



[DOI 10.28925/2663-4023.2024.25.89102](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.89102)

УДК 004.75

Данилюк Андрій Геннадійович

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
ORCID ID: 0009-0004-2663-8798
andrii.h.danyliuk@lpnu.ua

Муляревич Олександр Володимирович

к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
ORCID ID: 0000-0002-4644-7962
oleksandr.v.muliarevych@lpnu.ua

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ

Анотація. У статті розглядаються причини та наслідки заторів, описується типова поведінка транспортного потоку та аналізуються різні засоби та методи вирішення проблеми заторів та затримок. Збільшення кількості транспортних засобів спричинило серйозні затори, затримки, збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод та екологічні проблеми, особливо у великих містах. Затори поділяються на періодичні та неперіодичні. Близько половини всіх заторів є періодичними і виникають через недостатню пропускну здатність доріг та перехресть. Неперіодичні затори виникають через тимчасові та непередбачувані причини такі як негода або дорожньо-транспортна пригоди. На основі аналізу методів, використаних у відповідних роботах, наведено класифікацію світлофорних контролерів. Світлофорні контролери поділяються на світлофорні контролери постійного регулювання та адаптивного регулювання. Світлофорні контролери адаптивного регулювання, в свою чергу, поділяються на локальні та мережеві контролери. У статті також розглядаються існуючі кіберфізичні системи керування трафіком та основні технології які в них використовуються. Стаття представляє детальний огляд існуючих кіберфізичних систем керування дорожнім рухом, таких як SEA TCS, InSync і MASSTR. Також наведено порівняльну характеристику цих систем. На основі представленої класифікації світлофорних контролерів запропоновано метод вирішення проблеми заторів і затримок, який полягає у використанні алгоритму оптимізації мурашиної колонії для більш рівномірного розподілу навантаження між перехрестями. Розроблено експериментальну розподілену систему керування дорожнім рухом на основі використання алгоритму оптимізації мурашиної колонії який підвищує доступність і стійкість системи шляхом застосування кількох локальних міні-серверів замість одного віддаленого кластера та має потенціал для зменшення затримок трафіку на 10% і більше.

Ключові слова: адаптивний контроль; затори; дорожній рух; кіберфізична система.

ВСТУП

Транспорт є невід'ємною частиною сучасного світу, без якої був би неможливий технічний і соціальний прогрес [1]. Основним завданням транспорту є повне і своєчасне задоволення потреб економіки і населення в перевезеннях, та прискорення доставки вантажів і переміщення пасажирів на основі значного підвищення пропускну здатності і якості всієї транспортної системи [2]. Кількість автомобілів на дорогах світу з кожним роком зростає [3]. В Україні щорічне зростання автопарку становить близько 10%. Стрімке збільшення кількості автопарків супроводжується збільшенням кількості жертв ДТП. Якщо до початку ХХ століття у світі налічувалося близько шести тисяч автомобілів



[4], то зараз світовий автопарк налічує понад 520 мільйонів одиниць (з яких близько 75% — це автомобілі). Збільшення трафіку та попиту на транспорт спричинило серйозні затори [5], затримки [6], аварії та екологічні проблеми [7], особливо у великих містах. Затори стали справжнім лихом, від якого страждають як промислово розвинені країни, так і країни, що розвиваються [8]. Це впливає як на автомобілістів, так і на користувачів громадського транспорту, а також має негативний наслідок для суспільства — зниження економічної ефективності [9].

На даний час вже розпочато чисельні дослідження в галузі інтелектуальних транспортних систем [10] і розумних світлофорів [11], щоб вирішити ці проблеми. Ці дослідження включають машинне та глибоке навчання [12], генетичний алгоритм [13], нечітку логіку [14], блокчейн [15] і застосування нейронних мереж [16]. Бо Лю і Чжентао Дін запропонували алгоритм розподіленого глибокого навчання з підкріпленням для проблеми керування світлофором, який складається з локального та глобального навчання [12]. У їхньому дослідженні централізоване навчання замінюється агентами розподіленого навчання, які вивчають вибірки даних досвіду своїх сусідів.

Застосування генетичного алгоритму для оптимізації синхронізації сигналів світлофора було запропоновано Дінь Туан Хай, До Ван Мань і Нгуен Мін Нят [13]. У їхній статті була запропонована загальна модель алгоритму на основі викидів [11] для генерації комплексного індексу продуктивності для представлення оптимальної схеми синхронізації сигналу світлофора. Їхня модель показала значне підвищення продуктивності для даних, зібраних з одного перехрестя. Інший алгоритмічний підхід до вирішення проблеми заторів пропонується Абду А. А., Фаррагом Х. М. і А. С. Толбою в статті під назвою «Системи розумного управління трафіком на основі нечіткої логіки» [14]. Ці дослідники запровадили систему контролю дорожнього руху на основі інформації про щільність транспортного потоку і метеорологічні умови, використовуючи методи нечіткої логіки, щоб отримати ідеальний час для кожного перехрестя. Він відкриває дороги на основі щільності в послідовному порядку, а також дає більше часу для кожної дороги залежно від наявності опадів. Багатоагентну систему автономного керування перехрестям (MA-AIM), що використовує технології ЕоТ і блокчейн [15], описали Бузачіс А., Селесті А., Галлета А., Фаціо М., Фортіно Г., Віллари М. Ця система поєднує в собі звязки транспортний засіб — транспортний засіб та інфраструктура — транспортний засіб і зосереджена на безпеці.

Ці роботи послужили основою для даної статті.

Метою статті є вивчення причин і наслідків заторів, огляд методології розрахунку параметрів транспортного потоку, аналіз різних засобів і методів для опису різних підходів до вирішення проблеми заторів і затримок, а також надати класифікацію світлофорів базуючись на типі регулювання. Виходячи з класифікації, вибрати підхід, який допоможе зменшити затримки та зменшити кількість викидів від спалювання палива автомобілями в типовому місті-мільйоннику. Розробити експериментальну систему, яка реалізовуватиме алгоритм оптимізації мурашиної колонії, і порівняти результати з іншими централізованими системами керування трафіком. Продемонструвати розроблену експериментальну систему з використанням алгоритму оптимізації мурашиної колонії (ACO), який підвищує доступність і стійкість системи шляхом застосування кількох локальних міні-серверів замість одного віддаленого кластера та має потенціал для зменшення затримок трафіку на 10% і більше.

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ

Затори діляться на дві категорії: періодичні та неперіодичні. Близько половини всіх заторів є періодичними та виникають через недостатню пропускну здатність доріг та перехресть. Неперіодичні затори можна описати як тимчасові завади — метеорологічні умови чи наявність дорожньо-транспортних пригод. Причини заторів можна розділити на чотири конкретні категорії:

1. Метеорологічні умови (неперіодичні);
2. Механічні несправності (неперіодичні);
3. Людський фактор (неперіодичний);
4. Інфраструктурні умови (періодична).

Найпоширенішим місцем скупчення в місті є перехрестя. Перехрестя є ключовим транспортним вузлом міста і залежно від категорій вулиць, що перетинаються, поділяється на нерегульоване, кільцеве та регульоване. Регульоване перехрестя — це перехрестя, порядок проїзду якого регулюється сигналами світлофора або регулювальника. Схема регульованого перехрестя наведена на рис. 1., де цифри від 0 до 11 відповідають окремі смуги руху, а дозволені напрямки руху позначені стрілками.

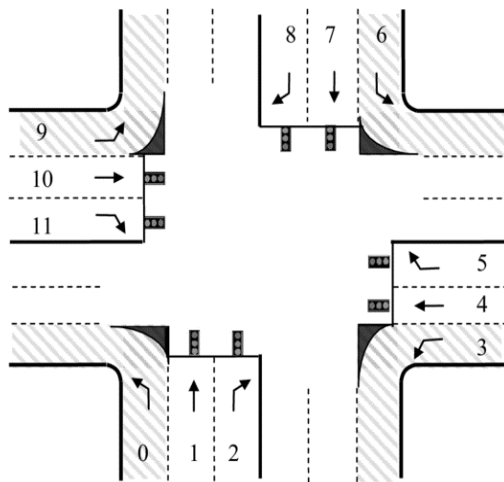


Рис. 1. Схема регульованого перехрестя

Робота світлофорів на регульованих перехрестях безпосередньо впливає на транспортний потік, що проходить через перехрестя за певний проміжок часу (пропускна здатність перехрестя). Пропускна здатність однієї смуги на перехресті визначається при швидкості руху на перехресті $V = 30$ км/год за формулою:

$$P = \frac{3600(t - \frac{V}{26a})}{t * T}, \quad (1)$$

де t — тривалість зеленої фази світлофора; T — тривалість роботи світлофора.

За видами світлофорного регулювання світлофорні контролери діляться на дві категорії:

- Світлофорний контролер з постійним регулюванням;
- Світлофорний контролер з адаптивним регулюванням.

Світлофорний контролер з постійним регулюванням працює в однаковому режимі незалежно від дня тижня, заторів і часу доби. Такий світлофор нечутливий до постійних змін дорожньої обстановки на перехресті. Таким чином, усі транспортні засоби на всіх ділянках руху мають фіксований час проходження регульованих перехресть та

однаковий пріоритет руху. У разі зміни кількості транспортних засобів, що проїжджають через перехрестя за одиницю часу, світлофор постійного регулювання викликає скупчення в черзі великої кількості транспортних засобів, не оптимально розподіляючи їх пріоритетність руху. Зазначений підхід до розподілу збільшує час затримки, що характеризується кількістю транспортних засобів, які в'їжджають на перехрестя та виїжджають з нього за період вимірювання.

На основі попередніх робіт, які послужили основою для цієї статті, підготовлена схема класифікації світлофорних контролерів, яка показана на рис. 2. Відповідно до цієї схеми, найбільш ефективним методом вирішення проблеми заторів і затримок є використання кіберфізичних систем регулювання транспортного потоку в поєднанні з різними дорожніми детекторами, світлофорними контролерами з динамічним мережовим адаптивним режимом регулювання та реалізацією різних алгоритмів (генетичного/блокчейн/нечіткої логіки). З урахуванням обраного методу буде розроблено експериментальну модель з використанням алгоритму оптимізації мурашиної колонії.

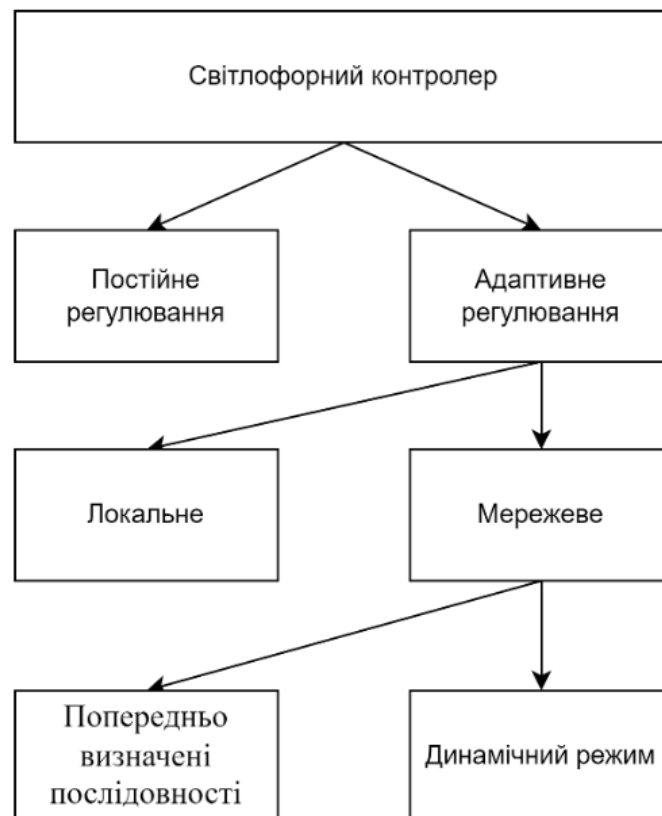


Рис. 2. Класифікація світлофорних контролерів

Світлофорний контролер з адаптивним регулюванням змінює режим роботи для більш ефективної організації дорожнього руху з урахуванням зміни дорожньої обстановки. Адаптивне регулювання покликане оптимізувати роботу світлофора, щоб не подавати зелений сигнал у напрямку, де нікого немає, а також більш ефективно розподіляти потік автомобілів. Так як режим роботи світлофора безпосередньо впливає на пропускну здатність перехрестя, адаптивне управління дозволяє збільшити цей параметр.

Світлофорні контролери з адаптивним регулюванням можна розділити на локальні та мережеві. У локальному адаптивному режимі перехрестя контролюється за показаннями детекторів транспорту і коригування здійснюється незалежно від стану сусідніх перехресть. В мережевому адаптивному режимі відбувається обмін даними між суміжними перехрестями, за рахунок чого управління узгоджено і забезпечує більшу ефективність. Мережеві адаптивні режими, в свою чергу, діляться на два види:

- вибірка з попередньо визначених керуючих послідовностей;
- динамічний режим.

Кіберфізичні системи, що реалізують динамічні адаптивні режими, є найбільш складними та дорогими, оскільки потребують великої кількості транспортних детекторів, а також складного програмування та налагодження. Такі системи в режимі реального часу оцінюють інтенсивність руху, пропускну спроможність і розподіл транспортного потоку за напрямками руху при виборі оптимального режиму роботи світлофорів. Динамічний адаптивний режим найчастіше використовується в районах з високою щільністю перехресть. Динамічні системи також дозволяють реалізувати принцип зеленої хвилі.

Зелена хвиля — режим світлофора, при якому зелене світло горить на всій вулиці, що дозволяє транспортним засобам максимально швидко проїхати відрізок, а не їхати від перехрестя до перехрестя, чекаючи своєї черги на світлофорі.

Кіберфізичні системи, що реалізують динамічні адаптивні режими, називаються автоматизованими системами керування дорожнім рухом. У загальному вигляді автоматизовані системи управління дорожнім рухом можна представити як сукупність дорожньо-телематичних пристроїв, контролерів і автоматизованих алгоритмів, включених в мережу обміну даними, з організацією центральних і локальних центрів управління — в залежності від щільності та інтенсивності руху.

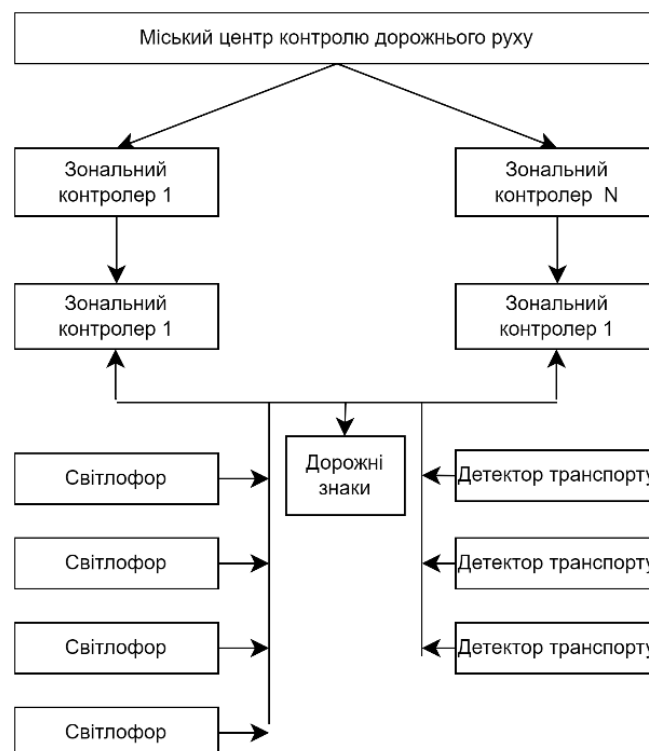


Рис 4. Структура АСУ ТП



На рис. 4 зображено типову структуру автоматизованої системи керування дорожнім рухом. Вона має ієрархічну структуру та містить міський диспетчерський центр, різні контролери зон високого рівня, контролери доріг середнього рівня та контролери світлофорів низького рівня. Контролери світлофорів пов'язані з контрольованими дорожніми знаками, а також з різними видами транспортних детекторів.

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

Транспортний потік — це сукупність транспортних засобів, які одночасно беруть участь у русі на певній ділянці вулично-дорожньої мережі. З розвитком методів і обладнання для дослідження транспортних потоків продовжує розширюватися спектр показників, що використовуються в організації дорожнього руху. Найнеобхіднішими і часто використовуваними є:

1. Швидкість

Швидкість розглядається як показник якості подорожі, коли водії та пасажери більше стурбовані швидкістю подорожі, ніж конструктивними аспектами руху. Визначається як швидкість переміщення на відстань за одиницю часу. Математично представлено як:

$$v = \frac{d}{t}, \quad (2)$$

де v — швидкість транспортного засобу в м/с, d — відстань, пройдена в м за час t секунд.

Швидкості різних транспортних засобів відрізнятимуться в часі та просторі. Існує кілька типів швидкості, які представляють ці відмінності. Найважливішими з них є швидкість точки, швидкість руху, середня швидкість у часі та середня швидкість у просторі.

2. Щільність

Щільність визначається як кількість транспортних засобів, що займають дану довжину шосе або смуги, і зазвичай виражається як транспортні засоби на кілометр. Математично представлено як:

$$k = \frac{n_x}{x}, \quad (3)$$

де x — довжина дороги, n_x — кількість машин на дорозі.

Щільність руху на ділянці дороги дорівнює кількості транспортних засобів між пунктами пунктами спостереження А і В, поділений на відстань між пунктами спостереження А і В.

3. Обсяг транспортних засобів

Кількість транспортних засобів визначається як кількість транспортних засобів, які проїжджають точкою на шосе або певною смугою за певний період. Математично представлено як кількість транспортних засобів/годину:

$$q = \frac{n_t}{t}, \quad (4)$$

де n_t — кількість транспортних засобів, що перетинають точку смуги за певний проміжок часу t .



ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ АДАПТИВНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ

Детектори транспорту дозволяють отримати дані про наявність транспорту на ділянці дороги, такі транспортні параметри, як швидкість і відстань до сусіднього транспортного засобу. Детектори транспорту для адаптивних систем керування дорожнім рухом поділяються на індукційні, відеодетектори, тепловізори та радары. Використання індукційних сповіщувачів засноване на принципі електромагнітної індукції. Щоб встановити такі сповіщувачі, нам потрібно зняти частину тротуару та встановити сповіщувачі. Індуктивні сповіщувачі часто виходять з ладу разом з тротуаром і також потребують регулярного обслуговування. Проблема використання індукційних детекторів полягає в неможливості швидко усунути несправність і наявність помилкових показань.

Такі детектори, як відео детектори, тепловізори та радары, не потребують такого технічного обслуговування, як індукційні детектори. Однак відео детектор покладається на об'єкт, який може не надавати цю інформацію за наявності перешкод, таких як погана погода, погана видимість автомобіля на дорозі, тіні, перехідні періоди денного світла, відблиски сонця та фари.

Інші транспортні детектори включають інфрачервоні та телевізорні пристрої. Існують два типи інфрачервоних детекторів — активні і пасивні. Активні інфрачервоні датчики працюють за рахунок передачі енергії від світлодіодів або лазерних діодів. В обох типах детекторів світлодіод або лазерний діод освітлює ціль, а відбита енергія фокусується на детекторі, що складається з пікселя або масиву пікселів. Після цього виміряні дані обробляються за допомогою різних алгоритмів обробки сигналів для вилучення потрібної інформації. Активні інфрачервоні сповіщувачі дають дані про кількість, швидкість автомобіля вночі та вдень. Тип лазерного діода також можна використовувати для класифікації автомобілів, оскільки він надає дані про форму автомобіля.

Пасивний інфрачервоний детектор виявляє енергію, випромінювану об'єктами в полі зору, і може використовувати алгоритми обробки сигналів для отримання потрібної інформації. Переваги інфрачервоних детекторів в тому, що вони можуть працювати як вдень, так і вночі, а також їх можна встановлювати як на узбіччі, так і над дорогою. Недоліком є те, що інфрачервоні датчики можуть бути чутливими до несприятливих погодних умов.

Тепловізійні пристрої не можуть надати точне зображення в разі екстремальних температур або перешкод, наприклад теплових тіней, і можуть помилково враховувати транспортні засоби з нестандартними тепловими сигнатурами, наприклад електромобілі.

На відміну від відеодетекторів або тепловізорів, радарні детектори можуть забезпечувати більш високу точність сигналу навіть за слабкого освітлення, сильної спеки чи несприятливих погодних умов, незалежно від типу транспортного засобу чи зносу дорожнього покриття. Радарні детектори використовують безперервний, частотно- або фазово-модульований сигнал для визначення часу затримки сигналу зворотного зв'язку, таким чином обчислюючи відстань до виявленого автомобіля.



АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ

У світі є чимало прикладів успішного застосування кіберфізичних систем контролю трафіку. Серед них такі:

- Система інформування пасажирів у поєднанні з автоматизованою системою управління дорожнім рухом (Гельсінкі, Фінляндія) дозволила скоротити загальну затримку на 44–48%, середній час у дорозі на 11%, а втрати часу — на 35800–67500 людино-годин в рік;
- Створення адаптивної системи управління дорожнім рухом (Лос-Анджелес, Окланд, США) зменшило кількість загальних зупинок транспорту на 28–41%.
- Впровадження адаптивної системи керування світлофорами з пріоритетом громадського транспорту (Лондон, Великобританія) зменшило середню затримку автобуса на 7–13%.
- Пріоритетна система для громадського транспорту (Саутгемптон, Великобританія) знизилася споживання палива автобусами на 13%, тим самим знизивши загальний рівень викидів на 15%.
- Екологічний ефект відбувається за рахунок зменшення викидів шкідливих речовин (переважно в атмосферу) та зниження рівня шуму в містах з розвинутою транспортною мережею.
- Система пріоритету громадського транспорту, запроваджена в Саутгемптоні, Великобританія, зменшила споживання палива автобусами на 13%, зменшивши загальні викиди з 13% до 15%.

Прикладами адаптивних систем керування дорожнім рухом в Україні та світі є:

1. SEA TCS — українська автоматизована система керування дорожнім рухом, розроблена компанією SEA, яка дозволяє одночасно регулювати дорожній рух, контролювати роботу світлофорів та керувати вуличним освітленням. Для управління світлофорами використовуються сертифіковані домашні регулювальники (SEA RTC — Road Traffic Controller). Дані пристрої відповідають всім вимогам ДСТУ 4157:2003 «Технічні периферійні засоби автоматизованих систем керування дорожнім рухом». Виконання загальносистемних і серверних функцій, обробка та обмін даними, функціонування програмних модулів, WEB-сервера, дорожніх контролерів і системи в цілому забезпечується програмним забезпеченням SEA TCS, яке включає вбудоване програмне забезпечення для ПК, WEB-інтерфейс і базу даних.

2. InSync — це адаптивна система управління трафіком, розроблена Rhythm Engineering. Система використовує сучасні сенсорні технології, обробку зображень і штучний інтелект. Ці елементи інтегровані в систему, яка автоматично оптимізує сигнали світлофорів і за потреби координує сигнали світлофорів уздовж доріг з твердим покриттям у режимі реального часу. InSync використовує розподілену мережеву архітектуру, яка дозволяє підключати контролери до великої кількості перехресть.

3. MASSTR — це адаптивна система управління дорожнім рухом, розроблена на замовлення Комісії Медоуз штату Нью-Джерсі для території площею 40 квадратних миль району Нью-Джерсі Медоуз. Технологія адаптивного управління сигналом регулює тривалість циклів світлофора. Ця регіональна інтелектуальна транспортна система включає понад 128 світлофорів і обслуговує понад 400 тис. транспортних засобів щодня. MASSTR є одним із кількох проектів інтелектуальних транспортних систем, які розгортаються по всьому Нью-Джерсі. MASSTR є четвертим за величиною



розгортанням SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic Adaptation System) у Сполучених Штатах.

Детальне порівняння згаданих адаптивних систем керування дорожнім рухом наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння адаптивних систем керування дорожнім рухом

	SEA TCS	InSync	MASSTR
Мета	Мінімізація затворів та затримок. Контроль вуличного освітлення	Мінімізація затворів та виявлення шаблонів руху.	Мінімізація затворів та споживання палива
Архітектура	Клієнт-серверна, вбудоване ПЗ	Клієнт-серверна, вбудоване ПЗ	Клієнт-серверна, вбудоване ПЗ
Детектори	Детектори вихлопу, індукційні детектори	Радарні детектори	Відеокамери
Режим зеленої хвилі	Підтримується	Підтримується	Підтримується
Динамічна адаптація	Не підтримується	Підтримується	Не підтримується
Обрахунок параметрів транспортних потоків	Одне перехрестя як окремих вузол	Одне перехрестя як окремих вузол	Одне перехрестя як окремих вузол

Зазначені системи мають спільні цілі та архітектурні підходи, використовують детектори для розрахунку параметрів транспортного потоку та підтримують режим зеленої хвилі. Показано, що зазначені системи керування дорожнім рухом обробляють транспортний потік поблизу окремого перехрестя. Одним із способів вдосконалення цього підходу є використання оптимізації мурашиної колонії для більш рівномірного розподілу трафіку.

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ В КЕРУВАННІ ДОРОЖНІМ РУХОМ

Загальний підхід полягає в тому, щоб представити мережу руху у вигляді графа, де перехрестя є вузлами, а дороги — краями. Кожне ребро має пов'язані параметри, такі як відстань, потік трафіку та затримка. Мурахи в алгоритмі АСО представляють агентів трафіку. Вони рухаються по краях графіка (дороги) і відкладають цифрові мітки на основі якості маршруту (наприклад, низька затримка, менше зупинок). Мурахи воліють слідувати шляхами з більшою концентрацією цифрових міток. Спочатку рівні цифрових міток на всіх краях встановлені на невеликі значення. Мурахи розгортаються з різних перехресть. Кожна мураха вибирає шлях імовірно, залежно від рівня цифрових міток і евристичної інформації (наприклад, відстані). Після того, як мураха завершує свою подорож, кількість цифрових міток, що осідає на кожному краю, пропорційна якості шляху (наприклад, обернено пропорційна затримці або зупинці).

Цифрові мітки з часом зникають, щоб запобігти застою. Протягом кількох ітерацій мурахи досліджують різні шляхи, поступово зближуючись до більш ефективних маршрутів.



Оскільки мурахи знаходять кращі шляхи з меншою кількістю зупинок, концентрація феромонів на цих шляхах зростає, залучаючи більше мурах досліджувати їх. Час сигналу світлофора коригується на основі накопичених рівнів цифрових міток.

На основі схеми класифікації світлофорного контролера та обраних методів розроблено експериментальну систему. На відміну від загальноприйнятої ієрархічної структури автоматизованих систем керування дорожнім рухом, у розробленій системі централізований підхід із використанням міського центру управління дорожнім рухом замінено на децентралізований підхід із використанням розподілених вузлів прийняття рішень.

Були проведені експериментальні розрахунки з такою конфігурацією: кількість вузлів перетину 5, мінімальний зелений час 5 с, максимальний зелений час 30 с, весь червоний час 2 с, мінімальний прогрес 2 с, час розширення 1 с. Для представлення різних можливих сценаріїв розрахунку параметрів транспортного потоку для різних значень швидкості, щільності та кількості транспортних засобів (що відповідає ранковим, обіднім та вечірнім дорожнім умовам) були проведені розрахунки з такими конфігураціями: час моделювання 1 год; швидкість 40 км/год, 20 км/год, 10 км/год; кількість транспортних засобів для проїзду перехрестя: 100, 200, 300.

Порівняння результатів між розробленою децентралізованою експериментальною системою та централізованою системою наведено в табл. 2:

Таблиця 2

Порівняння централізованих і децентралізованих систем управління дорожнім рухом

Підхід	Швидкість транспорту	Кількість транспорту	Зменшення зупинок	Зменшення затримок
Централізований	40 км/год	100	11.5%	15%
Централізований	20 км/год	200	16%	18%
Централізований	10 км/год	300	17.5%	21%
Децентралізовано з АСО	40 км/год	100	22%	28%
Децентралізовано з АСО	20 км/год	200	25%	35%
Децентралізовано з АСО	10 км/год	300	29%	39%

Аналізуючи експериментальні розрахунки, було виявлено, що децентралізовані адаптивні системи керування дорожнім рухом, які використовують алгоритм оптимізації мурашиної колонії, розподіляють трафік більш рівномірно, а зупинки та затримки зменшуються більш ніж на 10% порівняно з іншими системами централізованого керування дорожнім рухом.

Використовуючи алгоритм мурашиної колонії в адаптивних системах керування дорожнім рухом, ми можемо очікувати зменшення кількості зупинок транспортних засобів на перехрестях, що призведе до більш плавного руху транспорту та скорочення часу в дорозі. Ступінь удосконалення залежить від різних факторів, таких як складність дорожньої мережі, набір даних, наданий опитуваннями щодо дорожнього руху, схеми руху та ефективність поточної реалізації АСО



ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У статті розглядаються причини та наслідки заторів, аналізуються різні засоби та методи вирішення проблеми заторів та затримок. Світлофор з контролером постійного регулювання не є досконалим і має низку недоліків, серед яких накопичення великої черги автомобілів у разі зміни інтенсивності руху. Це призводить до збільшення затримок при перетині перехрестя і, як наслідок, до заторів. Світлофор з контролером адаптивного режиму змінює режим роботи відповідно до поточної дорожньої ситуації.

На основі аналізу методів, використаних у відповідних роботах, наведено класифікацію світлофорних контролерів. Використовуючи представлену класифікацію світлофорних контролерів, обрано оптимальні методи вирішення проблеми заторів і затримок.

На основі обраних методів розроблено експериментальну систему управління розподіленім трафіком, яка реалізує алгоритм оптимізації мурашиної колонії. У порівнянні з іншими централізованими системами представлена система показала зниження зупинок на 8–11% і затримок на 13–17%.

У майбутніх дослідженнях можна також вивчити застосування різних варіацій алгоритму оптимізації мурашиної колонії у сфері адаптивних систем керування трафіком.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdou, A. A., Farrag, H. M., & Tolba, A. S. (2022). A Fuzzy Logic-Based Smart Traffic Management Systems. *Journal of Computer Science*, 18(11), 1085–1099. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2022.1085.1099>
2. Wang, F., Tang, K., Li, K., Liu, Z., & Zhu, L. (2019). A Group-Based Signal Timing Optimization Model Considering Safety for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2747569>
3. Buzachis, A., Celesti, A., Galletta, A., Fazio, M., Fortino, G., & Villari, M. (2020). A multi-agent autonomous intersection management (MA-AIM) system for smart cities leveraging edge-of-things and Blockchain. *Information Sciences*, (522), 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.02.059>
4. Atta, A., Abbas, S., Khan, M. A., Ahmed, G., & Farooq, U. (2020). An adaptive approach: smart traffic congestion control system. *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 32 (9), 1012–1019. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.10.011>
5. Bailke, P., & Divekar, S. (2022). Real-time moving vehicle counter system using OpenCV and Python. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 6(11), 190–194. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2022.v06i11.036>
6. Fastiuk, Y., Bachynskyy, R., & Huzynets, N. (2021). Methods of Vehicle Recognition and Detecting Traffic Rules Violations on Motion Picture Based on OpenCV Framework. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 4(2), 105–111. <https://doi.org/10.23939/acps2021.02.105>
7. Hai, D. T., Manh, D. V., & Nhat, N. M. (2022). Genetic algorithm application for optimizing traffic signal timing reflecting vehicle emission intensity. *Transport Problems*, 17(1), 5–16. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.01>
8. Liu, B., & Ding, Z. (2022). A distributed deep reinforcement learning method for traffic light control. *Neurocomputing*, (490), 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.11.106>
9. Liu, K., & Feng, T. (2023). Heterogeneous traffic flow cellular automata model mixed with intelligent controlled vehicles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (632). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129316>
10. Alkhatib, A. A. A., Maria, A. K., & AlZu`bi, S. (2022). Smart Traffic Scheduling for Crowded Cities Road Networks. *Egyptian Informatics Journal*, 23(4), 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.10.002>
11. Wang, Y., Jiang, Y., Wu, Y., & Yao, Z. (2024). Mitigating traffic oscillation through control of connected automated vehicles: A cellular automata simulation. *Expert Systems with Applications*, (235). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121275>



12. Yao, Z., Li, L., Liao, W., & Wang, Y. (2024). Optimal lane management policy for connected automated vehicles in mixed traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (637). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129520>
13. Noaen, M. M., Naik, A., Goodman, L., & Crebo, J. (2022). Reinforcement learning in urban network traffic signal control: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, 1 (8), 16830. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116830>
14. Zhao, X. M., Chen, Y. H., & Zhao, H. (2018). Robust approximate constraint following control for autonomous vehicle platoon systems. *Asian J. Control*, 20 (4), 1611–1623. <https://doi.org/10.1002/asjc.1676>
15. Wang, H., & Zhang, X. (2021). Real-time vehicle detection and tracking using 3D LiDAR. *Asian Journal of Control*. <https://doi.org/10.1002/asjc.2519>

**Andrii Danyliuk**

PhD student of the Electronic Computing Machines Department
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0009-0004-2663-8798
andrii.h.danyliuk@lpnu.ua

Oleksandr Muliarevych

PhD, Associate Professor at the Department,
Department of Electronic Computing Machines
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-4644-7962
oleksandr.v.muliarevych@lpnu.ua

METHODS AND MEANS OF TRAFFIC FLOW CONTROL

Abstract. The article examines the causes and consequences of traffic jams, describes the types of traffic flow behavior, and analyzes various means and methods of solving the problem of traffic jams and delays. The increased number of vehicles has caused severe congestion, delays, traffic accidents, and environmental issues, especially in large cities. Traffic jams are divided into periodic and non-periodic. About half of all traffic jams are short and are caused by insufficient capacity of roads and intersections. Intermittent traffic jams occur for temporary and unpredictable reasons such as bad weather or traffic accidents. The classification of traffic light controllers is given based on the analysis of the methods used in the relevant works. Traffic light controllers are divided into controllers with constant and adaptive regulation. In turn, traffic light controllers of adaptive regulation are divided into local and network controllers. The article also examines existing cyber-physical traffic management systems and the leading technologies they use. The paper reviews existing cyber-physical traffic management systems such as SEA TCS, InSync, and MASSTR. Comparative characteristics of these systems are also given. Based on the presented classification of traffic light controllers, a method of solving the problem of traffic jams and delays is proposed, which consists of using the ant colony optimization algorithm for a more even distribution of the load between intersections. An experimental distributed traffic management system based on an ant colony optimization algorithm has been developed, which increases the availability and stability of the system by using several local mini-servers instead of one remote cluster and can potentially reduce traffic delays by 10% or more.

Keywords: adaptive control; congestions; traffic flow; cyber-physical system.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Abdou, A. A., Farrag, H. M., & Tolba, A. S. (2022). A Fuzzy Logic-Based Smart Traffic Management Systems. *Journal of Computer Science*, 18(11), 1085–1099. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2022.1085.1099>
2. Wang, F., Tang, K., Li, K., Liu, Z., & Zhu, L. (2019). A Group-Based Signal Timing Optimization Model Considering Safety for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2747569>
3. Buzachis, A., Celesti, A., Galleta, A., Fazio, M., Fortino, G., & Villari, M. (2020). A multi-agent autonomous intersection management (MA-AIM) system for smart cities leveraging edge-of-things and Blockchain. *Information Sciences*, (522), 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.02.059>
4. Atta, A., Abbas, S., Khan, M. A., Ahmed, G., & Farooq, U. (2020). An adaptive approach: smart traffic congestion control system. *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 32 (9), 1012–1019. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.10.011>
5. Bailke, P., & Divekar, S. (2022). Real-time moving vehicle counter system using OpenCV and Python. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 6(11), 190–194. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2022.v06i11.036>



6. Fastiuk, Y., Bachynskyy, R., & Huzynets, N. (2021). Methods of Vehicle Recognition and Detecting Traffic Rules Violations on Motion Picture Based on OpenCV Framework. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 4(2), 105–111. <https://doi.org/10.23939/acps2021.02.105>
7. Hai, D. T., Manh, D. V., & Nhat, N. M. (2022). Genetic algorithm application for optimizing traffic signal timing reflecting vehicle emission intensity. *Transport Problems*, 17(1), 5–16. <https://doi.org/10.20858/tp.2022.17.1.01>
8. Liu, B., & Ding, Z. (2022). A distributed deep reinforcement learning method for traffic light control. *Neurocomputing*, (490), 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.11.106>
9. Liu, K., & Feng, T. (2023). Heterogeneous traffic flow cellular automata model mixed with intelligent controlled vehicles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (632). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129316>
10. Alkhatib, A. A. A., Maria, A. K., & AlZu`bi, S. (2022). Smart Traffic Scheduling for Crowded Cities Road Networks. *Egyptian Informatics Journal*, 23(4), 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.10.002>
11. Wang, Y., Jiang, Y., Wu, Y., & Yao, Z. (2024). Mitigating traffic oscillation through control of connected automated vehicles: A cellular automata simulation. *Expert Systems with Applications*, (235). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121275>
12. Yao, Z., Li, L., Liao, W., & Wang, Y. (2024). Optimal lane management policy for connected automated vehicles in mixed traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (637). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129520>
13. Noaeen, M. M., Naik, A., Goodman, L., & Crebo, J. (2022). Reinforcement learning in urban network traffic signal control: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, 1 (8), 16830. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116830>
14. Zhao, X. M., Chen, Y. H., & Zhao, H. (2018). Robust approximate constraint following control for autonomous vehicle platoon systems. *Asian J. Control*, 20 (4), 1611–1623. <https://doi.org/10.1002/asjc.1676>
15. Wang, H., & Zhang, X. (2021). Real-time vehicle detection and tracking using 3D LiDAR. *Asian Journal of Control*. <https://doi.org/10.1002/asjc.2519>

