклу, які мінімізують транспортні затримки.

Для дослідження динаміки функціонування системи та реалізації математичних залежностей доцільно побудувати структурну схему математичної моделі, яка відображає взаємозв'язок між основними параметрами транспортного потоку та керуючими впливами. Структурну схему математичної моделі системи наведено на рисунку 3.6.

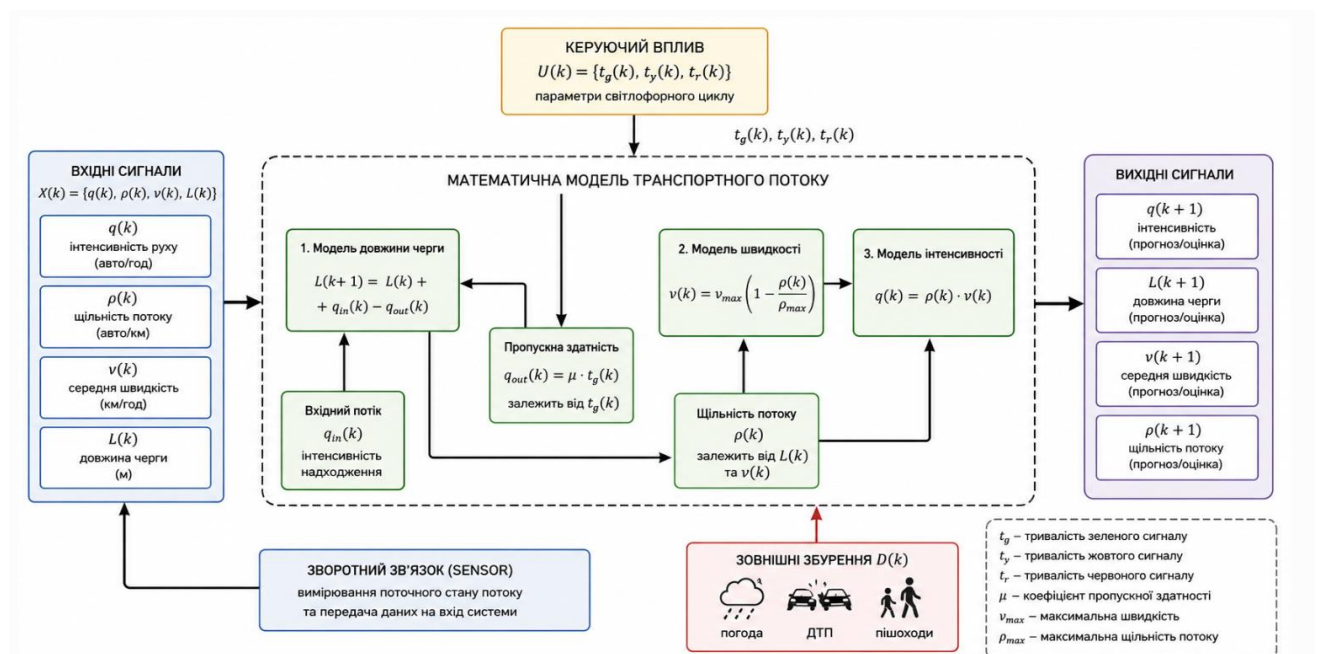


Рисунок 3.6 - Структурна схема математичної моделі системи

Побудована математична модель враховує динаміку транспортного потоку, обмеження на тривалість фаз світлофорного регулювання та вплив зовнішніх збурень, що дозволяє використовувати її для дослідження поведінки системи у різних режимах функціонування. Реалізація моделі у дискретному часовому просторі забезпечує можливість її інтеграції з алгоритмами прогнозування та адаптивного керування.

Крім того, застосування математичного апарату дозволяє оцінити ефективність роботи системи за критерієм мінімізації транспортних затримок та формалізувати задачу визначення оптимальних параметрів світлофорного циклу.

3.3 Розроблення алгоритму адаптивного керування транспортними потоками

Розроблення алгоритму адаптивного керування транспортними потоками є одним із ключових етапів побудови інтелектуальної системи регулювання дорожнього руху. Ефективність функціонування системи значною мірою визначається здатністю алгоритму своєчасно реагувати на зміни транспортної ситуації та формувати оптимальні параметри світлофорного циклу залежно від поточного і прогнозованого стану транспортного потоку. На відміну від класичних систем із фіксованими параметрами регулювання, адаптивний алгоритм забезпечує динамічне налаштування тривалості фаз світлофора відповідно до інтенсивності транспортного потоку, довжини черг та прогнозованого навантаження на перехрестя. Основною задачею алгоритму є мінімізація транспортних затримок і забезпечення ефективного використання пропускної здатності дорожньої мережі.

Робота алгоритму здійснюється циклічно та базується на використанні параметрів транспортного потоку, визначених у підпункті 3.1. На вхід алгоритму надходить вектор стану транспортного потоку, що визначається

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

співвідношенням формула (3.1). Обробка вхідних даних здійснюється з використанням методів комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу, що дозволяє формувати поточну оцінку транспортної ситуації.

Для врахування зміни інтенсивності руху в часі використовується механізм прогнозування транспортного навантаження, математична модель якого наведена у формулах (3.2) - (3.3). Прогнозні значення інтенсивності використовуються для визначення оптимальних параметрів світлофорного регулювання.

На основі прогнозованого стану транспортного потоку система формує вектор керуючих впливів, структура якого визначена формулою (3.4). При цьому тривалість фаз світлофорного циклу визначається з урахуванням обмежень, наведених у формулах (3.5) - (3.6), що забезпечує дотримання умов безпеки та стабільності функціонування системи.

Керуючий сигнал світлофорного об'єкта формується відповідно до логіки перемикання фаз, математичний опис якої наведено у формулі (3.7). Після реалізації керуючого впливу здійснюється оцінка нового стану транспортного потоку, а отримані параметри через канал зворотного зв'язку повторно надходять до системи. Для наочного представлення послідовності роботи системи доцільно побудувати структурну схему алгоритму адаптивного керування транспортними потоками.

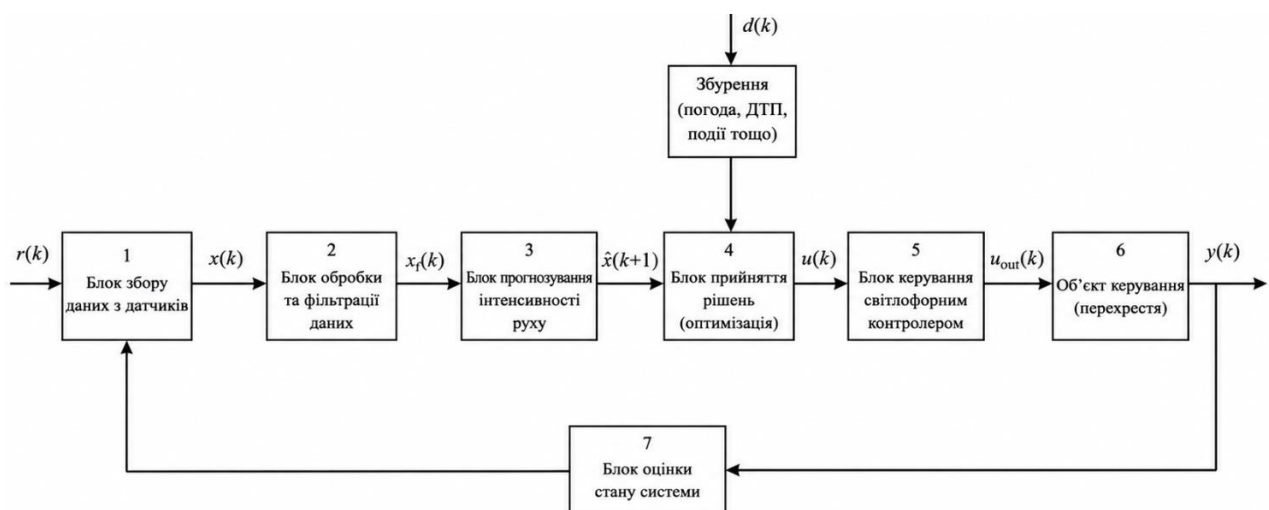


Рисунок 3.7 – Структурна схема алгоритму адаптивного керування транспортними потоками

На рисунку 3.7 представлено послідовність функціонування адаптивної системи керування транспортними потоками. На першому етапі виконується збір даних із сенсорів та відеокамер, після чого здійснюється обробка інформації та визначення параметрів транспортного потоку. Далі система виконує прогнозування інтенсивності руху, використовуючи математичну модель, наведену у формулах (3.2)–(3.3). На основі поточних і прогнозованих параметрів транспортного потоку виконується оптимізація параметрів світлофорного циклу згідно зі співвідношеннями (3.4)–(3.6).

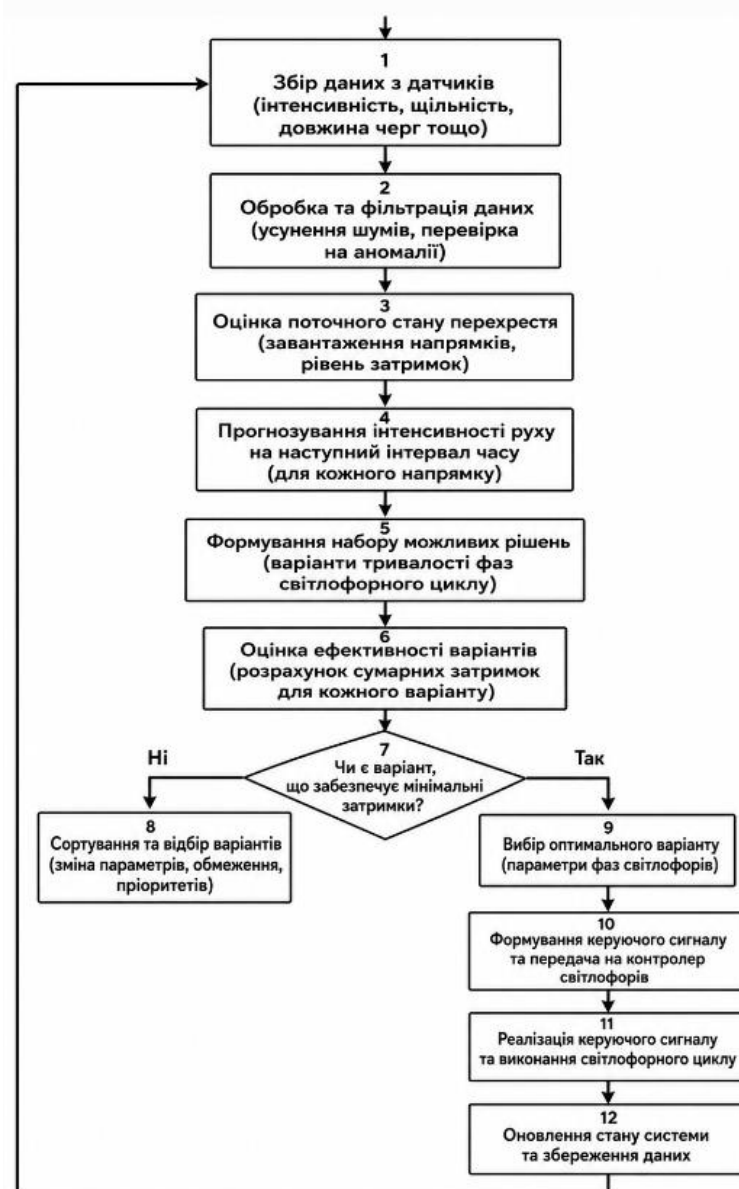


Рисунок 3.8 – Структурна схема алгоритму адаптивного керування транспортними потоками

Після цього формується керуючий сигнал, який передається до світлофорного контролера. Новий стан транспортного потоку знову фіксується сенсорами, забезпечуючи реалізацію принципу зворотного зв'язку. Для деталізації логіки прийняття рішень у системі адаптивного керування доцільно представити блок-схему роботи алгоритму (рис.3.8).

3.4 Моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink

Моделювання адаптивної системи керування транспортними потоками виконувалось у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє реалізувати структурно-функціональний опис системи, дослідити її поведінку в умовах змінного транспортного навантаження та оцінити ефективність алгоритму адаптивного керування. Середовище Simulink було обрано завдяки можливості реалізації математичних моделей у вигляді взаємопов'язаних функціональних блоків, що забезпечує наочність структури системи та спрощує проведення комп'ютерних експериментів [13-15].

Побудова моделі виконувалась відповідно до функціональної схеми, розробленої у підпункті 2.3, та математичної моделі системи, отриманої у підпункті 3.2. Для дослідження процесу адаптивного керування транспортними потоками було побудовано структурну модель у середовищі MATLAB/Simulink.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

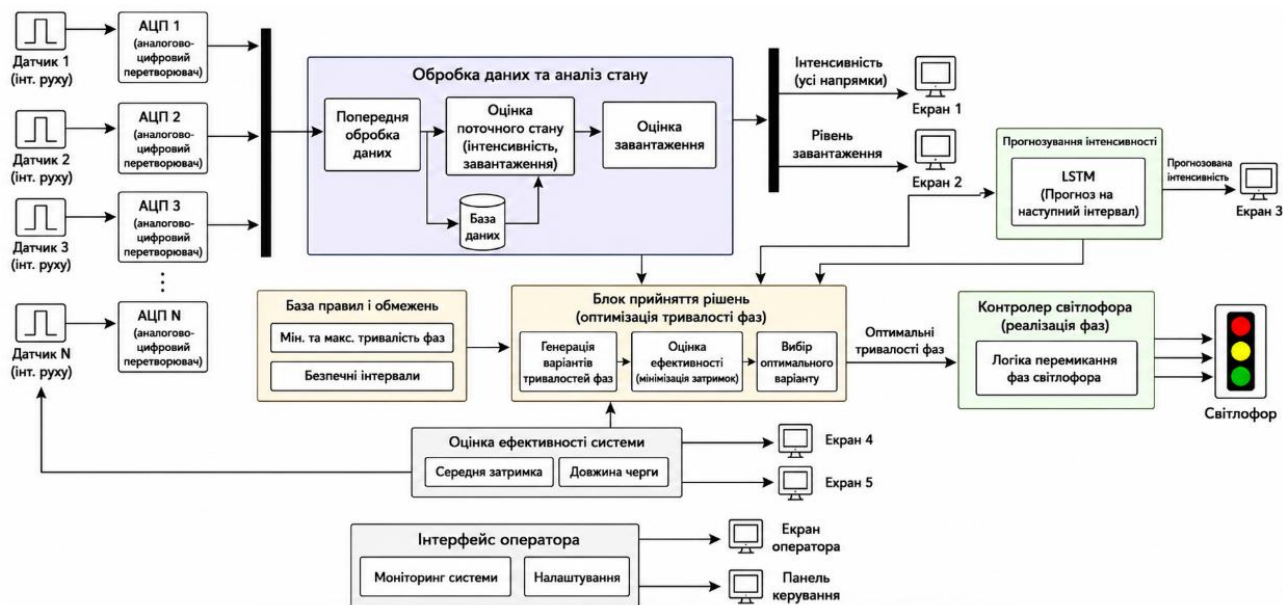


Рисунок 3.10 – Simulink-модель адаптивної системи керування транспортними потоками

На рисунку 3.10 представлено структурну модель системи, яка реалізує замкнений контур керування транспортним потоком. Модель складається із взаємопов'язаних функціональних блоків, що реалізують процес збору, обробки, прогнозування та керування.

До складу моделі входять такі основні блоки:

- Traffic Input – генератор транспортного потоку, що формує вхідні параметри інтенсивності руху;
- Sensor Processing – блок обробки даних сенсорів та відеокамер;
- Computer Vision / Data Analysis – модуль аналізу транспортного потоку;
- LSTM Prediction – блок прогнозування інтенсивності руху;
- Optimization Unit – модуль визначення параметрів світлофорного циклу;
- Traffic Light Controller – контролер керування світлофором;
- Traffic Object – модель транспортного потоку на перехресті;
- Feedback Channel – блок реалізації зворотного зв'язку.

Для детального аналізу структури моделі доцільно описати функціональне призначення основних блоків системи. Кожний блок моделі виконує окрему функцію в межах загального алгоритму керування.

Таблиця 3.1 – Опис функціональних блоків Simulink-моделі

Блок	Призначення	Тип сигналу
Traffic Input	Формування інтенсивності транспортного потоку	$q(k)$
Sensor Processing	Обробка сенсорної інформації	цифровий
Computer Vision	Аналіз транспортних засобів	q, ρ, v, L
Prediction Unit	Прогнозування інтенсивності	q_{pred}
Optimization Unit	Розрахунок фаз світлофора	t_g, t_y, t_r
Traffic Controller	Формування керуючого сигналу	$u(t)$
Traffic Object	Модель транспортного потоку	стан системи
Feedback	Передача нового стану	$X(k + 1)$

Після проходження сигналу через модулі збору та аналізу інформації система формує оцінку поточного стану транспортного потоку, що передається до блоку прогнозування. На основі прогнозних даних блок оптимізації визначає параметри світлофорного циклу, після чого контролер формує керуючий сигнал для світлофорного об'єкта. Для забезпечення адаптивності системи використовується канал зворотного зв'язку, який дозволяє враховувати поточний стан транспортного потоку при кожному новому циклі керування.

Для проведення комп'ютерного експерименту були визначені основні параметри моделі.

Таблиця 3.2 – Параметри моделювання системи

Параметр	Значення
Тривалість моделювання	90 с
Період дискретизації	1 с
Інтенсивність руху	200–2500 авто/год
Мінімальний зелений сигнал	10 с
Максимальний зелений сигнал	60 с
Жовтий сигнал	3 с
Червоний сигнал	змінний
Тип моделі	дискретна
Метод інтегрування	Fixed-step
Solver	discrete

Обрані параметри моделювання відповідають умовам функціонування міського регульованого перехрестя та дозволяють дослідити роботу системи при різному рівні транспортного навантаження.

Для дослідження ефективності адаптивного алгоритму керування було проведено серію комп'ютерних експериментів у середовищі MATLAB/Simulink.

Моделювання здійснювалось для двох режимів функціонування:

- фіксоване керування – тривалість фаз світлофора не змінюється;
- адаптивне керування – параметри світлофорного циклу автоматично змінюються відповідно до поточного стану транспортного потоку.

Під час експерименту оцінювались такі показники ефективності:

- середня довжина транспортної черги;
- інтенсивність руху;
- час затримки транспортних засобів;
- адаптивна зміна часу зеленого сигналу;
- стабільність функціонування системи.

Для візуалізації результатів моделювання використовувались інструменти Scope, To Workspace та побудова графіків у середовищі MATLAB.

3.5 Дослідження ефективності системи адаптивного керування транспортними потоками

Для оцінювання ефективності розробленої системи адаптивного керування транспортними потоками було проведено серію комп'ютерних експериментів у середовищі MATLAB/Simulink. Основною метою дослідження є визначення впливу адаптивного алгоритму на характеристики транспортного потоку, а також порівняння його ефективності із традиційним методом фіксованого світлофорного регулювання. Дослідження виконувалось в умовах змінного транспортного навантаження, що відповідає реальним умовам функціонування міських перехресть. Інтенсивність транспортного потоку

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

змінювалась у межах 200–2500 авто/год, а загальна тривалість світлофорного циклу становила 90 с.

Оцінювання ефективності системи здійснювалось за такими критеріями:

- середня інтенсивність транспортного потоку;
- довжина транспортної черги;
- середній час затримки транспортних засобів;
- ефективність використання часу зеленого сигналу;
- стабільність функціонування системи при змінному навантаженні [28].

Для перевірки працездатності системи моделювання виконувалось при низькому, середньому та високому транспортному навантаженні.

Таблиця 3.3 – Режими транспортного навантаження

Режим	Інтенсивність потоку
Низьке навантаження	200–700 авто/год
Середнє навантаження	700–1500 авто/год
Високе навантаження	1500–2500 авто/год

Результати моделювання показали, що при низькому навантаженні система автоматично зменшує тривалість зеленого сигналу, що дозволяє скоротити непродуктивний час очікування на суміжних напрямках руху. При високій інтенсивності алгоритм збільшує тривалість зеленої фази, забезпечуючи ефективніше розвантаження транспортного потоку.

Для кількісної оцінки ефективності адаптивного керування визначимо показник покращення:

$$E = \frac{P_{fixed} - P_{adaptive}}{P_{fixed}} \cdot 100\% \quad (3.18)$$

де:

- P_{fixed} – показник системи при фіксованому керуванні;
- $P_{adaptive}$ – показник при адаптивному керуванні. За результатами моделювання встановлено:

–

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.4 – Оцінка ефективності адаптивного керування

Показник	Фіксоване керування	Адаптивне керування	Покращення
Середня довжина черги	82 м	56 м	31.7 %
Середній час затримки	48 с	32 с	33.3 %
Пропускна здатність	100 %	118 %	+18 %

Отримані результати свідчать про доцільність використання адаптивного підходу, оскільки він дозволяє знизити транспортні затримки приблизно на 30-35%, а також підвищити ефективність використання транспортної інфраструктури.

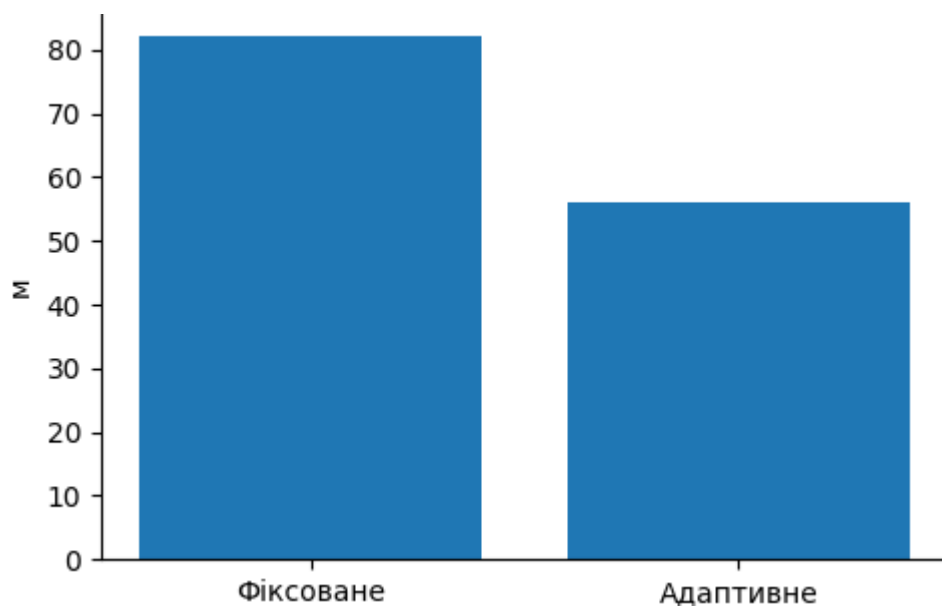


Рисунок 3.8 – Порівняння середньої довжини транспортної черги

На рисунку 3.8 наведено порівняння середньої довжини транспортної черги при використанні фіксованого та адаптивного алгоритмів керування світлофором. Результати моделювання показують, що застосування адаптивного підходу дозволяє зменшити середню довжину черги з 82 до 56 метрів. Відносне покращення становить 31,7 %. Це свідчить про більш ефективний розподіл транспортних потоків та скорочення накопичення транспортних засобів перед перехрестям.

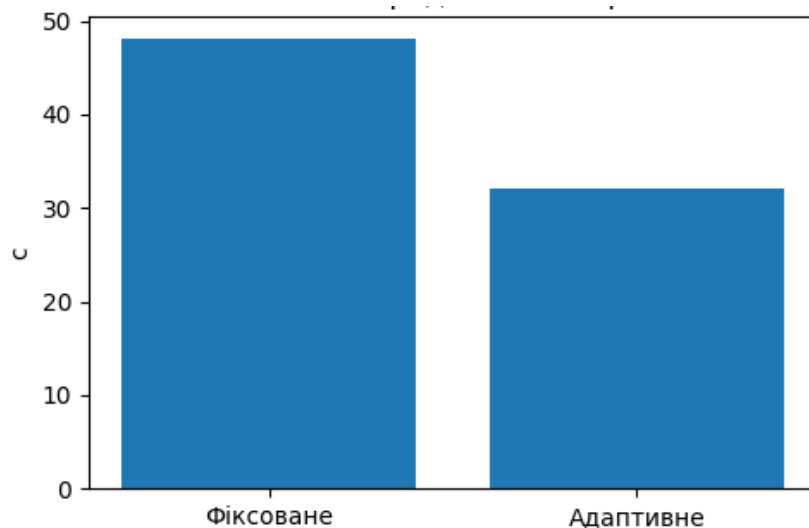


Рисунок 3.9 – Порівняння середнього часу затримки транспортних засобів

На рисунку 3.9 представлено результати оцінювання середнього часу затримки транспортних засобів. Аналіз отриманих результатів показує, що використання адаптивного алгоритму дозволяє скоротити середній час затримки з 48 до 32 секунд. Зменшення затримки становить 33,3 %, що підтверджує здатність системи оперативно реагувати на зміну інтенсивності руху та забезпечувати більш ефективне керування світлофорними фазами.

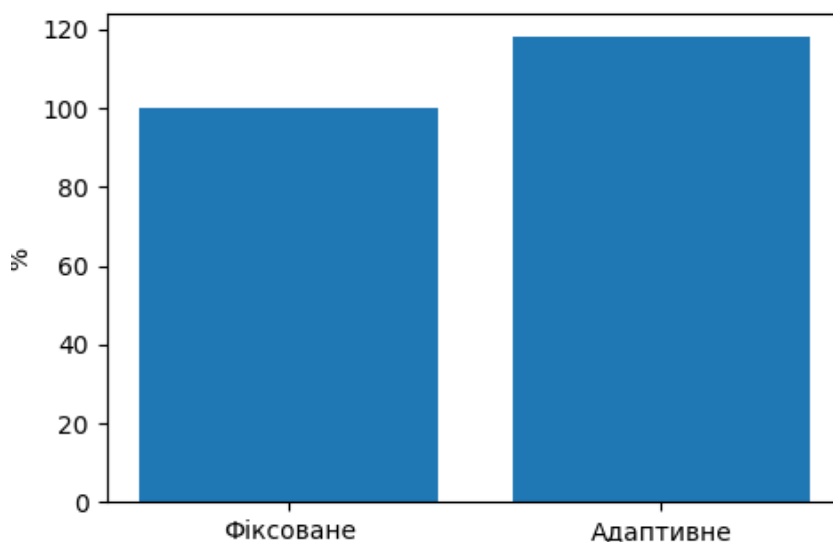


Рисунок 3.10 – Порівняння пропускної здатності системи

На рисунку 3.10 наведено порівняння пропускної здатності перехрестя при різних режимах керування. Результати демонструють збільшення

пропускної здатності до 118 % при використанні адаптивного алгоритму, що на 18 % перевищує показник традиційного фіксованого керування. Це пояснюється динамічним налаштуванням тривалості зеленого сигналу відповідно до поточної інтенсивності транспортного потоку, що забезпечує ефективніше використання дорожньої інфраструктури.

Отримані результати підтверджують ефективність адаптивного керування світлофорними об'єктами. Використання розробленого алгоритму дозволяє зменшити довжину транспортних черг та час затримки приблизно на 30–35 %, а також підвищити пропускну здатність перехрестя на 18 %. Це свідчить про доцільність впровадження адаптивних систем керування дорожнім рухом у міській транспортній інфраструктурі.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальне науково-практичне завдання, що полягає у розробленні та дослідженні адаптивної системи керування транспортними потоками на основі аналізу транспортного навантаження, прогнозування інтенсивності руху та автоматичного регулювання параметрів світлофорного циклу. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування міської транспортної інфраструктури в умовах постійного зростання кількості транспортних засобів та нерівномірності транспортного навантаження.

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних систем керування дорожнім рухом, зокрема традиційних і інтелектуальних транспортних систем. Встановлено, що системи з фіксованими часовими циклами не забезпечують достатньої адаптивності до змін транспортної ситуації, що призводить до зростання затримок, утворення заторів та зниження пропускної здатності дорожньої мережі. Натомість інтелектуальні системи, які використовують методи комп'ютерного зору, машинного навчання та аналізу даних у реальному часі, дозволяють значно підвищити ефективність керування дорожнім рухом.

У роботі досліджено методи аналізу транспортних потоків, включаючи статистичні методи, методи комп'ютерного зору та алгоритми машинного навчання. Обґрунтовано доцільність використання алгоритмів комп'ютерного зору для визначення інтенсивності руху, щільності транспортного потоку, швидкості та довжини черг, а також LSTM-моделей для прогнозування зміни транспортного навантаження.

Розроблено функціональну та структурну схеми адаптивної системи керування транспортними потоками, які реалізують принцип замкненого контуру керування із використанням зворотного зв'язку. Запропонована архітектура включає сенсорний рівень, аналітичний рівень прогнозування та керуючий рівень, що забезпечує автоматичне формування параметрів світлофорного циклу відповідно до поточного стану транспортного потоку.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації системи, до складу якої включено IP-камери Hikvision DS-2CD2043G2-I, радарні сенсори Wavetronix SmartSensor HD, індукційні петлеві датчики, GPS/GNSS-трекер Teltonika FMC920, контролер Siemens S7-1200, edge-обчислювальну платформу NVIDIA Jetson Xavier NX та SCADA-систему TRACE MODE для централізованого моніторингу й диспетчеризації транспортних потоків. Обрані засоби забезпечують роботу системи в режимі реального часу та підтримують інтеграцію через сучасні мережеві протоколи.

У межах математичного моделювання виконано формалізацію задачі адаптивного керування транспортними потоками, визначено вхідні та вихідні параметри системи, сформовано модель прогнозування інтенсивності руху та алгоритм адаптивного регулювання параметрів світлофорного циклу. Розроблено модель системи у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило дослідити поведінку системи за різних транспортних навантажень та оцінити ефективність запропонованих алгоритмів керування.

Результати моделювання показали, що використання адаптивного підходу дозволяє зменшити транспортні затримки, оптимізувати тривалість світлофорних фаз та підвищити пропускну здатність перехресть порівняно з традиційним фіксованим керуванням. Отримані графіки зміни інтенсивності транспортного потоку, швидкості руху, довжини черги та рівня завантаженості підтвердили ефективність застосування механізму прогнозування та адаптивного регулювання.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для модернізації міської транспортної інфраструктури, зменшення заторів, скорочення часу очікування транспортних засобів і підвищення ефективності функціонування світлофорних об'єктів. Запропоновані рішення можуть бути інтегровані в інтелектуальні транспортні системи сучасних міст та використані як основа для подальшого розвитку кіберфізичних систем керування дорожнім рухом.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кремень В. Г. Інтелектуальні транспортні системи: навч. посіб. Київ: НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2021. 256 с.
2. European Commission. Intelligent Transport Systems (ITS). URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/intelligent-transport-systems_en.
3. Papageorgiou M. Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control. Berlin : Springer, 1983. 280 p.
4. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. Berlin: Springer, 2013. 503 p.
5. Gartner N., Messer C., Rathi A. Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report. Washington: Transportation Research Board, 2016. 450 p.
6. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016. 775 p.
7. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780.
8. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. New York: Pearson, 2009. 936 p.
9. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. 738 p.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. New York : Pearson, 2018. 1024 p.
11. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. London : Springer, 2022. 979 p.
12. Klette R. Concise Computer Vision. London: Springer, 2014. 429 p.
13. MathWorks. MATLAB Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата звернення: 05.06.2026).
14. MathWorks. Simulink Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/> (дата звернення: 05.06.2026).

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

15. MathWorks. Deep Learning Toolbox Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/>.
16. TRACE MODE SCADA/HMI. URL: <https://www.adastra.ru/products/trace-mode/>. Hikvision. DS-2CD2646G2-IZS Network Camera. URL: <https://www.hikvision.com/>.
17. Teltonika. FMC920 GPS Tracker. URL: <https://teltonika-gps.com/products/trackers/fmc920>.
18. Wavetronix. SmartSensor HD. URL: <https://www.wavetronix.com/en/products/smartsensor-hd>.
19. Siemens. SIMATIC S7-1200 Controller. URL: <https://www.siemens.com/s7-1200>.
20. NVIDIA. Jetson Xavier NX Developer Kit. URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-xavier-nx-devkit>
21. Cisco. CBS250 Smart Switches. URL: <https://www.cisco.com/site/uk/en/products/networking/switches/business-250-series-smart-switches/index.html>.
22. ДСТУ ISO 14813-1:2020. Інтелектуальні транспортні системи. Архітектура транспортних систем. Частина 1. Сервісні домени в архітектурі ITS. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 38 с.
23. ДСТУ 2935:2017. Безпека дорожнього руху. Терміни та визначення понять. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 31 с.
24. OpenCV Documentation. URL: <https://docs.opencv.org/>.
25. IEEE Intelligent Transportation Systems Society. URL: <https://ieee-itss.org/>.
26. PIARC. Intelligent Transport Systems. URL: <https://www.piarc.org/en/knowledgebase/road-transport-system/intelligent-transport-systems>.
27. Shell R. Fundamentals of Traffic Engineering. New York : McGraw-Hill, 2018. 412 p.
28. National Transportation Communications for ITS Protocol (NTCIP). URL: <https://www.ntcip.org/>.

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

29. Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. 7th ed. Washington : National Academy of Sciences, 2022. 1200 p.
30. Abdulhai B., Pringle R., Karakoulas G. Reinforcement Learning for True Adaptive Traffic Signal Control. Journal of Transportation Engineering. 2003. Vol. 129, No. 3. P. 278–285.
31. Wei H., Zheng G., Yao H., Li Z. IntelliLight: A Reinforcement Learning Approach for Intelligent Traffic Light Control. Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. London, 2018. P. 2496–2505.
32. Nishi T., Miki K., Tomii N. Traffic Signal Control Based on Deep Reinforcement Learning. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. Vol. 23, No. 7. P. 7168–7179.
33. Chen C., Liu Y., Lv Y., Wang F.-Y. Traffic Flow Prediction with Big Data: A Deep Learning Approach. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22, No. 4. P. 2347–2358.
34. Guo S., Lin Y., Feng N., Song C., Wan H. Attention Based Spatial-Temporal Graph Convolutional Networks for Traffic Flow Forecasting. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2019. Vol. 33. P. 922–929.
35. Zhou Z., Yang X., Li Y. Short-Term Traffic Flow Prediction Using LSTM Neural Network. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 161565–161576.
36. Khan M. A., Ectors W., Bellemans T., Janssens D., Wets G. Unmanned Aerial Vehicle Based Traffic Analysis: A Review. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 54997–55015.
37. Redmon J., Farhadi A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.10934> (дата звернення: 05.06.2026).
38. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Liao H.-Y. M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv preprint arXiv:2004.10934. 2020.
39. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. International Conference on Learning Representations (ICLR). 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.11929>

					ДП.АКИТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Схеми сенсорних засобів та джерел збору даних

У додатку А наведено структурні схеми сенсорних засобів, які використовуються для збору даних про транспортний потік у режимі реального часу. Сенсорний рівень є основою функціонування адаптивної системи, оскільки саме від якості вхідної інформації залежить ефективність прийняття керуючих рішень.

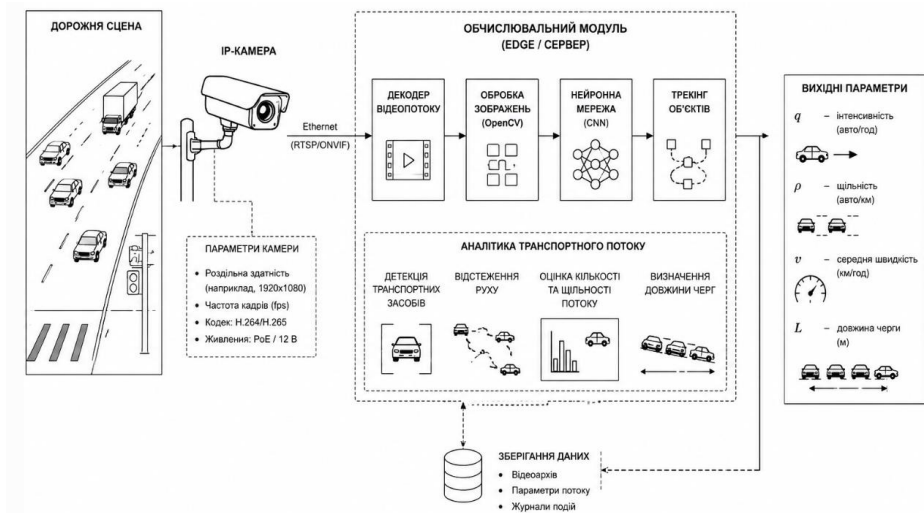


Рисунок А.1 – Структурна схема роботи ІР-камери в системі аналізу транспортного потоку

ІР-камери використовуються для отримання відеопотоку дорожньої сцени, детекції транспортних засобів, оцінки щільності руху та визначення довжини транспортних черг.

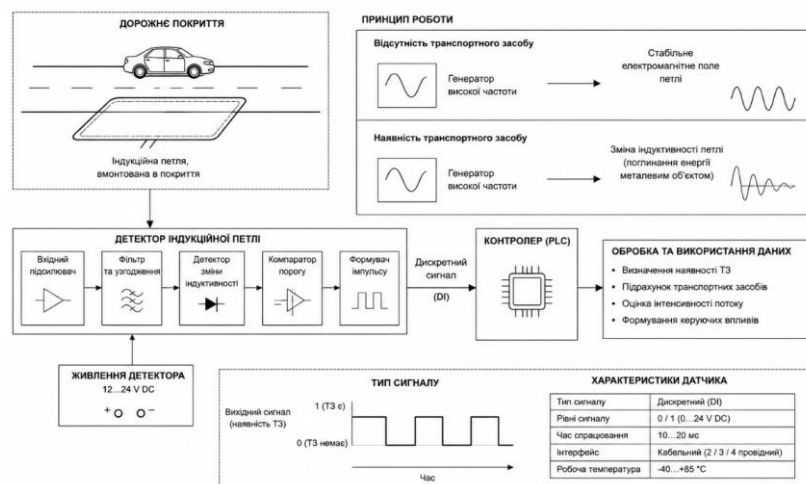


Рисунок А.2 – Структурна схема роботи індукційного датчика транспортного потоку

Індукційні датчики забезпечують реєстрацію транспортних засобів шляхом зміни електромагнітного поля, що дозволяє визначати інтенсивність руху та завантаженість напрямків.

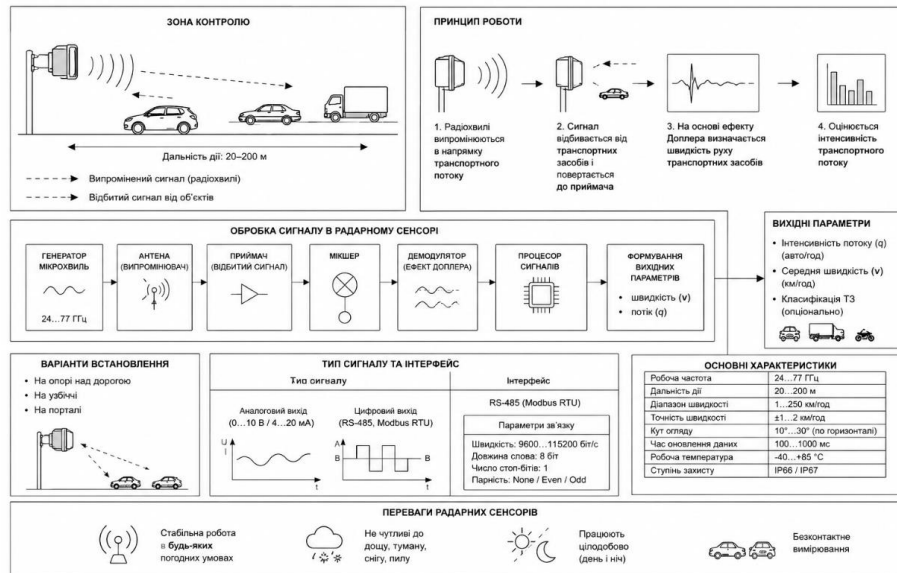


Рисунок А.3 – Структурна схема роботи радарного сенсора RTMS

Радарні сенсори забезпечують вимірювання швидкості руху транспортних засобів незалежно від погодних умов та освітлення.

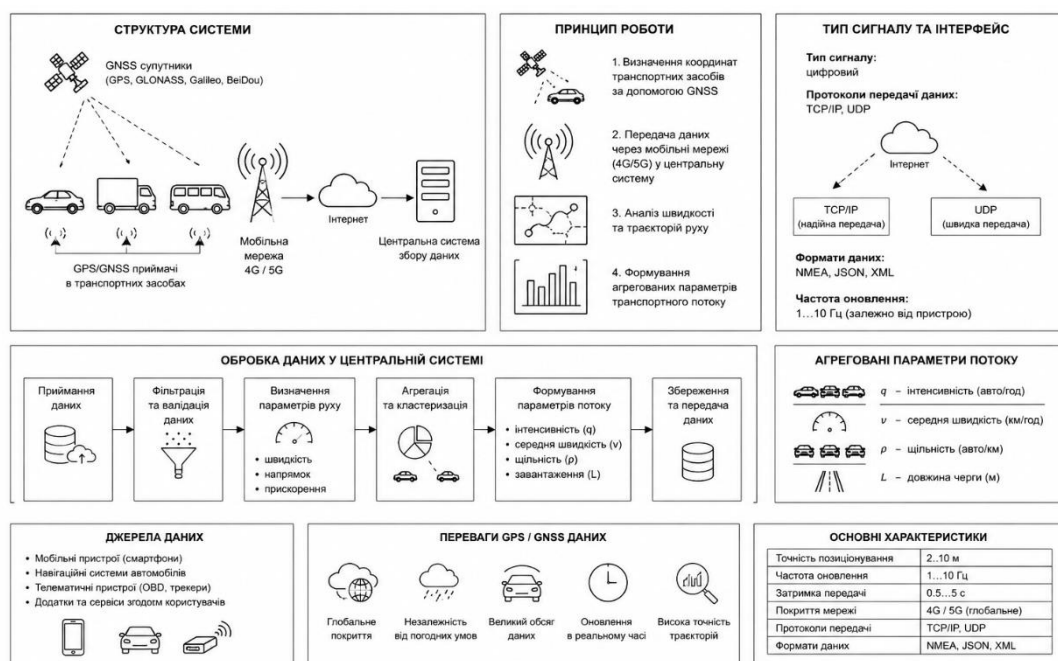


Рисунок А.4 – Структурна схема GPS/GNSS моніторингу транспортних потоків

GPS/GNSS джерела використовуються для визначення координат транспортних засобів, аналізу траєкторій руху та оцінки транспортного навантаження.

Лістинг програмної реалізації MATLAB

У додатку Б наведено фрагменти програмної реалізації адаптивного алгоритму керування транспортними потоками у середовищі MATLAB.

Фрагмент Б.1 – Код моделювання транспортного потоку

```
% ===== Параметри транспортного потоку =====
T_sim = 3600;           % Час моделювання, с
dt = 1;                % Крок часу, с
N = T_sim / dt;        % Кількість кроків

% Базова інтенсивність [авт/год]
lambda_base = 800;
% Імітація коливань інтенсивності
lambda = lambda_base + 200*sin(2*pi*(1:N)/N) + 50*randn(1,N);
lambda = max(lambda, 0); % Не менше нуля

% Середня швидкість [км/год]
v_free = 50;           % Вільна швидкість
k_jam = 120;           % Критична щільність [авт/км]
k = lambda ./ v_free;   % Щільність потоку
v = v_free * (1 - k/k_jam); % Модель Грінберга
```

Фрагмент Б.2 – Алгоритм адаптивного регулювання світлофорного циклу

```
% ===== Адаптивне регулювання =====
C_min = 60;  C_max = 120; % Межі циклу, с
g_min = 15;  g_max = 60;  % Межі зеленої фази, с

C_prev = 90; g_prev = 30; % Початкові значення
queue_history = zeros(1,N); % Масив черг
delay_history = zeros(1,N); % Масив затримок

for t = 1:N
    % 1. Отримання поточних даних
    q_t = lambda(t) / 3600; % авт/с

    % 2. Розрахунок довжини черги (формула Вебстера)
    x = q_t * C_prev / g_prev; % ступінь насичення
    if x < 1
        Q = (q_t*C_prev*(1-g_prev/C_prev)^2) / (2*(1-x));
    else
        Q = q_t * C_prev; % перенасичення
    end
    queue_history(t) = Q;

    % 3. Адаптація тривалості циклу
    C_new = C_min + (C_max-C_min) * (q_t*3600/lambda_base);
```

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

C_new = min(max(C_new, C_min), C_max);
% 4. Розподіл зеленої фази пропорційно потоку
g_new = g_min + (g_max-g_min) * (q_t*3600/lambda_base);
g_new = min(max(g_new, g_min), min(g_max, C_new-15));
% 5. Збереження для наступного кроку
C_prev = C_new; g_prev = g_new;
% 6. Затримка (формула Вебстера-Акселіка)
d = (C_new*(1-g_new/C_new)^2)/(2*(1-x)) + x^2/(2*q_t*(1-x)+1e-6);
delay_history(t) = d;
end

```

Фрагмент Б.3 – Побудова графіків ефективності системи

```

% ===== Візуалізація результатів =====
t_axis = (1:N)*dt;

figure('Name','Результати моделювання','NumberTitle','off');

subplot(2,2,1);
plot(t_axis/60, lambda, 'b-', 'LineWidth', 1.2);
xlabel('Час, хв'); ylabel('Інтенсивність, авт/год');
title('Рис. Д.1 - Зміна інтенсивності транспортного потоку');
grid on;

subplot(2,2,2);
plot(t_axis/60, queue_history, 'r-', 'LineWidth', 1.2);
xlabel('Час, хв'); ylabel('Черга, авт');
title('Рис. Д.2 - Зміна довжини транспортної черги');
grid on;

subplot(2,2,3);
plot(t_axis/60, delay_history, 'g-', 'LineWidth', 1.2);
xlabel('Час, хв'); ylabel('Затримка, с');
title('Рис. Д.3 - Графік часу затримки транспортних засобів');
grid on;

% Порівняння адаптивного та фіксованого керування
delay_fixed = (90*(1-30/90)^2)/(2*(1-0.8)) * ones(1,N);
subplot(2,2,4);
plot(t_axis/60, delay_history, 'b-', t_axis/60, delay_fixed, 'r--',
'LineWidth',1.2);
legend('Адаптивне','Фіксоване');
xlabel('Час, хв'); ylabel('Затримка, с');
title('Рис. Д.4 - Порівняння адаптивного та фіксованого керування');
grid on;

fprintf('Середня затримка (адаптивне): %.2f с\n', mean(delay_history));
fprintf('Середня затримка (фіксоване): %.2f с\n', mean(delay_fixed));
fprintf('Зменшення затримки: %.1f%%\n', (1-
mean(delay_history)/mean(delay_fixed))*100);

```

					ДП.АКІТ. 10658582.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		