

© А. А. Кашканов, докт. техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, ORCID: 0000-0003-3294-6135, e-mail: a.kashkanov@gmail.com;  
 © О. В. Пальчевський, аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, ORCID: 0000-0003-3171-2740, e-mail: palchevskiy.o@gmail.com (Вінницький національний технічний університет)

© Andriy Kashkanov, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, ORCID: 0000-0003-3294-6135, e-mail: a.kashkanov@gmail.com;  
 © Oleh Palchevskiy, Post-Graduate Student, Faculty of Automobiles and Transport Management ORCID: 0000-0003-3171-2740, e-mail: palchevskiy.o@gmail.com (Vinnytsia National Technical University)

## РОЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ В ПОБУДОВІ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНОЮ МЕРЕЖЕЮ

### THE ROLE OF A COMPREHENSIVE APPROACH IN BUILDING AN EFFECTIVE INTELLIGENT TRAFFIC FLOW MANAGEMENT SYSTEM

**Анотація.** Стале зростання кількості мешканців великих міст, інтенсивний розвиток економіки та збільшення кількості автомобілів на дорогах – це те, що призводить до перевантаження транспортних мереж, яке веде до утворення транспортних заторів. Ці затори спричиняють значні затримки в русі, збільшують витрати часу та пального, а також мають негативний вплив на навколишнє середовище. Для вирішення цієї проблеми у великих містах варто застосовувати інтелектуальні системи управління транспортними потоками. Варіативність методик, покладених в їхню основу, суттєво відрізняється залежно від початкової мети. Однак ресурс таких окремих методик із часом вичерпується, що змушує шукати та реалізовувати нові. В основі швидкої втрати ефективності роботи таких систем лежить відсутність єдиного централізованого вузла, що здійснює комунікацію систем між собою та управління ними. Тобто поєднання інтелектуальних методик в одну комбіновану систему може допомогти у створенні ефективних та динамічних систем управління транспортним рухом та матиме значно більший ресурс. Саме такий підхід до організації інтелектуальної системи управління транспортними потоками було розглянуто в цій роботі. В ході дослідження було проведено короткий огляд підходів з підвищення ефективності транспортної мережі міста за основними напрямками. Також окреслено структуру, принципи та шляхи утворення стійкої комплексної системи управління транспортними потоками, що складаються з підсистем заснованих на ефективних методиках оптимізації та організації процесів дорожнього руху. Розглянуто та оцінено ефективність перевірених методик, що відповідають потребам такої комплексної системи.

**Ключові слова:** інтелектуальні транспортні системи, транспортні затори, комплексний підхід, адаптивне управління світлофорами, прогнозування транспортних потоків, Інтернет речей.

**Abstract.** The continuous growth of population in large cities, the intensive development of the economy, and the rising number of vehicles on the roads lead to the overload of transportation networks, resulting in traffic congestion. These congestions cause significant delays in movement, increase time and fuel consumption, and also have a negative impact on the environment. To address this problem in large cities, it is worthwhile to implement intelligent traffic flow management systems. The variability of methodologies underlying these systems significantly differs depending on their initial purpose. However, the resources of such individual methodologies deplete over time, necessitating the search for and implementation of new ones. The rapid loss of efficiency in such systems is rooted in the absence of a centralized node facilitating communication between systems and managing them. In other words, combining intelligent methodologies into a unified system can be useful in the creation of efficient and dynamic traffic flow management systems with significantly greater resources. Such an approach to organizing an intelligent traffic flow management system for the city's transportation network has been considered in this work. During the research, a brief overview of approaches to improving the efficiency of the city's transportation network along key directions was conducted. The structure, principles, and ways of forming a robust integrated system for managing the traffic flow were outlined. This system consists of subsystems based on effective optimization and organization methodologies for traffic processes. The effectiveness of tested methodologies that meet the needs of such an integrated system was also discussed and evaluated.

**Keywords:** *intelligent transportation systems, traffic congestion, comprehensive approach, adaptive traffic light control, traffic prediction, Internet of things.*

### Вступ

Упродовж останніх років по всьому світу спостерігається зростання транспортного руху в містах. Це призводить до надмірного навантаження на дорожню інфраструктуру та утворення все більшої кількості транспортних заторів. Згідно з даними Numbeo [1], щільність трафіку в Києві збільшилась на 54% за останнє десятиліття, що суттєво впливає на продуктивність міста, призводить до неефективної витрати палива та часу [2].

Така тенденція спонукає до пошуку засобів вирішення цієї проблеми, що спричинена неефективним управлінням транспортними потоками. Деякі дослідники у своїх роботах зосереджуються на боротьбі із причинами виникнення транспортних заторів, а не на їхній компенсації – що теоретично може давати суттєвий приріст продуктивності транспортної системи (ТС). Як приклад, у роботі [3] автори зосередилися на потенційних причинах і наслідках заторів, їхній оцінці, а також всебічному обговоренні стратегій пом'якшення наслідків, що впроваджуються для боротьби з викидами у країнах, що розвиваються. Інші ж дослідники зосереджуються на перевагах новітніх методів, як-от автори [4], що у своїй роботі довели ефективність використання технології Інтернету речей в інтелектуальній системі диспетчеризації громадського транспорту, завдяки якій можна досягнути зменшення навантаження на транспортну систему. Вважаючи, що заохочення громадян до надання переваги громадському транспорту є правильним рішенням, автори пропонують інтелектуальну систему диспетчеризації громадського транспорту. Остання базується на використанні технологій бездротової передачі, пошуку та обробки великих даних, із залученням платформи хмарних обчислень та інших технологій. Це дозволить ефективно збільшувати або зменшувати кількість транспортних засобів (ТЗ), відповідно до ве-

личини пасажиропотоку. Проте через відірваність цієї системи від основної ТС та відсутність синхронності роботи з іншими системами, потенціал такої системи не може бути розкритий належним чином і покращити досвід подорожі пасажирів.

Разом із цим, однією з ключових проблем, які лише ускладнюються внаслідок неефективного управління транспортною мережею, є зростання шкідливих викидів у атмосферу. Це частково підтверджується даними дослідницького відділу Statista [5], які демонструють, що 20% світових викидів CO<sub>2</sub> припадають на транспортну галузь, і цей показник є другим за величиною серед галузей. Рівень викидів від галузі транспорту зріс майже втричі через збільшення населення та розвиток економіки, якщо порівнювати із показником 1970 року. Однак застосування інтелектуальних ТС та їхніх комплексів може суттєво вплинути на ці показники, оптимізуючи рух автотранспорту та знижуючи час, який автомобілі проводять у заторах. Так, у Китаї є високотехнологічні компанії, через які проходить велика кількість GPS-даних, що стосуються транспортних потоків. На основі цих даних дослідники пропонують систему [6], що базується на вже наявній моделі симуляції викидів транспортних засобів та дозволить оцінювати обсяги спожитого палива транспортними засобами і викидів у реальному часі. Результати експериментів свідчать про здатність запропонованої системи підвищити точність оцінки викидів транспорту та потенційну користь у прийнятті екологічних рішень, планування та управління. Як і в згаданій раніше системі, потенційна ефективність даної знижується через відсутність кооперації з головною системою, та недостатність її однієї для вирішення низки задач, що постають перед сучасними містами.

Інші ж дослідники вбачають шлях до підвищення ефективності ТС у розвитку інфраструктури громадського транспорту, пошуку шляхів підвищення її загального рівня безпеки та подібних дослідженнях в цьому напрямку. Саме в роботі [7] авторами розглядається підхід до зниження загального рівня аварійності на дорогах та інцидентів загалом у вечірній і нічний час. На їхню думку, вихід полягає у збільшенні кількості одиниць громадського транспорту, розширенні мережі громадського транспорту та його графіку руху.

На підкріплення цієї думки, з метою розширення ТС, пропонується [8] збільшення обсягу автобусних сполучень та організація ефективних паратранзитних перевезень для районів із низькою щільністю заселення. Адже жителям таких районів доводиться за будь-якої потреби користуватись приватними ТЗ, що призводить до маятникової міграції та нестачі місць для паркування. За допомогою запропонованого індексу для вимірювання незручностей пасажирів у пунктах/зупинках громадського транспорту можна підвищити ефективність системи громадського транспорту, знизивши рівень її завантаження.

Загалом, експертна група проекту «Система моніторингу та інформаційна система транспортних досліджень та інновацій» при Європейській комісії [9] бачить вихід у створенні та розвитку мультимодальної ТС шляхом ефективної оптимізації всієї транспортної мережі, що зможе усунути не тільки проблеми транспорту, але й покращити екологічну ситуацію в містах та відчутно підвищити якість життя їхніх мешканців. Реалізація такої концепції можлива і в єдиній системі, подібній розумному місту.

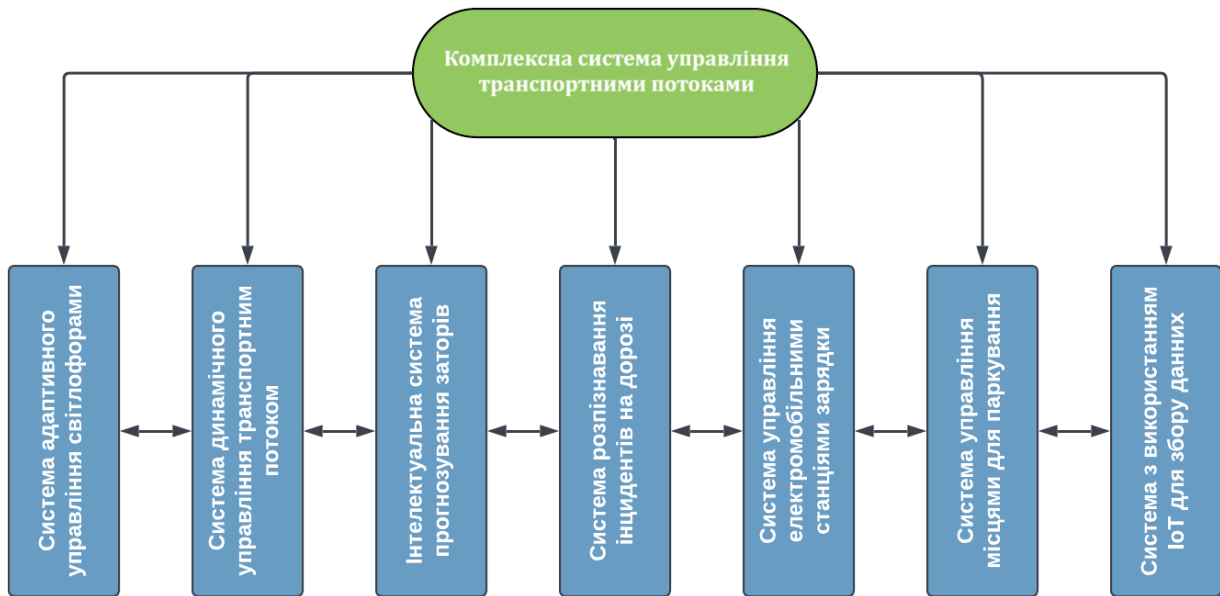
Виходячи з особливостей розглянутих робіт та поточних проблем великих міст, слід наголосити на необхідності у такій системі, яка б могла задовольнити потреби сучасної економіки та суспільства. Обумовлено це тим, що сьогодні будь-яка система, яка регулює процеси

всередині транспортної системи, швидко вичерпує свій оптимізаційний ресурс. Натомість поєднання між собою двох або більше систем може пропонувати більшу гнучкість та ефективність, за умови, що ці системи є актуальними.

### Результати дослідження

Нині для усунення заторів знайшли широке використання системи інтелектуального управління потоками транспорту (СІУПТ). Вони дозволяють покращити ефективність та безпеку руху транспорту, зменшити його негативний вплив на навколишнє середовище, а також є корисними у плануванні розвитку міських транспортних мереж. В Україні в царині СІУПТ найбільший розвиток мають автоматизовані системи управління дорожнім рухом (АСУДР). Розвиток АСУДР на принципах СІУПТ дозволяє перейти від управління окремими світлофорними об'єктами до управління рухом на автомобільних дорогах, зонах вулично-дорожньої мережі або, загалом, рухом у місті. Однак хоча ці системи є досить ефективними, вони мають доволі вузький спектр задач, що поодинокі не дозволяє усунути всіх наявних проблем транспортної системи міста, а разом із ними задовольнити конкретні потреби мешканців міста.

Вирішенням цієї проблеми може стати комплексна система, що поєднує в собі методи інтелектуального управління різними аспектами дорожнього руху в межах міста, за принципом розумного міста. Така система може використовувати комбінації методів штучного інтелекту, аналізу даних, оптимізації та інших технологій. До складників такої системи варто віднести окремі системи (**рис. 1**) адаптивного управління світлофорами, динамічного управління транспортним потоком, прогнозування заторів, розпізнавання інцидентів на дорозі, управління електромобільними станціями зарядки, управління місцями для паркування та збору даних на основі Інтернету речей (IoT).



**Рис. 1.** Складники комплексної системи управління транспортними потоками

Отже, кожна підсистема, що входить до такої комплексної системи, буде здійснювати та підтримувати якісне функціонування чітко визначеної частини процесу дорожнього руху. Водночас такі підсистеми теж є складними, поєднують у собі декілька методів управління.

До прикладу, розглянемо **підсистему адаптивного управління світлофорами**. Дані системи, переважно, базуються на використанні датчиків руху, камер та алгоритмів машинного навчання, завдяки яким здійснюється адаптація циклів світлофорів у реальному часі залежно від інтенсивності транспортного потоку та потреб у коригуванні дорожнього руху [10]. Такий підхід наведений у роботі [11], що базується на використанні камер і датчиків, розміщених на дорогах, для збору даних про транспортні потоки в реальному часі та визначення місць заторів. Далі зібрані дані обробляють та аналізують за допомогою алгоритмів машинного навчання. Це дозволяє отримати корисну інформацію, яку можна використовувати для оптимізації потоку трафіку.

Крім того, ця система може інтегруватися з іншими технологіями – Інтернетом речей (IoT) і хмарними технологіями розумного міста, щоб створити комплексну систему управління трафіком, яка

може вирішувати різноманітні міські проблеми. Її підґрунтям стали інтелектуальні системи управління на основі машинного навчання – такі, як згорткові нейронні мережі (CNN) та машини опорних векторів (SVM). Ці алгоритми використовувалися для виконання таких завдань, як розпізнавання об'єктів, обробка зображень і аналіз даних.

Впровадження системи управління транспортними потоками вимагає наявності режиму реагування на непередбачені події (такі як аварії, перекриття доріг, демонстрації тощо) для забезпечення коригування транспортних потоків за потреби. Для цього в системі використовуються алгоритми машинного навчання, такі як YOLO [12] та Alex Net [13], оскільки вони можуть оцінювати дані, передбачати потенційні загрози та забезпечувати необхідний захист.

Головною перевагою цієї системи є здатність автоматичного коригування сигналів світлофора, для призначення пріоритету транспортним засобам екстрених служб, таким як машини швидкої допомоги та іншим, під час інтенсивного руху. Іншою перевагою є інформування водіїв про умови дорожнього руху в режимі реального часу. Завдяки мобільному додатку водії можуть уникати заторів і вибирати альтернативні маршрути.

Інший складник комплексної системи управління транспортними потоками – **система динамічного управління транспортним потоком**, є не менш важливою за попередню, адже відіграє ключову роль у вдосконаленні транспортної інфраструктури та забезпеченні ефективного функціонування системи транспорту. Вона представлена в роботі [14], що поєднує в собі систему адаптивного управління світлофорами та динамічного управління транспортним потоком. Ця система націлена на більш складні та вже переобладнані транспортні мережі для застосування автоматизованих транспортних засобів (CAV). В ній подається система контролю ефективності та викидів забруднювальних речовин неоднорідного транспортного потоку, що складається з керованих людьми транспортних засобів (HV) та під'єднаних автоматизованих транспортних засобів.

Вона базується на використанні дворівневої моделі – модель верхнього рівня оптимізує тривалість роботи світлофорів у режимі реального часу на основі загальної кількості та типу транспортних засобів, що входять у зону контролю, тоді як модель нижнього рівня оптимізує стратегії зміни смуг руху CAV та оптимізаційні криві прискорення транспортного засобу на основі тривалості фази світлофорного регулювання, оптимізованої моделлю верхнього рівня. Цільова функція цієї системи враховує зменшення споживання палива, витрат на зміну смуги руху та затримок транспортних засобів. На основі формули оптимального циклу Вебстера для оптимізації моделі авторами створено покращений алгоритм Cuckoo Search (метаевристичний алгоритм, який використовується для вирішення задач оптимізації) з високою ефективністю пошуку.

Дані, отримані в результаті експерименту, підтвердили переваги запропонованого авторами методу, які свідчать про зменшення середнього споживання палива CAV (17,9%), викидів вуглекислого газу (19,1%), частоти змін смуги

руху (22,15%), підвищення середньої швидкості руху (11,6%), затримки руху (18,4%) та покращення пропускної здатності перехрестя.

Дієвість методів динамічного управління транспортним потоком також було відзначено у роботі [15]. Запропоновано її використання з метою усунення заторів на сегментах транспортної мережі, завдяки якому можна вплинути на основну причину зниження пропускної спроможності транспортної мережі – наявність заторових режимів руху, що призводять до формування «ударної хвилі», при її поширенні в напрямку зустрічного їй транспортного потоку.

Ефективність систем динамічного управління транспортними потоками можна підвищити завдяки комбінації із **інтелектуальними системами прогнозування заторів**, що також базуються, переважно, на алгоритмах машинного навчання, але для проведення аналізу зібраної бази даних та поточних умов з метою прогнозування і запобігання заторам. Дієвість такого підходу описано в роботі [16], у якій досліджено деякий перелік нейронних мереж та порівняно ефективність їхньої роботи між собою, за умови їхнього використання в інтелектуальній системі прогнозування заторів. Серед таких були: багат шаровий сприймач (MLP), згорткова нейронна мережа CNN, рекурентна нейронна мережа (LSTM), гібридна нейронна мережа, яка поєднує 1D-CNN і LSTM (CNN+LSTM), і помилково-рекурентна CNN (eRCNN). Також було перевірено дві моделі, запропоновані авторами – RLSTM і eRCNN+LSTM.

Усі нейронні мережі були навчені передбачати значення змінних транспортного потоку (обсяг потоку і його швидкість) протягом наступних 15 хвилин. Точність передбачення, досягнута за допомогою різних нейронних мереж, порівнювалася за допомогою показників помилок, які вимірюють різницю між прогнозованими та фактичними значеннями. Зокрема, автори використовували середню абсолютну похибку (MAE, милі,

авт/год/смуга руху транспортного потоку), середню абсолютну відсоткову похибку (MAPE, %) і середню квадратичну похибку (RMSE, милі, авт/год/смуга руху транспортного потоку).

Результати дослідження показують (табл. 1), що найкраща точність передбачення виникнення заторів за параметрами транспортного потоку для всіх ді-

лянок досліджуваної транспортної мережі досягається за допомогою моделей повторюваної помилки, тобто за допомогою eRCNN, eRLSTM і eRCNN+LSTM. Це демонструє, що моделі повторюваних помилок можуть краще передбачити значні варіації параметрів потоку, які виникають під час утворення або ліквідації заторів.

Таблиця 1

**Порівняльна таблиця моделей передбачення параметрів транспортного потоку**

| Модель     | Швидкість транспортного потоку |        |       | Інтенсивність транспортного потоку |        |        |
|------------|--------------------------------|--------|-------|------------------------------------|--------|--------|
|            | MAE                            | MAPE   | RMSE  | MAE                                | MAPE   | RMSE   |
| MLP        | 11,34                          | 33,29% | 13,30 | 116,34                             | 9,12%  | 152,28 |
| CNN        | 8,78                           | 17,15% | 11,18 | 81,02                              | 6,62%  | 107,33 |
| LSTM       | 11,04                          | 21,85% | 12,33 | 92,04                              | 7,75%  | 126,49 |
| CNN+LSTM   | 7,33                           | 14,60% | 8,88  | 86,17                              | 6,94%  | 109,89 |
| LSTM+CNN   | 13,59                          | 26,64% | 16,84 | 215,61                             | 16,82% | 269,47 |
| eRCNN      | 1,34                           | 2,71%  | 1,81  | 49,82                              | 3,88%  | 62,35  |
| eRLSTM     | 2,43                           | 4,71%  | 3,00  | 83,31                              | 6,48%  | 113,97 |
| eRCNN+LSTM | 2,04                           | 4,24%  | 2,79  | 61,43                              | 4,03%  | 73,52  |

У роботі [17] було представлено поглиблене дослідження моделі прогнозування стану дорожнього руху та методу контролю заторів. Досліджуваний авторами метод прогнозування стану дорожнього руху, заснований на оптимізованій радіально-базисній функції (RBF) із покращеною оптимізацією рою частинок (IPSO), а також моделлю об'єднання функцій мережі довго- та короткочасної пам'яті LSTM/машини опорних векторів SVM для прогнозування стану дорожнього руху в містах.

Проведені експерименти базувалися на основі регіональних даних про транспортні потоки станції Шеньян і порівнювалися з іншими алгоритмами. Результати експериментів (табл. 2) підтвердили перевагу моделі об'єднання функцій на основі IPSO-RBF і LSTM/SVM. Величини похибок було отримано на основі значень, виміряних у метричній системі.

Подібний підхід до організації системи прогнозування заторів, а саме ко-

роткострокового прогнозування швидкості руху, використано в роботі [18]. Основу методу складає модуль попередньої обробки даних і модуль короткострокового прогнозування руху транспортного потоку. У модулі попередньої обробки даних відсутня інформація про транспортні потоки виправляється та доповнюється, щоб отримати набір даних для подальшого прогнозування. У модулі прогнозування пропонується комбінований метод глибокого навчання, який є моделлю LSTM (ATT-LSTM), заснованої на принципі уваги, для прогнозування короткочасної швидкості руху на міських дорогах. Цей метод було перевірено на міській дорожній мережі в районі Наньшань, Шеньчжень, провінція Гуандун, Китай, на основі 30-денного набору даних про швидкість руху. Результати дослідження свідчать, що запропонований метод перевершує інші розглянуті авторами алгоритми глибокого навчання, такі як рекурентна нейронна мережа RNN і згортова нейронна мережа

CNN як за ефективністю обчислень, так і за точністю прогнозування. Принцип уваги може значно зменшити похибку

моделі LSTM (до 12,4%), тим самим покращивши ефективність прогнозування.

Таблиця 2

**Порівняльна таблиця моделей передбачення обсягу транспортного потоку**

| Модель   | Інтенсивність транспортного потоку |        |       |
|--|------------------------------------|--------|-------|
|  | MAE                                | MAPE   | RMSE  |
| Модель нейронної мережі Елмана                         | 14,62                              | 14,36% | 12,02 |
| Нейронна мережа зворотного поширення (BP)              | 14,05                              | 14,06% | 11,28 |
| Модель прогнозування стану трафіку RBF та LSTM/SVM     | 12,42                              | 12,80% | 10,00 |
| Модель прогнозування стану трафіку IPSO-RBF і LSTM/SVM | 12,15                              | 12,52% | 10,00 |

Допоміжною, але дуже важливою системою, що може базуватися на основі засобів згаданих раніше складників комплексної системи управління транспортною мережею, є **розпізнавання інцидентів на дорозі**. Такі системи використовують камери відеоспостереження та алгоритми «комп'ютерного зору», що дозволяють завчасно виявляти та реагувати на дорожні інциденти, такі як аварії, перешкоди та інше. Такий підхід представлено в роботі [19], а саме здійснено комплексний аналіз дорожньо-транспортних пригод у різних регіонах США. З метою вирішення проблеми виявлення аварій та аналізу дорожнього руху авторами було запропоновано структуру, що використовує камери спостереження за дорожнім рухом і системи розпізнавання дій для спонтанного виявлення дорожньо-транспортних пригод і реагування на них. Ці компоненти працюють разом, створюючи комплексну та ефективну систему виявлення дорожньо-транспортних пригод і реагування на них. Кожен складник системи описано так:

1. Використання наявних камер відео- та фотофіксації дорожнього руху можливе лише після їхнього перепрофілювання для виконання складніших завдань, таких як виявлення аварій і моніторинг порушень правил дорожнього

руху, наприклад, проїзду на червоне світло.

2. Обробка даних, отриманих з камер відео- та фотофіксації дорожнього руху, охоплює низку етапів, зокрема сегментацію зображення та застосування алгоритмів машинного навчання. Ці алгоритми дозволяють проаналізувати отримані дані та виявити закономірності, пов'язані з аваріями. Після чого результати обробки даних надсилаються до системи виявлення аварій для подальшої оцінки та прийняття рішень.

3. Система виявлення аварій та оповіщення складається з двох невід'ємних компонентів, поєднаних із системою оповіщення про прийняття рішень. Ці компоненти працюють разом, щоб оперативно реагувати на виявлені ДТП. В разі останнього система оповіщення починає виконувати такі дії:

- *Диспетчерський виклик до служб порятунку.* Система автоматично здійснює виклик до диспетчерського центру екстреної допомоги, надаючи важливу інформацію, таку як місце, час і характер аварії.

- *Зв'язок із правоохоронними органами.* Система сповіщає правоохоронні органи про аварію, дозволяючи їм керувати транспортним потоком, розслідувати інцидент і вживати відповідних правових заходів, якщо це необхідно.

На думку авторів, інтеграція запропонованої системи зі службами екстреної допомоги дозволить використати потужність камер дорожнього руху та алгоритмів машинного навчання для створення ефективного рішення для реагування на дорожньо-транспортні пригоди та зменшення людських помилок.

Також, враховуючи поточні потреби учасників руху, що стали особливо гостро відчуватись в останні роки, необхідним є введення в комплексну систему управління транспортними потоками **підсистеми управління електромобільними станціями зарядки**. Використання аналізу даних та інтелектуальних алгоритмів для ефективного розташування та управління електромобільними станціями зарядження є необхідним, зважаючи на збільшення їхньої частки серед усіх ТЗ. Таку систему під назвою SIMA, що поєднує в собі компоненти, починаючи від зарядки та закінчуючи моніторингом електромобілів, було представлено в роботі [20]. Система працює на основі повної інтеграції між зарядними станціями для електромобілів за «відкритим протоколом зарядної точки» (OCPP), платформою IoT та зовнішнім веб-додатком (хмарна версія).

Що стосується центральної системи OCPP, то вона є важливою для зв'язку та інтеграції з електромобілями, оскільки дозволяє збирати різноманітну інформацію для користувача та системного адміністратора з простого додатку. Однією з головних переваг впровадженої системи, за словами авторів, є створення еталонної архітектури для систем керування та моніторингу зарядних станцій, а також можливість створення бізнес-моделей електромобільності, специфічних для регіону Амазонки.

Зважаючи на вже згадану тенденцію до стрімкого збільшення відношення транспортних засобів на одного громадянина, що спостерігається в останні роки у світі, а разом із тим і в Україні, виникає закономірна проблема складності пошуку місць для паркування

або ж їхньої відсутності. Звісно, вирішення такої проблеми може полягати у збільшенні кількості паркувальних місць, але не менш важливим є підвищення коефіцієнта використання паркувальних місць. Саме такі підходи лягають в основу **систем управління місцями для паркування**, що можуть використовувати технології визначення місць, датчики та алгоритми. В роботі [21] описано систему, що здійснює збір та контроль за інформацією про паркування за допомогою невеликого бездротового комунікаційного обладнання, розміщеного на кожному паркувальному місці. Вона використовує технологію бездротової сенсорної мережі для формування локальної мережі на парковці. Авторами спроектовано контролер паркування для під'єднання до загальнодоступної мережі, що дозволить забезпечити зв'язок із сервером. Сервер зберігає дані датчиків з усіх паркувальних вузлів у базі даних і підтримує узгодженість даних із мережею паркувальних місць. Контрольний запит користувача аналізується сервером та конвертується у конкретну інструкцію та надсилається до головної мережі паркування, а сервер для запитів користувача безпосередньо запитує базу даних і отримує відповідь. Уся інформація про паркування, за словами авторів, є точною для будь-якого паркувального місця, що регулярно перевіряється в реальному часі.

Це дослідження підкреслює важливість систем управління паркуванням як важливого компонента міської транспортної інфраструктури. Тим самим робить внесок у сферу систем управління паркуванням, особливо в контексті міського транспорту.

Останнім компонентом, що дозволить реалізувати цю комплексну систему управління транспортною мережею, є **підсистема з використанням IoT для збору даних**, яка лягає в основу забезпечення комунікації між алгоритмами управління різних систем. Завдяки їй здійснюється збір та передача реальних даних про стан доріг, транспортний

потік та інші параметри для подальшого використання.

Із розвитком технології комунікації ТЗ з інфраструктурою (V2I) значно розширились можливості під'єднаних автономних транспортних засобів (CAV). Нові можливості дозволяють дослідникам проводити аналіз та оптимізувати витрати пального в ТЗ, використовуючи технологію під'єднання до автомобілів CAV. Завдяки здатності CAV отримувати інформацію про дорожню інфраструктуру через V2I, вони можуть ефективно користуватися даними про розміщення світлофорів та знаки «стоп», з метою зменшення витрат пального для транспортних засобів із ДВЗ та збільшити ефективність використання акумуляторів у електромобілів.

Відштовхуючись від цього, з метою економії палива, в роботі [22] було розроблено алгоритми управління зміною швидкості автономних транспортних засобів ego (автомобіль, який містить датчики, що сприймають середовище навколо нього). Авторами запропонована комплексна стратегія «Eco-Driving» на основі алгоритмів V2I та транспортного засобу з іншими транспортними засобами (V2V). Ця стратегія містить декілька режимів руху для адаптації таких автономних транспортних засобів під рух інших транспортних засобів. Вона дозволяє розраховувати профілі швидкості, відштовхуючись від поточних умов та їхнього власного переліку обмежень, тоді як контролер вищого рівня (HL) забезпечує плавні та безпечні переходи між цими режимами руху. В результаті дослідження авторами було проведено симуляцію дорожнього руху за маршрутом у місті Колумбус, штат Огайо, США. Отримані під час симуляції дані показали, що контролер HL дозволяє досягти значного покращення економії палива порівняно з базовими режимами керування. Найбільший приріст до економії палива було отримано із CAV, в режимі «Eco-Driving» – 6,41%.

Зважаючи на різноманітність та ефективність описаних систем у цій роботі, є закономірним те, що більшість розвинутих країн та деяких країн, що розвиваються, змушені звертатися до комплексного підходу в утворенні систем управління транспортними потоками. Це передусім викликано вичерпанням потенціалу окремих впроваджених раніше систем та перевантаженням транспортних мереж, яке в останні роки є найбільш вираженим.

Роботу зі впровадження та організації подібної єдиної комплексної системи проводять такі країни: Сінгапур; США (Сан-Франциско, Лос-Анджелес); Китай (Шанхай, Пекін); Японія (Токіо); Велика Британія (Лондон); Данія (Копенгаген).

### **Висновки**

Процес вирішення проблем підвищення ефективності транспортних систем міст є складним та багатофакторним. Інноваційний підхід, узгоджена міська політика та участь громади можуть стати ключовими компонентами успішного розв'язання цього глобального виклику.

Створення інтелектуальних систем управління транспортними потоками дасть змогу:

- оптимізувати сигнали світлофорів та забезпечити можливість надання пріоритету транспортним засобам екстрених служб у годину пік;
- інформувати водіїв про умови руху в режимі реального часу та альтернативні маршрути;
- досягти зменшення середнього споживання палива CAV (17,9%), викидів вуглекислого газу (19,1%), частоти змін смуги руху (22,15%), підвищення середньої швидкості руху (11,6%), затримки руху (18,4%) та покращення пропускну здатності перехресть;
- здійснювати моніторинг порушень правил дорожнього руху, виявляти аварійні ситуації та повідомляти інформацію про них до диспетчерського центру екстреної допомоги;

– оптимізувати розташування та підвищити ефективність управління електромобільними станціями заряджання;

– здійснювати збір, контроль за інформацією та інформування водіїв про вільні місця для паркування;

– забезпечити збір та передачу реальних даних про стан доріг, транспортний потік та інші параметри для подальшого використання.

Отже, ефективне управління ТС вимагає поєднання різноманітних стратегій, зокрема створення інтелектуальних систем управління транспортними потоками, розвиток інфраструктури громадського транспорту, сприяння використанню екологічно чистих видів транспорту та розвитку інфраструктури для пішоходів і велосипедистів. Тільки в комплексі ці заходи можуть привести до створення більш ефективних та стійких умов, здатних витримувати виклики сучасного міського середовища.

### References

1. Numbeo. (2023). *Europe: Traffic Index by City 2023*. [Online]. Retrieved from [https://www.numbeo.com/traffic/region\\_rankings.jsp?title=2023&region=150](https://www.numbeo.com/traffic/region_rankings.jsp?title=2023&region=150).
2. Kashkanov, A., Palchevskiy, O. (2022). Problems of transport systems functioning of Ukraine large cities in modern conditions. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1, 97-102. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i18.764>.
3. Choudhary, A., Gokhale, S., Kumar, P., Pradhan, C., Sahu, S. (2022). Urban traffic congestion: its causes-consequences-mitigation, *Research Journal of Chemistry and Environment*, 26, 164-176. <https://doi.org/10.25303/2612rjce1640176>.
4. Gao, J., Hong, X., Liu, G., Wang, L. (2021). Intelligent public transport cloud platform dispatching operation management system development, *Journal of Physics: Conference Series*, 1982. <https://doi.org/10.1088/17426596/1982/1/012063>.
5. Statista. (2024). *Transportation emissions worldwide – statistics & facts*. [Online]. Retrieved from <https://www.statista.com/topics/7476/transportation-emissionsworldwide/#topicOverview>.
6. Lin, C., Zhou, X., Wu, D., Gong, B. (2019). Estimation of Emissions at Signalized Intersections Using an Improved MOVES Model with GPS Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193647>.
7. Henézi, D., Winkler, A. (2023). The Role of Public Transport in Transport Safety and Public Safety, *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 23, 505-512. <https://doi.org/10.55549/epstem.1374907>.
8. Thilakshan, T., Sharic, A. H., Weerasinghe, O., Bandara, S. (2023). "Evaluating the Ease of Access to Public Transport Systems in Urban and Suburban Centers," *Latest Developments in Civil Engineering*, 753-768. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2676-3\\_57](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2676-3_57).
9. European Commission. (2020). *Network and traffic management systems (NMT)*. [Online]. Retrieved from <https://trimis.ec.europa.eu/roadmaps/network-and-traffic-management-systems-ntm>.
10. Kashkanov, A., Palchevskiy, O. (2022). Intellectualization of traffic management as a means of increasing the efficiency of the city's transport network in emergency situations. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 2, 42-50. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-42-50>.
11. Lei, Z., Yigong, S. (2023). Intelligent Traffic System Using Machine Learning Techniques: A Review, *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4, 5, 1457-1461. <https://doi.org/10.55248/gengpi.234.5.38047>.
12. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 779-788.
13. Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton Geoffrey, E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks, In *Advances in Neural Information Processing Systems 25*. Curran Associates Inc., 1097-1105.
14. Wang, J., Yu, H., Chen, S., Ye, Z., Ren, Y. (2023). Heterogeneous Traffic Flow Signal Control and CAV Trajectory Optimization Based on Pre-Signal Lights and Dedicated CAV Lanes, *Sustainability*, 15. <https://doi.org/10.3390/su152115295>.
15. Abramova, L., Shyrin, V., Ptytsia, H., Kapinus, S. (2020). Dynamic control over traffic flow under urban traffic conditions, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 34-43. <https://doi.org/10.15587/1729-061.2020.210170>.
16. Mena-Oreja, J., Gozalvez, J. A Comprehensive Evaluation of Deep Learning-Based Techniques for Traffic Prediction, *IEEE Access*, 8, 1-25. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994415>.
17. Zhang, T., Xu, J., Cong, S., Qu, C., Zhao, W. (2023). A Hybrid Method of Traffic Congestion Prediction and Control," *IEEE Access*, 11, 36471-36491, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3266291>.
18. Wu, P., Huang, Z., Pian, Y., Xu, L., Li, J. and Chen, K. (2020). A Combined Deep Learning Method with Attention-Based LSTM Model for Short-Term Traffic Speed Forecasting," *Journal of Advanced Transportation*. <https://doi.org/10.1155/2020/8863724>.
19. Adewopo, V., Elsayed, N., Elsayed, Z., Ozer, M., Wangia-Anderson, V., Abdelgawad, A. (2023). AI on the Road: A Comprehensive Analysis of Traffic Accidents and Accident Detection System in Smart Cities, *Preprint*.
20. Lobato, E. et al. (2020). A Monitoring System for Electric Vehicle Charging Stations: A Prototype in the Amazon," *Energies*. 16. <https://doi.org/10.3390/en16010152>.
21. Wang, A. (2023). Development of an IoT-Based Parking Space Management System Design," *International Journal for Applied Information Management*, 3, 91-100. <https://doi.org/10.47738/ijaim.v3i2.54>.
22. Kavas-Torris, O., Guvenc, L. (2023). A Comprehensive Eco-Driving Strategy for CAVs with Microscopic Traffic Simulation Testing Evaluation, *Sensors*, 23. <https://doi.org/10.3390/s23208416>.