

Технічні науки

УДК 004.382

Вороновський Михайло Ігорович

аспірант

Національного університету «Львівська політехніка»

Voronovskyi Mykhailo

Postgraduate of the

Lviv Polytechnic National University

Юрчак Ірина Юріївна

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет «Львівська політехніка»

Yurchak Iryna

Candidate of Technical Sciences, Docent

Lviv Polytechnic National University

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ: ОГЛЯД РІШЕНЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАФІКУ

INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS: AN OVERVIEW OF SOLUTIONS FOR TRAFFIC OPTIMIZATION

Анотація. Дослідження присвячене аналізу сучасних інтелектуальних транспортних систем, спрямованих на оптимізацію трафіку в міських умовах. Розглянуто рішення адаптивного регулювання світлофорів, системи пріоритезації громадського та екстреного транспорту, а також технології автоматичного виявлення інцидентів. Виявлено, що застосування технологій V2X, IoT та штучного інтелекту дозволяє досягти точності прогнозування фаз світлофорів до 98% з похибкою не більше 2 секунд та забезпечити передачу даних із затримкою менше 1 секунди. Системи пріоритету для громадського транспорту

сприяють підвищенню пунктуальності на 10–15% і зменшенню затримок на 20–35%, а адаптивні технології, зокрема SCATS, збільшують пропускну здатність доріг на 5–10%. Автоматичні системи виявлення інцидентів демонструють час реакції від 2 до 3 секунд, що дозволяє оперативно реагувати на надзвичайні ситуації. Отримані результати свідчать про ефективність сучасних систем управління дорожнім рухом у підвищенні безпеки, оптимізації трафіку та зниженні викидів шкідливих речовин.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи, управління дорожнім рухом, адаптивне регулювання, IoT, V2X, штучний інтелект, автоматичне виявлення інцидентів.

Summary. The study analyzes modern intelligent transportation systems aimed at optimizing urban traffic. It examines adaptive traffic light control solutions, as well as systems for prioritizing public and emergency transport and automatic incident detection technologies. The findings reveal that the application of V2X, IoT, and artificial intelligence technologies enables achieving a traffic light phase prediction accuracy of up to 98% with an error margin of no more than 2 seconds, and ensures data transmission with a delay of less than 1 second. Public transport priority systems contribute to improving punctuality by 10–15% and reducing delays by 20–35%, while adaptive technologies, notably SCATS, increase road capacity by 5–10%. Automatic incident detection systems demonstrate a reaction time of 2 to 3 seconds, facilitating prompt responses to emergencies. The results underscore the effectiveness of modern traffic management systems in enhancing safety, optimizing traffic flow, and reducing harmful emissions.

Key words: intelligent transportation systems, traffic management, adaptive control, IoT, V2X, artificial intelligence, automated incident detection.

Вступ. Сучасні перехрестя доріг є важливими вузлами транспортної інфраструктури, де щоденно перетинаються тисячі транспортних засобів і пішоходів. Однак вони часто стають місцями заторів, аварій та інших дорожніх проблем. Основними викликами, що постають перед дорожньою системою, є перевантаженість транспорту, неефективне керування світлофорами, порушення правил дорожнього руху та низька безпека для пішоходів і велосипедистів.

Однією з основних проблем є затори, які виникають через нераціональне регулювання руху, особливо у години пік. Також частими є випадки дорожньо-транспортних пригод (ДТП), що зумовлені недотриманням правил, перевищенням швидкості та неуважністю водіїв. Додатково складнощі створюють старі системи керування світлофорами, які не враховують реальний потік транспорту.

Для вирішення цих проблем активно застосовуються сучасні технології. Інтелектуальні транспортні системи (ITS) використовують штучний інтелект і аналіз даних для адаптивного регулювання світлофорів, що зменшує затори та підвищує ефективність руху. Впровадження «розумних» камер дозволяє автоматично фіксувати порушення ПДР, що сприяє підвищенню дисципліни водіїв. Крім того, датчики руху та системи розпізнавання транспортних засобів допомагають оптимізувати потоки автомобілів у режимі реального часу.

Огляд літературних джерел. Сучасні технології дають змогу значно підвищити ефективність управління дорожнім рухом. Одним із ключових рішень є інтелектуальні світлофори, які використовують штучний інтелект (AI), Інтернет речей (IoT) та інші передові технології. Розглянемо основні підходи до розумного управління перехрестями.

Один із цих підходів є інтелектуальна система управління перехрестями (Smart Traffic Signal Control, STSC). Це система управління світлофорами, яка використовує датчики, камери, штучний інтелект (AI) та

IoT для аналізу та оптимізації транспортних потоків у реальному часі. Основна мета STSC – розумне керування світлофорами на окремих перехрестях, забезпечуючи ефективний розподіл трафіку [1].

Система оснащена сенсорами руху, відеокамерами, GPS та IoT-пристроями, які збирають дані про транспортні засоби, пішоходів та дорожні умови. Інформація передається до центрального обчислювального модуля. Там дані обробляються алгоритмами штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє виявляти затори, аварії або інші аномалії. На основі отриманого аналізу система автоматично коригує роботу світлофорів.

STSC також може працювати у зв'язці з Adaptive Traffic Control System (ATCS), забезпечуючи скоординоване управління світлофорами в масштабах міста [2].

Додатковим рівнем інтеграції є інтелектуальна система управління дорожнім рухом (Intelligent Cross Road Traffic Management System, ICRTMS). Це інтегрована система для управління світлофорами, мета якої оптимізувати потоки транспорту (комплексне управління перехрестями), зменшити затори та підвищити загальну ефективність дорожнього руху.

Система використовує датчики для збору даних про транспортні потоки в реальному часі. Зібрані дані передаються до центрального контролера, який аналізує інформацію та приймає рішення щодо оптимізації роботи світлофорів. Ці пристрої отримують команди від центрального контролера та відповідно змінюють сигнали світлофорів для регулювання руху на перехрестях [3].

Ще одним важливим компонентом є система пріоритету для екстрених транспортних засобів (Emergency Vehicle Priority System, EVPS). Це технологія, призначена для забезпечення безперешкодного та швидкого пересування спеціалізованих служб. Екстрені автомобілі оснащуються спеціальними передавачами або маячками, які передають сигнал про

наближення до перехрестя або світлофора. Сигнал від екстреного транспортного засобу приймається приймачами, встановленими на світлофорах або інших елементах дорожньої інфраструктури. Система управління дорожнім рухом отримує інформацію про наближення екстреного транспортного засобу та визначає його маршрут. На основі отриманих даних система змінює сигнали світлофорів [4].

Важливо також забезпечити ефективний рух громадського транспорту. Тут на допомогу приходить система пріоритету для громадського транспорту (Transit Signal Priority, TSP) — це стратегія, яка дозволяє громадському транспорту отримувати пріоритет на світлофорах, зменшуючи затримки та покращуючи ефективність руху.

Коли транспортний засіб наближається до світлофора, система TSP виявляє його за допомогою вбудованих датчиків або GPS-технологій. Система оцінює, чи потребує транспортний засіб пріоритету, враховуючи такі фактори, як відставання від розкладу, кількість пасажирів або інші умови [5].

Для подальшого вдосконалення управління рухом важливим кроком є впровадження адаптивних технологій для регулювання світлофорів. Адаптивна система управління світлофорами (Adaptive Traffic Control System, ATCS) — це сучасна технологія, яка динамічно регулює роботу світлофорів в масштабах міста на основі реальних умов дорожнього руху.

Система оснащена індукційними петлями, відеокамерами та інфрачервоними сенсорами, які в реальному часі відстежують інтенсивність, швидкість і щільність транспортного потоку. Ці дані надходять до центрального контролера, де спеціальні алгоритми оптимізації визначають оптимальні фази світлофорів з урахуванням часу доби, дорожніх робіт, аварій та інших факторів. Крім того, система може прогнозувати зміни у трафіку, запобігаючи заторам.

Завдяки координації світлофорів по всьому місту, ATCS постійно моніторить ефективність своїх рішень і, за необхідності, вносить коригування в режимі реального часу. Такий підхід забезпечує гнучке реагування на змінні умови, зокрема аварії, погодні умови чи спеціальні події [6].

Постановка задачі. Провести огляд та аналіз наявних рішень для управління транспортними потоками, виявити їхні переваги та недоліки.

Огляд сучасних систем керування дорожнім рухом. На базі теоретичних підходів розроблено ряд систем, що успішно впроваджуються в різних містах світу. Розглянемо декілька прикладів із додатковими деталями:

Audi Traffic Light Information (TLI)

Система являє собою один із прикладів використання V2I (Vehicle-to-Infrastructure) технологій, спрямованих на оптимізацію руху за рахунок інформування водіїв про залишок часу до зміни сигналу світлофора. Ця система надає водіям інформацію про час до зміни сигналу світлофора, допомагаючи їм налаштувати швидкість для потрапляння в "зелену хвилю" та зменшення кількості зупинок на червоний сигнал [7].

Система працює наступним чином: автомобіль, оснащений модулем зв'язку, підключається до інтернету через LTE або 5G. Коли автомобіль наближається до перехрестя, він передає анонімізовані дані на сервери Audi. Ці сервери підключені до центральної системи управління світлофорами міста, отримуючи інформацію про поточний стан сигналів і їх цикли (Рис. 1).

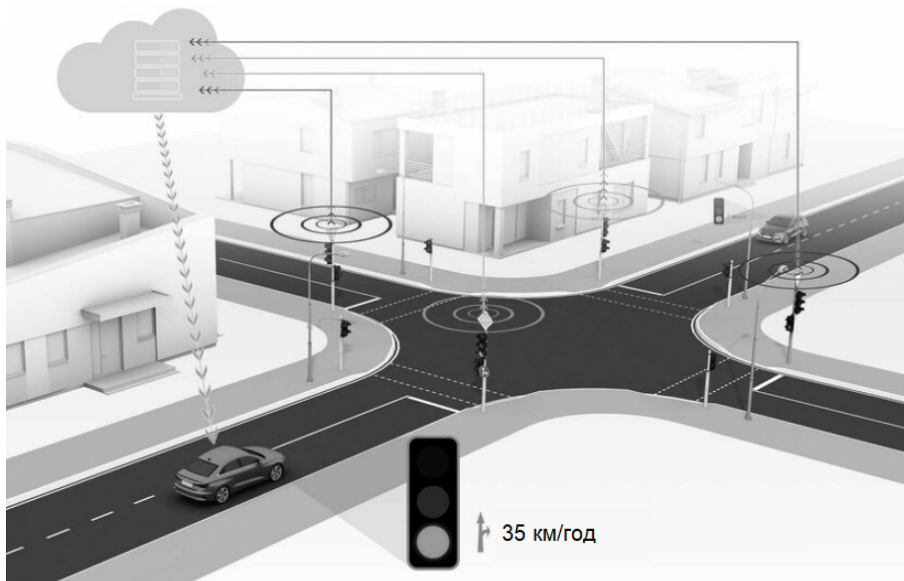


Рис. 1. Візуалізація TLI системи

Далі сервери Audi аналізують отриману інформацію і визначають, коли світлофор змінить свій сигнал. Для цього був розроблений складний аналітичний алгоритм, який обчислює прогнози з трьох основних джерел: програми керування сигналами світлофора; дані в режимі реального часу комп'ютера дорожнього руху, комбінація камер дорожнього руху, детекторних смуг на дорожньому покритті, дані про наближення автобусів і трамваїв і кнопки, які натискають пішоходи; та історичні дані.

Усі ці дані збираються і передаються назад до автомобіля в реальному часі. На панелі приладів або проекційному дисплеї з'являється зворотний відлік часу до зміни сигналу світлофора. Функція Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) рекомендує оптимальну швидкість для того, щоб водій міг потрапити на зелене світло, тим самим зменшуючи кількість зупинок [7].

Розглядаючи систему з точки зору числових показників, можна відзначити досить вражаючі результати. Показники системи подані в Таблиці 1.

Таблиця 1

Показники TLI системи

Показник	Значення	Примітки
Затримка передачі даних про фазу світлофора	< 1 секунда	Бездротова комунікація забезпечує оперативну передачу інформації
Точність прогнозування фаз	до 98%	Пілотні дослідження показали високу точність прогнозування
Похибка відображення часу зміни сигналу	приблизно 2 секунди	Інформація про час до зміни сигналу відображається з невеликою похибкою
Дальність надання даних про майбутню фазу світлофора	до 400 метрів	Дозволяє водіям заздалегідь адаптувати швидкість для безперервного руху або гальмування

Джерело: систематизовано автором на основі [8]

Glance Transit Signal Priority (TSP)

Applied Information пропонує рішення Glance Transit Signal Priority (TSP), яке використовує технології V2I (Vehicle-to-Infrastructure) для забезпечення пріоритету громадському транспорту на світлофорах.

Система працює на основі комунікації між транспортним засобом і світлофорними контролерами. Автобуси чи трамваї оснащуються спеціальним бортовим пристроєм, який забезпечує зв'язок зі світлофорною інфраструктурою. Коли автобус або трамвай наближається до перехрестя, його бортова система автоматично надсилає запит на пріоритет. Для цього використовується GPS-відстеження та бездротовий зв'язок – або через локальну мережу на частоті 900 МГц, або через стільникові мережі, такі як LTE чи 5G. Система реагує на запити щодо пріоритету на світлофорі менш ніж за 1 секунду, що забезпечує оперативне коригування режимів сигналізації.

Отримавши запит, світлофорна система аналізує ситуацію: оцінює поточний стан сигналів, трафік на дорозі та розклад транспорту. Весь процес координується через хмарну платформу Glance Cloud (Рис. 2), яка

дозволяє диспетчерам у реальному часі відстежувати роботу системи, аналізувати дані та вносити коригування. Це рішення не потребує суттєвих змін у світлофорній інфраструктурі, що робить його зручним для впровадження в уже існуючі системи управління трафіком [9].



Рис. 2. Схема передачі даних у платформі Glance Cloud

Нижче наведено таблицю, що узагальнює основні числові показники та ефекти впровадження системи Glance TSP у середньому міському середовищі.

Таблиця 2

Показники Glance TSP системи

Показник	Значення/Ефект	Примітки
Обробка запитів на перехрестя	до 500 запитів за хвилину	Забезпечує оперативну обробку даних, що сприяє ефективному управлінню транспортними потоками
Пунктуальність громадського транспорту	підвищення на 10–15%	Покращення графіку перевезень сприяє підвищенню надійності та зручності перевезень
Зниження затримок на перехрестях	зменшення на 20–30% порівняно зі стандартним режимом роботи світлофорів	Оптимізація роботи світлофорів сприяє зменшенню заторів і поліпшенню загальної ефективності руху

Джерело: систематизовано автором

Automatic Incident Detection System (AID) - Citilog

Citilog — провідний постачальник рішень для автоматичного виявлення інцидентів, що спеціалізується на відеоаналітиці для моніторингу дорожнього руху. Рішення Citilog інтегруються з існуючими камерами спостереження, перетворюючи їх на сенсори для моніторингу та управління дорожнім рухом.

Система працює за чітко визначеним принципом. Камери спостереження, встановлені на дорогах, тунелях та мостах, безперервно фіксують потік транспорту. Отримані відеозаписи обробляються спеціальними алгоритмами, що базуються на технологіях штучного інтелекту та глибокого навчання. Ці алгоритми навчені розпізнавати різні типи транспортних засобів та виявляти потенційно небезпечні ситуації, такі як зупинені автомобілі, рух у неправильному напрямку або присутність пішоходів на проїжджій частині (Рис. 3).

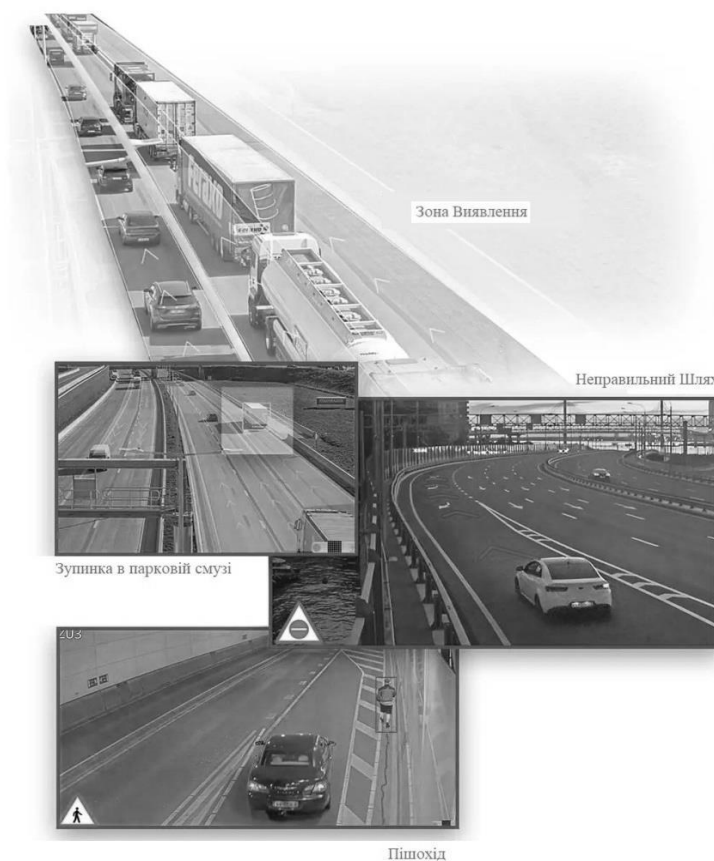


Рис. 3. Виявлення нетипових ситуацій в системі Citilog

Система здатна фільтрувати хибні спрацювання, ігноруючи фактори, що можуть викликати помилкові тривоги, наприклад, тіні, відблиски світла або рух рослинності. У разі виявлення порушення система миттєво надсилає сповіщення до центру управління дорожнім рухом. Це дозволяє операторам швидко реагувати на ситуацію та вживати необхідних заходів для забезпечення безпеки й відновлення нормального руху [10].

За офіційними даними, Citilog демонструє високу ефективність у виявленні дорожніх подій, оперативній передачі даних та аналізі динаміки руху. Наведені показники дозволяють оцінити швидкість реакції, точність і детальність роботи системи.

Таблиця 3

Показники Citilog системи

Показник	Значення/Ефект	Примітки
Час виявлення події	2–3 секунди	Від моменту виникнення дорожньої події
Затримка передачі даних	менше 1 секунди	Дані передаються до диспетчерських центрів практично миттєво
Частота кадрів	до 30 кадрів за секунду	Забезпечує отримання детальної інформації про динаміку руху додаткових сенсорів.
Точність виявлення інцидентів	приблизно 98%	Досягається при належній інтеграції з існуючою інфраструктурою

Джерело: систематизовано автором

Adaptive Traffic Control System (ATCS)

Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) – це один із найпопулярніших прикладів адаптивного управління світлофорами, який використовується в багатьох містах світу. Це інтелектуальна платформа керування дорожнім рухом у реальному часі, яка відстежує, контролює та оптимізує рух людей і транспорту у містах. [11].

Їхня багаторівнева система включає сервери, що використовують певну ієрархію в мережі та встановлюються під конкретний регіон, місто чи вулицю. На найнижчому рівні система складається з контролерів та різного роду девайсів, які розміщені на дорогах та перехрестях. SCATS контролери комунікують з регіональними серверами, які в свою чергу комунікують з центральним менеджером – головним сервером для оптимізації потоків транспорту по всій сітці доріг (Рис. 4).

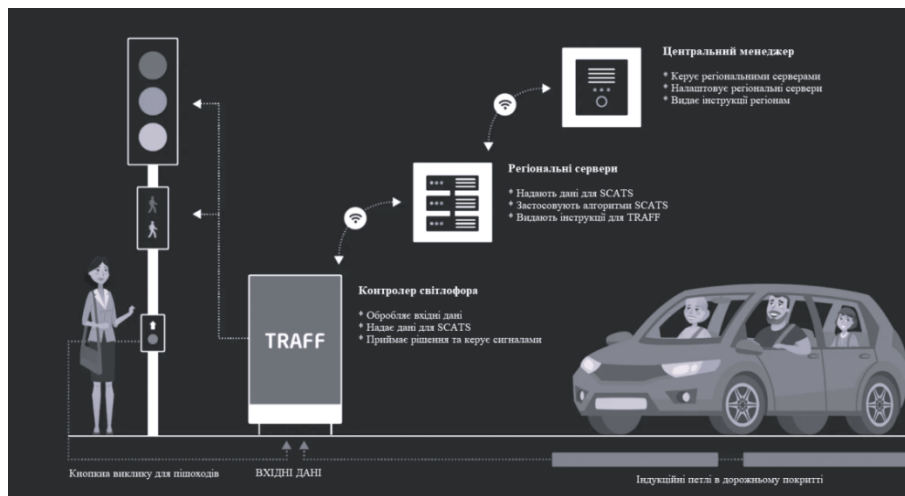


Рис. 4. Багаторівнева система SCATS

Для відслідковування руху транспортних засобів (автомобілів, мотоциклів, велосипедів тощо) дорогами, що входять в мережу SCATS, використовують індуктивні петлі, які розміщуються під дорожнім покриттям перед і безпосередньо на перехрестях. Індуктивна петля детектора транспортних засобів, що врізана в дорожнє покриття має 4,5 м у довжину та 1,7 м у ширину. Наявність автомобілів, що рухаються над індуктивними петлями на кожній смузі під'їзду, а також швидкість і «проміжок» між транспортними засобами – це дані, які SCATS використовує для визначення того, який під'їзд має отримати більше часу на зелене світло. Завдяки повній адаптивності система, якщо її налаштовано відповідним чином, здатна визначати нормальні потоки транспорту та тривалість світлофорних циклів.

Пішоходи в свою чергу можуть бути помічені за допомогою активації кнопок встановлених на пішохідних переходах. Адаптивне регулювання дозволяє більш ефективно розподіляти потік транспорту. Кожного разу як вони натискають на ці кнопки, контролер світлофорів обробляє вхідні сигнали та надсилає дані до мережі SCATS. Після застосування алгоритмів SCATS, контролер отримує у відповідь інструкції, які потрібно виконати безпосередньо на перехресті. Такі інструкції включають тривалість світлових сигналів і послідовність руху [12].

Використовуючи дані, що зібрані в режимі реального часу, SCATS може приймати рішення не лише для рівня перехресть, а і для створення «зелених коридорів» чи оптимізації руху для всього міста.

Таблиця 4

Показники SCATS системи

Показник	Значення/Ефект	Примітки
Прийняття рішень	Управління не лише на рівні перехресть, а й для «зелених коридорів»	Оптимізація міського руху, створення безперебійних маршрутів
Час коригування світлофорів	30–60 секунд	Налаштування здійснюється протягом одного циклу світлофора
Ефекти для дорожнього руху	Зменшення часу переміщення, зниження викидів, підвищення безпеки	Система сприяє економії часу та покращенню екологічної та безпекової ситуації на дорогах
Реагування на зміни в інтенсивності руху	Відповідь вже у наступному циклі	Швидка адаптація до змін інтенсивності руху забезпечує ефективне управління транспортними потоками

Джерело: систематизовано автором

Результати дослідження. У цьому розділі здійснено аналіз призначення, технології, переваг і недоліків різних систем управління дорожнім рухом, які були розглянуті в рамках дослідження. Важливими

критеріями оцінки стали здатність систем до зменшення заторів, підвищення безпеки руху, екологічний ефект та технічні вимоги до їх впровадження.

Кожна з досліджуваних систем має власні унікальні можливості, які визначають її ефективність у певних умовах. Водночас, поряд із перевагами, такі системи мають певні обмеження, зокрема складність інтеграції в існуючу міську інфраструктуру, вартість реалізації та залежність від технологічного середовища. Дані дослідження можна звести у порівняльну таблицю 12.

Таблиця 9

Порівняння найвідоміших систем управління дорожнім рухом

Система	Основне призначення	Технологія	Переваги	Недоліки
Audi Traffic Light Information	Інформація про зміну сигналів світлофора для водіїв	V2I (Vehicle-to-Infrastructure), зв'язок із хмарою	Підвищення комфорту для водіїв. Зниження витрат пального та викидів CO ₂ . Оптимізація часу поїздки.	Доступно лише для автомобілів Audi. Обмежене покриття (потрібна підтримка міст).
Glance	Віддалений моніторинг і керування світлофорами	ІоТ, хмарні обчислення, штучний інтелект	Централізоване управління. Оперативне реагування на зміни. Можливість інтеграції з іншими системами.	Високі вимоги до мережевої інфраструктури. Потребує регулярного обслуговування.
Citilog	Автоматичне розпізнавання інцидентів	Відеоаналітика, AI	Швидке виявлення ДТП та перевантажень. Централізоване управління	Залежність від камер (погода, видимість). Велике споживання обчислювальних ресурсів.
SCATS	Адаптивне	Датчики	Автоматичне	Залежність від

	керування світлофорами	трафіку, AI	налаштування світлофорів. Зменшення заторів. Менше викидів CO ₂	датчиків. Висока складність налаштування.
--	------------------------	-------------	--	--

Джерело: систематизовано автором

Висновки. У ході дослідження було розглянуто сучасні системи управління дорожнім рухом, їхні ключові функціональні можливості, переваги та обмеження. Аналіз показав, що такі технології, як адаптивне регулювання світлофорів, пріоритизація транспорту та відеоаналітика, відіграють важливу роль у підвищенні ефективності міського трафіку. Використання V2X-комунікацій, датчиків руху та штучного інтелекту дозволяє значно скоротити затори, підвищити безпеку дорожнього руху та зменшити шкідливі викиди.

Попри значні переваги, впровадження таких систем потребує значних фінансових вкладень, оновлення інфраструктури та адаптації до умов конкретного міста. Деякі технології, такі як Audi Traffic Light Information, ефективні лише за умови широкого поширення V2X-систем у транспортних засобах. Інші рішення, зокрема SCATS та Citilog, можуть працювати в існуючих умовах, але мають певні обмеження, пов'язані з точністю датчиків і системи аналізу даних.

Таким чином, вибір оптимальної системи управління дорожнім рухом має базуватися на комплексному підході, що враховує технічні можливості, вартість реалізації та специфіку дорожньої мережі. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію різних технологій для створення більш гнучких і ефективних рішень у сфері транспортної інфраструктури.

Література

1. Jacob, M. (2024). Intelligent Traffic Control Using Chronological Flow Analysis of Signal Gaps. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(21s), 2285–2290. <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/5830> (дата звернення: 05.03.2025).
2. Lee, W.-H., & Chiu, C.-Y. (2020). Design and Implementation of a Smart Traffic Signal Control System for Smart City Applications. *Sensors*, 20(2), 508. <https://doi.org/10.3390/s20020508>.
3. Salama, A. S., Saleh, B. K., & Eassa, M. M. (2010). Intelligent cross road traffic management system (ICRTMS). *2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development*, Cairo, Egypt, pp. 27-31, doi: 10.1109/ICCTD.2010.5646059.
4. Asaduzzaman, M., & Vidyasankar K. (2017). A Priority Algorithm to Control the Traffic Signal for Emergency Vehicles. *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, ON, Canada, 1-7. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2017.8288364>.
5. Anderson, P., Walk, M. J., & Simek, Ch. (2020). Transit Signal Priority: Current State of the Practice. *National Academies of Science, Engineering, and Medicine*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25816>.
6. Almawgani, A. H. M. (2018). Design of real-time smart traffic light control system. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 6(4), 43-47.
7. Audi networks with traffic lights in Düsseldorf, «Green wave». (2020). *Green Car Congress newsfeed website*. URL: <https://www.greencarcongress.com/2020/01/20200129-audio2i.html> (дата звернення 08.03.2025).

8. Hawkin, A. J. (2019). Audi's traffic light sensor gives you the power to catch as many green lights as possible. URL: <https://www.theverge.com/2019/2/19/18229947/audi-traffic-light-sensor-green-wave-v2i> (дата звернення 08.03.2025).

9. Mulligan, S. (2024). Applied Information Announces «Works with Glance» to Streamline Smart Cities' Traffic Operations and Connected Vehicle Applications. URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20241113509535/en> (дата звернення 09.03.2025).

10. Intelligent Incident Detection. *Citilog*. <https://www.citilog.com> (дата звернення 09.03.2025).

11. Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS). For today's and tomorrow's challenges, move smarter with SCATS. URL: <https://dlqosl6u8ngtyg.cloudfront.net/s3fs-public/file/cross-content/SCATS%20Core.pdf> (дата звернення 10.03.2025).

12. Vehicle Detector Loops for SCATS. Vehicle Loops - SCATS data collectors. ATC Moving Traffic. URL: <https://www.aldridgetrafficcontrollers.com.au/scats/adaptive-traffic-management/vehicle-detector-loops-for-scats> (дата звернення 10.03.2025).