

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Кафедра організації та безпеки дорожнього руху

ЗБІРКА ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ

VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«ІННОВАЦІЇ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ТА ДОРОЖНІМ
РУХОМ»

18-19 листопада 2025 р.

(Посвідчення УКРІНТЕІ № 3324U000785 від 12.12.2024 р.)



м. Харків - 2025

Редактори: Л. С. Абрамова, І. С. Наглюк

Комп'ютерна верстка: Д. В. Засядько

Відібрані матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції «Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом» 18-19 листопада 2025 р., Україна, м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, кафедра організації та безпеки дорожнього руху.

Збірка тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції «Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом» / за заг. ред. Л. С. Абрамова; ХНАДУ. – Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. – 170 с.

ISBN 978-617-7886-89-0
DOI: 10.61718/in202512.01

Збірка тез доповідей містить наукові праці, присвячені питанням організації дорожнього руху, зокрема безпеці дорожнього руху. Розглянуті питання інноваційних засобів запобігання ДТП, модернізації транспортної інфраструктури міст як на мережевому, так і на локальному рівні. Вона розрахована на фахівців, що займаються проектуванням у сфері містобудування та організації дорожнього руху. Науковці мають змогу ознайомитися з інноваційними рішеннями лідерів галузі та окреслити майбутні шляхи подолання складних науково-практичних завдань. Збірка тез доповідей містить матеріали, що були представлені VI міжнародній науково-практичній конференції «Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом» в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті, м. Харків.

ПОСИЛАННЯ НА ЕЛЕКТРОННІ РЕСУРСИ

Реєстраційна картка УКРІНТЕІ

<https://nz.ukrintei.ua/view/6646b06b90bd13dabc11ddba01270d23>



Відеозапис доповідей учасників

<https://www.youtube.com/watch?v=NqiCVd8Rc3I>



Посилання на збірку матеріалів на офіційному сайті ХНАДУ

<https://fts.khadi.kharkov.ua/kafedri/organizaciji-ta-bezpeki-dorozhnogo-rukhu/nauka/>



ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Голова – Віктор БОГОМОЛОВ, д.т.н., проф., ректор ХНАДУ.

Заступник голови – Ілля ДМИТРИЄВ д.е.н., проф., проректор з наукової роботи ХНАДУ.

Заступник голови – Юрій БЕКЕТОВ, к.е.н., проф., декан факультету транспортних систем ХНАДУ.

Заступник голови – Іван НАГЛЮК, д.т.н., професор, завідувач кафедри організації та безпеки дорожнього руху ХНАДУ.

ЧЛЕНИ ПРОГРАМНОГО КОМІТЕТУ

Vitalii NAUMOV – DSc, professor, Transport Systems Department, Cracow University of Technology, Krakow, Poland;

Oleksandr ROSSOLOV – DSc, Research Fellow, Department of Civil and Resource Engineering, Dalhousie University, Canada;

Dalibor BARTA – PhD, Department of Transport and Handling Machines, University of Žilina, Žilina, Slovak Republic;

Elmira ZHATKANBAYEVA – professor, Head of the Department of Transport Equipment and Organization of Transportation, Kazakh Automobile and Road Institute Almaty, Republic Kazakhstan;

Yevhen ALOSHYNSKYI – professor PK, Transport Systems Department, Cracow University of Technology, Krakow, Poland;

VU Duc Minh – PhD, Head of Traffic Forecasting Department, Highway and Airport Engineering Division, Transport Engineering Design Inc., Ha Noi, Viet Nam;

Dávid FÖLDES – PhD, research associate, Department of Transport Technology and Economics, Budapest University of Technology and Economics. Budapest, Hungary;

Oleksandr KRAVCHENKO – DSc, Department of Transport and Handling Machines, University of Žilina, Žilina, Slovak Republic;

Oleksandr KOLII – Research Fellow, Chair of Traffic Process Automation, Dresden University of Technology, Dresden, Germany;

Akbar Jan POLAD – PhD, Academy of Science of Afghanistan, Kabul, Afghanistan;

Наталія ЧЕРНЕЦЬКА-БІЛЕЦЬКА – проф., зав. каф. Логістичне управління та безпека руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Київ, Україна;

Микола МОРОЗ – проф., зав. каф. транспортних технологій, Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського, м. Кременчук.

Ігор МУРОВАНІЙ – доц., декан факультету транспорту та механічної інженерії, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна;

Павло ПОПОВИЧ – професор, завідувач кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна;

Олексій СТЕПАНОВ – проф. каф. тракторів і автомобілів, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна;

Людмила АБРАМОВА – д.т.н, професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху, ХНАДУ, м. Харків, Україна;

Олексій ПАВЛЕНКО – к.т.н, доц., зав. каф. транспортних технологій, ХНАДУ, м. Харків, Україна;

Дмитро СИДОРЕЦЬ – керівник Харківської обласної організації роботодавців в галузі перевезень вантажів та пасажирів, м Харків,

Євген ЛЮБІЙ – к.т.н., доц., завідувач кафедри транспортних систем і логістики, ХНАДУ

Віктор ДАНЧУК – д. фіз.-мат. наук, проф. кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспорт-ного університету, дійсний член Транспортної академії наук України, дійсний член Академії будівництва України.

СЕКРЕТАРІАТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Геннадій ПТИЦЯ, – відповідальний секретар, к.т.н, доц. каф. ОБДР ХНАДУ;
Сергій КАПІНУС – к.т.н, доцент кафедри ОБДР, ХНАДУ, м. Харків;
Дмитро ЗАСЯДЬКО – ст. викладач кафедри ОБДР, ХНАДУ, м. Харків.

ПАРТНЕРИ КОНФЕРЕНЦІЇ

1. Almaty Academy of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan named after Makan Esbulatov (Almaty, The Republic of Kazakhstan)
2. Dresden University of Technology (Dresden, Germany)
3. Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (Almaty, The Republic of Kazakhstan)
4. Kazakh - German University (Almaty, The Republic of Kazakhstan)
5. Navitas Renewables A/S
6. Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка (м. Київ)
7. Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця)
8. ВСП Автотранспортний фаховий коледж НТУ "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро)
9. ВСП Одеський автомобільно-дорожній коледж НУ "Одеська політехніка" (м. Одеса)
10. Департаменту будівництва та шляхового господарства Харківської міської ради
11. Державна служба України з безпеки на транспорті
12. Державний торговельно-економічний університет (м. Київ)
13. Жилінський університет (м. Жиліна, Словаччина)
14. Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ)
15. Криворізький національний університет (м. Кривий Ріг)
16. Лозівська філія Харківського автомобільно-дорожнього фахового коледжу (м. Лозова)
17. Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ)
18. Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне)
19. Національний транспортний університет (м. Київ)
20. ННІ «Каразінський банківський інститут» Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (м. Харків)
21. ННЦ "Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса" (м. Харків)
22. Полтавський коледж транспортного будівництва (м. Полтава)
23. Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж (м. Харків)
24. Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова (м. Харків)
25. Харківський національний університет радіоелектроніки (м. Харків)
26. Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)
27. Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
28. Управління патрульної поліції в Харківській області ДПП

ЗМІСТ

Секція 1. Застосування штучного інтелекту в управлінні дорожнім рухом та мобільністю

Рогов А. В., Ковальчук Д. В., Абрамова Л. С.	10
Використання хмарних обчислень для аналізу великих даних дорожнього руху (big traffic data)	
Чижик В. М., Стешенко В. В.	13
Оптимізація маршрутів громадського транспорту засобами штучного інтелекту	
Степанов О. В., Наглюк І. С., Oleksandr Kolii	15
Інтелектуальні алгоритми оптимізації світлофорного регулювання для підвищення пропускної здатності міських транспортних коридорів	
Запорожцева О. В., Запорожцев А. Г., Копитков Д. М.	18
Інтеграція технологій штучного інтелекту в транспортну освіту як інструмент формування трансверсальних компетентностей майбутніх фахівців у сфері управління дорожнім рухом	

Секція 2. Адаптивні системи управління дорожнім рухом у містах

Балюк Є. О., Євтехова С. С.	21
Оцінювання рівня безпеки руху на міському перехресті з використанням польового методу	
Демченко Є. Б., Ломага М. Ю.	24
Інтелектуальна транспортна система міста Жешув	
Любий Є. В.	26
Method for offset adjustment in coordinated urban arterial signal control	
Пострелко Є. В.	29
Методи розпізнавання номерних знаків в інтелектуальних системах керування транспортними потоками у місті	
Халимон В. К., Абрамова Л. С.	32
Визначення параметрів програмно-адаптивного управління дорожнім рухом на перехресті міста	
Степанов О. В., Олійник Д. В.	36
Алгоритмічні моделі прогнозування критичних станів транспортного потоку на основі багатоджерельних даних міської мобільності	
Гутаревич О. С., Данчук В. Д.	39
Адаптивний метод динамічної маршрутизації доставки товарів в умовах міської транспортної логістики	

Секція 3. Взаємодія інфраструктури та транспорту в умовах міського руху

Голубнічий Є. А., Орда О. О.	42
Інтеграція велоінфраструктури з мережею громадського транспорту: сучасні підходи та перспективи розвитку	
Горбачов П. Ф., Свічинський С. В.	45
Швидкість щільного транспортного потоку з трьома повільними автомобілями без можливості їх обгону та випередження	
Осипов В. О., Хоменко В. О.	48
Кільцеві перетинання на вулицях міст як фактор впливу на рух транспортного потоку	
Кашканов В. А., Рябушенко О. В., Томляк К. І.	50

Зниження заторних процесів на пунктах зупинки маршрутів міського пасажирського транспорту"	
Павленко О. В.	52
Перспектива проектування багатоцентрової мережі доставки з конфігурацією транспортної інфраструктури в місті	
Птиця Г. Г., Ярута А. М., Шевченко В. В., Мерзляков В. В.	55
Вплив функціонування зупинок громадського транспорту на рівень комфортності руху в обмежених міських умовах	
Птиця Н. В., Птиця В. Г., Бабкова В. О.	58
Improving Transport Service Quality In Road Logistics	
Резник А. В., Ребрищева В. І.	61
Сталий розвиток системи доставки «останньої милі» в умовах великого міста на прикладі Салтівського району м. Харків	
Xiaoxuan Qin, Orgina A. A.	64
Analysis of synthetic models for forming matrices of passenger correspondence	
Таран І. О., Литвин В. В., Кравець К. В.	69
Моделювання транспортних потоків в умовах м. Дніпро із використанням пакету імітаційного моделювання Anylogic	
Хітров І. О.	72
Взаємодія транспортної інфраструктури та міського руху як основа підвищення транспортної безпеки	
Холодова О. О., Бугайова М. О., Покусай П. О.	74
Моделювання тривалості циклу світлофорного регулювання на перехрестях з урахуванням інтенсивності руху та кількості смуг	
Шевчук Є. В., Наглюк І. С., Бекетов Ю. О.	78
Аналіз основних методик розрахунків для введення систем регулювання на перехрестях	
Шипов Є. Г.	80
Перспективи розвитку транспортної інфраструктури у смарт-містах	
Ящук Ю. І., Орда О. М.	81
Архітектура адаптивного управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику	
Засядько Д. В., Надутий Д. А.	84
Зменшення інтенсивності транспортних потоків в містах з радіальним плануванням	
Степанов О. В., Венгер А. С.	88
Інтеграція міської інфраструктури та транспортних систем для оптимізації руху у великих містах	
Kobdikova Sh. M., Asylbekova R. K., Nokhatov M. A.	91
The impact of road infrastructure wear on the safety and efficiency of freight transportation	
Ширін В. В., Кулик М. М.	95
Тенденції розвитку планувального каркасу сучасних міст	
Набатова М. Є., Левченко О. С.	98
Визначення раціональної організації дорожнього руху на ділянці магістралі районного значення	
Барміна Д. В.	101
Аналіз перспективних напрямків забезпечення без пекових умов доставки вантажів БПЛА в міських умовах	
Гусак Є. В.	104
Перспективи розвитку електровелосипедного руху в містах для покращення мобільності	
Сидорчук С. В.	107
Перспектива розвитку безпечної велосипедної інфраструктури в містах	
Смєлий В. Ю.	110
Перспектива створення системи управління мережею електроавтомобілів в місті	

Капінус С. В., Урденко В. С., Халютін І. Ю.	112
Аналіз програмних продуктів імітаційного моделювання для дослідження дорожнього руху	
Свічинська О. В.	115
Мікрохаби в міській логістиці останньої милі та їхній вплив на організацію доставки	

Секція 4. Інтеграція смарт-технологій для підвищення безпеки на дорогах

Бажинов Ан. В., Сіренко О. С., Плотніков М. О.	118
Інноваційні засоби запобігання ДТП	
Градова Є. О.	121
Проблеми транспортних систем міст України в умовах воєнного стану	
Кашканова А. А.	123
Integration of cyber-physical systems, artificial intelligence, and socio-technical moderators into the process of automated data collection for road safety audit	
Чуйко С. П., Кравченко О. П., Прохорчук М. В.	126
Концепція автоматизованої системи управління і контролю безпеки міських автобусних перевезень	
Степанов О. В., Наглюк І. С.	129
Інтеграція смарт-технологій у системах безпеки дорожнього руху	
Войтович О. А., Луб'яний П. В., Кузьменко І. О.	132
Методика експрес-діагностичного аналізу діяльності автотранспортного підприємства	

Секція 5. Екстрені ситуації на мережі та дорожній рух: інноваційні підходи

Кулай П. Л., Маклаков Я. С.	136
Аналіз ДТП на території Полтавської області, що відбулися в 2022 – 2024 роках	
Марченко В. В., Самойлов А. Б., Птиця Г. Г., Арушанов А. К.	140
Вимоги до забезпечення безпечного та ефективного перевезення великогабаритних компонентів вітрових турбін	
Наглюк І. С., Тугайбей Т. О., Рябушенко О. В., Кравченко О. П.	144
Аналіз зміни статистики ДТП в період воєнного стану	
Рябушенко О. В., Кашканов В. А., Краснов Ю. О.	146
Аналіз розподілу передаварійних швидкостей транспортних засобів	
Холодова О. О., Бугайова М. О., Холодов О. В.	149
Критичний аналіз методик оцінки безпеки регульованих і нерегульованих перехресть	
Холодова О. О., Бугайова М. О., Малінський В. В.	153
Оцінка ролі дорожніх знаків у підвищенні ефективності функціонування перехресть	
Степанов О. В., Третьяк А. О.	159
Інноваційні підходи до управління екстремними ситуаціями в мережі дорожнього руху	
Kobdikova Sh. M., Chupekov Y. K., Arimbekova P. M.	162
Proactive analysis of road traffic accident in the republic of Kazakhstan based on machine learning models and geographic information systems	
Просвірнін О. В., Рябушенко О. В., Попадинець Д. М.	166
Порівняльний аналіз аварійності на магістральних вулицях загальноміського та районного значення	
Абрамова Л. С., Кобзєв В. Г., Назаров О. С., Назарова Н. В., Гарнат А. С.	168
Застосування ймовірнісних методів для визначення показників безпеки дорожнього руху	

СЕКЦІЯ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ ДОРОЖНІМ РУХОМ ТА МОБІЛЬНІСТЮ

УДК 004.75:656.1

ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ДОРОЖНЬОГО РУХУ (BIG TRAFFIC DATA)

Рогов А. В.¹, Ковальчук Д. В.¹, Абрамова Л. С.²

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

a.v.rogov@karazin.ua

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

abramova_ls@ukr.net

Сучасні транспортні системи формують одну з найдинамічніших сфер цифрової економіки, генеруючи величезні обсяги даних із сенсорних мереж, камер відеоспостереження, GPS-трекерів, мобільних застосунків та інтелектуальних транспортних систем (ITS). Ці дані відображають просторово-часові параметри руху, поведінку учасників дорожнього руху (ДР), стан інфраструктури та навколишнього середовища. Однак традиційні обчислювальні середовища дедалі частіше виявляються неефективними для опрацювання таких потоків інформації через обмеженість локальних ресурсів, високу вартість апаратного забезпечення та затримку в отриманні результатів. Це створює бар'єри для своєчасного прийняття управлінських рішень і підвищення безпеки на дорогах, особливо в умовах зростання урбанізації та навантаження на транспортну інфраструктуру українських міст.

У цьому контексті технології хмарних обчислень (Cloud Computing) відкривають нові можливості для аналітики великих транспортних даних (Big Traffic Data), забезпечуючи масштабованість, гнучкість і доступність обчислювальних потужностей у режимі реального часу. Хмарні платформи дозволяють інтегрувати різноманітні джерела інформації, реалізувати розподілену обробку потоків даних і створити інтелектуальні моделі управління трафіком. Таким чином, цифровізація транспортної аналітики стає не лише технологічним, а й соціально-екологічним пріоритетом, оскільки використання таких підходів прямо відповідає Цілям сталого розвитку (ЦСР), зокрема [1]:

- ЦСР 9 «Індустріалізація, інновації та інфраструктура», адже розвиток цифрової транспортної аналітики сприяє створенню інноваційних рішень у сфері інфраструктури;

- ЦСР 11 «Сталий розвиток міст і спільнот», оскільки підвищення ефективності дорожнього руху та зменшення заторів знижують рівень забруднення й покращують мобільність громадян;

- ЦСР 13 «Боротьба зі зміною клімату», через оптимізацію маршрутів і скорочення викидів CO₂ транспортним сектором.

Отже, інтеграція хмарних обчислень у транспортну аналітику є важливим кроком у цифровій трансформації транспортної інфраструктури, спрямованій на підвищення її безпеки, екологічної стійкості та відповідності глобальним цілям сталого розвитку.

Хмарні обчислення (Cloud Computing) визначаються Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST) як модель забезпечення зручного доступу до обчислювальних ресурсів через мережу з мінімальними управлінськими зусиллями [2]. Ця технологія базується на принципах віртуалізації, розподіленої обробки та сервісної орієнтації. У транспортній сфері хмарні платформи дозволяють інтегрувати розподілені джерела даних, забезпечуючи єдиний простір для обробки потокової інформації [3]. Концепція Big Data охоплює не лише обсяги інформації, а й методи аналітики, що дозволяють перетворити неструктуровані дані на керовані знання. Для транспортних систем це включає аналіз часових рядів, кластеризацію маршрутів, виявлення аномалій та оптимізацію транспортних потоків [4-5]. Метою дослідження є підвищення ефективності управління ДР шляхом використання технологій хмарних обчислень для аналітики великих транспортних даних.

Загалом хмарні обчислення розглядаються як модель доступу до обчислювальних ресурсів через Інтернет, що реалізується за принципом on-demand та охоплює три рівні – IaaS,

PaaS і SaaS. Для транспортної галузі це означає можливість масштабованої обробки даних у режимі реального часу без потреби у власних дата-центрах. У поєднанні з концепцією Big Data хмарні технології формують основу інтелектуальних транспортних систем, здатних аналізувати потоки в реальному часі, прогнозувати зміни та оптимізувати дорожню інфраструктуру. Завдяки розвитку інструментів штучного інтелекту хмарні технології виходять за межі класичної аналітики, забезпечуючи інтелектуальне передбачення транспортної поведінки.

Великі дані ДР (Big Traffic Data) характеризуються високими параметрами Volume, Velocity, Variety та Veracity, що потребує застосування паралельних і розподілених обчислень. На цьому рівні ефективно працюють технології Hadoop, Apache Spark, MapReduce, які забезпечують багатопоточну обробку потоків даних.

Важливим та перспективним напрямом є поєднання хмарної інфраструктури з інструментами штучного інтелекту. Для прогнозування інтенсивності руху доцільно використовувати рекурентні нейронні мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory), які здатні моделювати часові залежності. Застосування згорткових мереж (CNN) у свою чергу дозволяє автоматично аналізувати відеопотоки з камер спостереження, розпізнавати транспортні об'єкти та аномальні ситуації. Таким чином, інтеграція штучного інтелекту в аналітику транспортних даних стає основою прогнозних систем нового покоління.

Для досягнення високої точності прогнозування транспортних процесів доцільним є поєднання аналітичних і нейромережевих підходів. Зокрема, додатково до алгоритмічних методів пропонується використовувати фрактальний підхід до опису транспортних потоків як самоорганізованих структур. Фрактальний підхід у дослідженнях транспортних систем базується на принципах нелінійної динаміки, коли транспортні потоки розглядаються як самоорганізовані структури з властивістю масштабної інваріантності. Фрактальний розмір D_f дозволяє кількісно описати ступінь складності системи та її тенденцію до хаотизації [6]. Зміна цього показника може свідчити про перехід системи від стаціонарного до кризового стану, наприклад, перед виникненням затору. Таким чином, поєднання фрактальної геометрії з методами хаотичного моделювання надає можливість описати динаміку транспортних процесів, які не підкоряються лінійним закономірностям.

У міжнародній практиці застосування хмарних сервісів у транспортній аналітиці набуло поширення в рамках програм EU Smart Mobility, Intelligent Transport Systems (ITS Europe) та ініціативи Cloud4Cities. Наприклад, у Сінгапурі система Smart Mobility 2030 використовує обчислювальні кластери AWS для обробки даних GPS і відео в режимі реального часу, що дозволило скоротити час реагування на аварійні події до трьох хвилин. Подібні рішення впроваджено в Барселоні та Гельсінкі, де хмарна аналітика використовується для адаптивного регулювання світлофорів та оцінки викидів CO₂ [7-8]. Міжнародний досвід підтверджує, що впровадження хмарної аналітики у транспортній сфері не лише підвищує ефективність ДР, а й сприяє реалізації політики «зеленої» мобільності, що є ключовим аспектом урбаністики сталого розвитку. Отримані результати міжнародних проєктів свідчать, що впровадження хмарних аналітичних платформ у дорожній сфері дає змогу зменшити затримки, підвищити безпеку й оптимізувати витрати. Подібні підходи можуть бути адаптовані для умов України з урахуванням регіональної специфіки транспортної мережі.

Запропоновано структурно-функціональну архітектуру системи хмарної аналітики транспортних даних, що розроблена з метою підвищення ефективності управління ДР шляхом інтеграції різномірних джерел даних у єдине хмарне аналітичне середовище. Така архітектура охоплює три взаємопов'язані рівні, що забезпечують повний інформаційно-аналітичний цикл – від збору й попередньої обробки до інтерпретації результатів і формування рішень:

1. Рівень збору даних. На цьому етапі формується вхідний масив інформації з різномірних джерел – сенсорних мереж, GPS-трекерів, міських камер відеоспостереження, мобільних застосунків і систем моніторингу руху. Важливим аспектом є уніфікація форматів даних і забезпечення їхньої достовірності.

2. Рівень хмарної обробки. Отримані дані передаються до хмарної інфраструктури (AWS, Azure, Google Cloud тощо), де здійснюється попереднє очищення, фільтрація, агрегування та аналітична обробка. Для цього використовуються інструменти паралельних і

розподілених обчислень (Hadoop, Apache Spark) та алгоритми машинного навчання (TensorFlow, PyTorch). Цей рівень забезпечує масштабованість, високу швидкість і можливість роботи з потоковими даними у реальному часі.

3. Рівень візуалізації та прийняття рішень. Результати аналітики інтегруються у системи візуалізації (Power BI, Grafana, Google Data Studio), які формують інтерактивні панелі показників – трафік, середня швидкість руху, індекс завантаженості доріг, рівень викидів CO₂, місця концентрації ДТП тощо. Цей рівень є інтерфейсом взаємодії між аналітичною системою та користувачем – диспетчером, аналітиком або органом управління дорожнім рухом.

На практичному рівні система може виконувати такі функції, як: прогнозування заторів і оптимізацію маршрутів громадського транспорту; автоматичне виявлення ДТП за відеопотоками у реальному часі; оцінку ефективності організації ДР з урахуванням часових і просторових закономірностей; а також екологічний моніторинг транспортних потоків у контексті сталого розвитку. Очікуваними результатами впровадження хмарної аналітики є такі характеристики:

- скорочення часу обробки даних у 10–20 разів;
- підвищення точності прогнозів інтенсивності руху на 25–30%;
- зниження рівня аварійності на основі превентивного виявлення ризикових ситуацій.

Отримані результати дослідження можуть бути використані для розроблення національної стратегії цифрової мобільності та інтеграції України в європейський простір ITS. У перспективі можливо запропонувати створення національної хмарної платформи управління дорожнім трафіком, яка інтегруватиме дані з регіональних систем, забезпечуватиме єдиний аналітичний центр і підтримуватиме концепцію Smart City.

Отже, використання хмарних обчислень у транспортній аналітиці є ключовим напрямом цифрової трансформації дорожньої інфраструктури. Поєднання хмарних технологій, нейронних мереж і фрактального аналізу дозволяє не лише підвищити ефективність управління ДР, а й створити інтелектуальне середовище адаптивного регулювання транспортних потоків. Застосування таких систем у реальному масштабі часу сприятиме підвищенню безпеки руху, зменшенню навантаження на інфраструктуру та переходу до стійких моделей міської мобільності. Використання хмарних аналітичних платформ у транспортному менеджменті відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР 9, 11, 13). Запровадження таких рішень у сфері ДР створює умови для прозорої аналітики, відкритих даних і підвищення ефективності взаємодії між муніципалітетами, бізнесом і громадянами.

Література

1. 17 цілей, щоб змінити наш світ. URL : <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/> (дата звернення: 10.11.2025).
2. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], 2011. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>.
3. Buyya R., Vecchiola C., Somasundaram T. S. Mastering Cloud Computing: Foundations and Application Programming. 2013. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06719-1>.
4. Chen M., Mao S., Liu Y. Big Data: A Survey. *Mobile Netw Appl*, 19, 2014. P.171–209. <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>.
5. Zhu L., Yu F. Wang Y., Ning B., Tang T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. PP. 1-16. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2815678>.
6. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco : W. H. Freeman And Company, 1983.
7. European Commission. Smart Mobility and ITS in Europe. URL : https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/smart-mobility_en (дата звернення: 11.11.2025).
8. Singapore Land Transport Authority. Smart Mobility 2030 Master Plan, 2014. URL : <https://www.lta.gov.sg/> (дата звернення: 11.11.2025).

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Чижик В. М., Стешенко В. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

chyzhyk88@gmail.com

Стрімкий розвиток урбанізації та зростання мобільності населення формують нові вимоги до ефективності міського пасажирського транспорту. Традиційні методи планування маршрутів і розкладів руху часто виявляються недостатніми для динамічних умов сучасного міста, де на транспортну мережу впливають змінні фактори: інтенсивність руху, погодні умови, пік пасажиропотоку, ремонтні роботи та непередбачувані обставини. У цьому контексті технології штучного інтелекту відкривають нові можливості для створення адаптивних, гнучких і оптимізованих транспортних систем.

Одним із прикладів ефективного застосування штучного інтелекту в управлінні міським пасажирським транспортом є впровадження платформи Optibus у компанії West Coast Motors (Шотландія) [1]. Компанія стикається з типовими для галузі викликами: складністю створення оптимальних графіків водіїв, нерівномірним завантаженням маршрутів, великою кількістю обмежень та потребою забезпечувати регулярні перевезення у змінному міському середовищі.

Optibus використовує алгоритми оптимізації на основі штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизованого формування розкладів руху та графіків змінності водіїв. Платформа моделює десятки тисяч можливих комбінацій, враховуючи часові вікна, типи транспортних засобів, вимоги до зміни водіїв, локальні обмеження маршруту та прогнозований пасажиропотік. Це дозволяє мінімізувати холості пробіги, зменшити операційні витрати й забезпечити рівномірне розподілення навантаження між водіями.

У результаті впровадження West Coast Motors зафіксувала скорочення часу планування, підвищення точності графіків, зменшення кількості суперечностей у розкладах і покращення загальної надійності транспортної мережі. Застосування Optibus продемонструвало, що інтеграція AI-рішень здатна значно підвищити ефективність управління транспортними системами навіть у регіонах зі складною географією та високою варіативністю умов експлуатації.

Ще одним успішним кейсом ефективного застосування штучного інтелекту в управлінні міським пасажирським транспортом є High Frequency Bus Route Optimization to Avoid Bus Bunching [2], реалізований міським агентством громадського транспорту RTC у Квебеку, Канада.

Проблема «bus bunching» – одночасне прибуття кількох автобусів одного маршруту, що призводить до нерегулярності руху, перевантаження окремих рейсів і зниження якості транспортних послуг, є типовою для високочастотних автобусних ліній. У межах відповідного кейсу було розроблено та впроваджено симуляційну ШІ-орієнтовану систему оптимізації, метою якої є стабілізація інтервалів руху та підвищення регулярності обслуговування.

Система використовує агентно-орієнтоване моделювання для відтворення взаємодії між автобусами, пасажирськими потоками та дорожньою інфраструктурою. На основі цих симуляцій алгоритм оптимізації коригує параметри роботи маршрутів – зокрема, швидкість, час відправлення з депо, тривалість зупинок, а також поведінкові змінні водіїв. Модель аналізує виникнення критичних ситуацій, коли один автобус починає наздоганяти інший через накопичення затримок, і формує коригувальні стратегії, спрямовані на відновлення рівного headway.

Застосування системи дало змогу продемонструвати значне зменшення частоти bus bunching та підвищення стабільності інтервалів у пікові години. Завдяки симуляційному підходу оператори отримали інструмент для тестування різних сценаріїв без втручання у реальні операції, що дозволяє обирати оптимальні параметри управління й підвищувати якість транспортного обслуговування.

Традиційні методи планування маршрутів і розкладів громадського транспорту зазвичай ґрунтуються на статичних моделях, ручних розрахунках та аналізі історичних даних. У таких підходах розклад формується періодично (переважно раз на сезон) і базується на усереднених значеннях пасажиропотоку, що часто не враховує динамічних змін транспортного попиту, коливань інтенсивності руху чи оперативних обмежень. Вони характеризуються високою трудомісткістю, значним впливом людського фактора та порівняно низькою адаптивністю до непередбачуваних ситуацій [3].

На відміну від цього, ІІІ-орієнтовані методи забезпечують динамічне та багатокритеріальне планування, використовуючи алгоритми машинного навчання, еволюційні підходи та пошук у великих просторах рішень. Штучний інтелект дозволяє моделювати складні взаємозв'язки між параметрами транспортної системи, прогнозувати пасажиропотік, оцінювати варіанти розкладів у реальному часі та автоматично оптимізувати маршрути з урахуванням змінних обмежень (трафік, зміни в дорожній мережі, трудові норми, доступність транспорту тощо). Такі системи здатні генерувати тисячі альтернативних рішень за секунди, оцінюючи їх за низкою критеріїв: мінімізація часу очікування, скорочення експлуатаційних витрат, зменшення холостих пробігів, підвищення регулярності руху та рівномірності навантаження на водіїв.

Впровадження ІІІ-методів у планування громадського транспорту дає змогу значно підвищити ефективність, гнучкість і надійність транспортних операцій, водночас скорочуючи витрати та забезпечуючи кращу відповідність реальному попиту пасажирів. У сукупності ці переваги роблять штучний інтелект ключовим інструментом для модернізації сучасної міської мобільності.

Література

1. Using AI to create better bus driver schedules, faster. URL: https://optibus.com/case/using-ai-to-create-better-bus-driver-schedules-faster/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 15.11.2025).
2. High Frequency Bus Route Optimization to Avoid Bus Bunching. URL: https://www.anylogic.fr/resources/case-studies/high-frequency-bus-route-optimization-to-avoid-bus-bunching/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 15.11.2025).
3. Jevinger, Å., Zhao, C., Persson, J.A. et al. Artificial intelligence for improving public transport: a mapping study. 2024. Public Transp 16, 99-158. <https://doi.org/10.1007/s12469-023-00334-7>.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ КОРИДОРІВ

Степанов О. В.¹, Наглюк І. С.², Oleksandr Kolii³

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна,

³Dresden University of Technology, Dresden, Germany

e-mail: o.stepanov@nubip.edu.ua

У сучасних урбанізованих агломераціях стрімке збільшення кількості транспортних засобів і зростання інтенсивності руху призводять до виникнення критичних проблем функціонування транспортної системи. Перевантаження вулично-дорожньої мережі, зниження середньої швидкості руху, збільшення тривалості поїздок, підвищення рівня аварійності та погіршення екологічної ситуації стають системними викликами, які потребують комплексного підходу до управління транспортними потоками. Традиційні методи регулювання руху, що базуються на фіксованих циклах світлофорного управління, втрачають ефективність в умовах динамічних змін транспортної ситуації, оскільки не здатні оперативно реагувати на коливання інтенсивності руху та локальні критичні навантаження.

Впровадження адаптивних систем управління дорожнім рухом (АСУДР) розглядається як один із ключових напрямів модернізації міських транспортних мереж. Ці системи ґрунтуються на використанні сенсорних технологій, інтелектуальної обробки даних, алгоритмів оптимізації та цифрових інструментів прогнозування стану транспортних потоків. Вони забезпечують можливість автоматичного регулювання параметрів світлофорних об'єктів, адаптації режимів роботи транспортної інфраструктури до реальних умов та підвищення ефективності руху як у масштабі окремого перехрестя, так і в межах цілого району чи міста. Досвід країн Європейського Союзу свідчить, що використання АСУДР сприяє зниженню заторів на 15–30 %, скороченню часу поїздки до 25 %, а також зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод завдяки стабільнішому розподілу транспортних потоків [1].

Аналіз ключових проблем організації дорожнього руху та передумови впровадження АСУДР

Однією з основних передумов розвитку адаптивних систем управління є структурні проблеми міського дорожнього руху. Зокрема, значну роль відіграють вузькі місця вуличної мережі, обмежена пропускна здатність ключових транспортних коридорів, наявність великої кількості нерегульованих перехресть, недостатня пріоритезація громадського транспорту та несинхронізованість світлофорних об'єктів. У багатьох містах фіксуються суттєві часові витрати, спричинені випадковими коливаннями інтенсивності руху та нераціональними режимами регулювання. Тому використання адаптивних методів управління, які дозволяють реагувати на зміни трафіку в реальному часі, є необхідною умовою підвищення ефективності транспортної системи [2].

АСУДР характеризуються можливістю інтеграції з різними джерелами даних: індуктивними петлями, відеоаналітикою, радіолокаційними датчиками, даними GPS від транспортних засобів, мобільними додатками та інформаційними платформами. Завдяки цьому вони забезпечують формування актуальних моделей транспортних потоків та оптимізацію світлофорних циклів відповідно до поточної ситуації. Важливим є й те, що такі системи дозволяють мінімізувати вплив випадкових факторів, стабілізувати транспортні потоки, зменшити кількість непередбачуваних заторів та покращити роботу громадського транспорту в години пік.

Методи адаптивного управління дорожнім рухом

Сучасні АСУДР базуються на низці наукових підходів, серед яких ключовими є:

Методи локальної адаптації.

Ці системи змінюють параметри регулювання на окремих перехрестях у відповідь на локальні зміни інтенсивності. Вони є ефективними для невеликих вуличних мереж або в

місцях із високою варіабельністю транспортних потоків. Основним недоліком є відсутність системного впливу на загальну транспортну мережу.

Системи координаційної адаптації.

Передбачають взаємодію кількох світлофорних об'єктів у межах транспортного коридору. Координація роботи спрямована на створення «зеленої хвилі» для оптимізації пропускної здатності. Такі системи використовують математичні моделі оптимізації, що дозволяють формувати синхронізовані цикли залежно від пікових навантажень і пріоритетів руху.

Інтелектуальні адаптивні системи на основі прогнозних моделей.

Вони використовують алгоритми машинного навчання, нейронні мережі, статистичні моделі та методи прогнозування для передбачення транспортної ситуації на кілька хвилин уперед. Завдяки цьому система не лише реагує на зміни, а й запобігає формуванню заторів, коригуючи режими регулювання ще до того, як транспортні потоки досягнуть критичних значень [3].

Системи із пріоритезацією громадського транспорту.

Механізм роботи ґрунтується на використанні спеціалізованих датчиків або GPS-даних, що дозволяють визначати наближення маршрутних транспортних засобів. Світлофорні об'єкти автоматично подовжують фазу «зеленого» сигналу або скорочують фази інших напрямів, зменшуючи затримки руху громадського транспорту.

Ефективність впровадження та результати застосування АСУДР

Досвід міст, які вже мають значні напрацювання у впровадженні адаптивних систем, доводить їхню високу результативність. Зокрема, у середньому спостерігаються такі ефекти:

- зменшення затримок на перехрестях на 20–40 %;
- скорочення довжини черг на 25–35 %;
- зниження середнього часу поїздки на 10–25 %;
- підвищення пропускної здатності транспортних коридорів до 15 %;
- стабілізація транспортних потоків і зменшення кількості аварійних ситуацій у коридорах інтенсивного руху [4].

Для України впровадження таких систем може стати ключовим інструментом модернізації транспортної інфраструктури. Зокрема, адаптивні системи здатні забезпечити раціональне використання вулично-дорожньої мережі великих міст, сприяти пріоритезації громадського транспорту, оптимізувати логістичні маршрути та зменшити перевантаження центральних районів. Додатково, адаптивні системи можуть бути інтегровані з міськими платформами відкритих даних, що підвищить рівень прозорості управління транспортною інфраструктурою та сприятиме її подальшій цифровізації.

Основні напрями вдосконалення АСУДР у міському середовищі

Важливими стратегічними інструментами розвитку адаптивних систем управління є:

- модернізація світлофорної інфраструктури з переходом до інтелектуальних контролерів;
- широке впровадження відеоаналітики та сенсорних мереж для збору даних у реальному часі;
- інтеграція адаптивних систем з міським громадським транспортом;
- створення єдиних центрів управління дорожнім рухом із використанням хмарних обчислень і платформних рішень;
- удосконалення алгоритмів прогнозування та оптимізації;
- розробка моделей оцінювання ефективності впровадження АСУДР у конкретних транспортних коридорах [5].

Крім того, актуальним є питання кібербезпеки транспортних даних, оскільки адаптивні системи можуть бути вразливими до зовнішнього втручання. Надійний захист інформаційних потоків та унеможливлення несанкціонованого доступу є обов'язковою умовою ефективної та безпечної роботи АСУДР у великих містах.

Адаптивні системи управління дорожнім рухом є необхідною складовою інтелектуальної транспортної інфраструктури сучасного міста. Їх упровадження забезпечує підвищення пропускної здатності транспортних коридорів, скорочення затримок, покращення

екологічної ситуації та зниження рівня аварійності. Використання алгоритмів машинного навчання, прогнозних моделей та сенсорних мереж забезпечує своєчасне реагування на зміни транспортної ситуації та підвищує ефективність роботи транспортної системи. У перспективі інтеграція АСУДР з міськими платформами управління та інтелектуальними сервісами сприятиме подальшій цифровізації та оптимізації транспортної інфраструктури, забезпечуючи сталий розвиток міських агломерацій.

Література

1. European Commission. Intelligent Transport Systems in Urban Areas: Policy Framework and Implementation Guidelines. Brussels, 2022.
2. Gartner N. Adaptive Traffic Control: Principles and Applications. Transportation Research Record, Washington, 2021.
3. Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V. Overview of Traffic Signal Control Methods. Transportation Science, 2020.
4. ITS World Congress. Adaptive Urban Traffic Management Solutions: Global Best Practices. Hamburg, 2021.
5. TRB. Smart and Adaptive Traffic Control Systems: Research and Development Advances. National Academies Press, Washington, 2023.

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ТРАНСПОРТНУ ОСВІТУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ

Запорожцева О.В.¹, Запорожцев А.Г.¹, Копитков Д.М.²

¹*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

e-mail: zhelen77@ukr.net

²*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова*

e-mail: kopytkov_dm@ukr.net

В останні роки поява і активне проникнення технологій штучного інтелекту (ШІ) у всі сфери життя спричинили значний економічний і культурний вплив на суспільство. Особливої уваги набув випуск восени 2022 року компанією OpenAI чат-бота ChatGPT для обробки природної мови, який продемонстрував широкий аудиторії можливості ШІ у виконанні когнітивно складних завдань. Проте інструменти ШІ застосовувалися й раніше в різних сферах – від віртуальних ігор, наприклад шахів, до цифрових помічників та соціальних мереж.

ШІ дозволяє машинам виконувати завдання, які традиційно потребували людського мислення: приймати рішення, вирішувати проблеми, розуміти та імітувати природну мову, навчатися на неструктурованих даних. Це прискорює виробничі процеси, автоматизує рутинні задачі та звільняє час для більш креативної діяльності. Генерація контенту, фото та відеоматеріалів значно полегшує навчальний процес і робить його більш інтерактивним.

Особливо широкого поширення технології ШІ, здатної до самонавчання, набули в освіті. Так, у жовтні 2023 року Forbes Advisor провів опитування 500 практикуючих педагогів у США щодо використання ШІ в навчанні [1]. Результати показали, що серед освітян є як противники, так і прибічники інтеграції ШІ. Втім, неможливо заперечувати його об'єктивну присутність у сучасному цифровізованому світі та потенціал у трансформації освітніх процесів.

У контексті транспортної освіти ШІ відкриває унікальні можливості для формування трансверсальних компетентностей майбутніх фахівців у сфері управління дорожнім рухом.

Сучасний розвиток транспортної галузі характеризується стрімкою цифровізацією, автоматизацією та впровадженням інтелектуальних транспортних систем (ITS). Ці процеси докорінно змінюють вимоги до фахівців, які працюватимуть у сфері управління дорожнім рухом, транспортної логістики, міської мобільності та забезпечення безпеки дорожнього руху. В умовах динамічних технологічних трансформацій підготовка майбутніх спеціалістів повинна не лише забезпечувати фундаментальні професійні знання, але й формувати трансверсальні (надпредметні) компетентності: критичне та системне мислення, цифрову грамотність, аналітичні навички, здатність працювати з даними та взаємодіяти з інтелектуальними системами [2].

Інтеграція ШІ дозволяє використовувати інтелектуальні симулятори, адаптивні тренажери, системи аналізу великих даних та моделі транспортних потоків. Це сприяє розвитку критичного мислення, аналітичних навичок, здатності до самонавчання та прийняття рішень у складних і непередбачуваних умовах, що є ключовими для роботи з інтелектуальними транспортними системами та управління дорожнім рухом у містах.

Сучасні міста стикаються з проблемами високої інтенсивності транспортних потоків, заторів, аварійності та підвищених викидів. Традиційні методи управління дорожнім рухом вже не завжди ефективні, оскільки не враховують динамічні зміни в трафіку та поведінку учасників руху. Саме тут ШІ демонструє свою практичну цінність.

Одним із ключових інструментів модернізації транспортної освіти стає інтеграція технологій штучного інтелекту (ШІ), які дають змогу підвищити ефективність навчання, наблизити його до реальних умов професійної діяльності та підготувати студентів до роботи з технологіями, які визначатимуть майбутнє транспортної індустрії.

Використання симуляторів та тренажерів, які працюють із застосуванням алгоритмів ШІ, є одним із найефективніших напрямів удосконалення транспортної освіти.

Інтелектуальні симулятори [3]:

- моделюють складні дорожні ситуації з урахуванням погодних умов, інтенсивності руху, типів транспортних засобів та поведінки учасників дорожнього руху;
- забезпечують можливість безпечного опрацювання сценаріїв аварійних ситуацій та стресових умов;
- дозволяють аналізувати рішення студентів і автоматично надавати рекомендації щодо їх покращення;
- формують компетентності системного аналізу, прогнозування та адаптивного реагування.

Особливо важливою є можливість моделювати сценарії роботи операторів центрів управління дорожнім рухом: регулювання світлофорних фаз, реагування на затори, оптимізація транспортних потоків у режимі реального часу. Такі тренажери створюють умови, максимально наближені до роботи у диспетчерських центрах Smart City, дозволяючи студентам відчувати реальний характер процесів прийняття рішень.

Транспортні системи сучасних міст генерують величезні обсяги даних: телеметричні показники, дані з Wi-Fi/GPS, відеопотоки, інформацію з детекторів транспортних потоків, громадського транспорту, систем автоматичного зважування тощо. Уміння працювати з великими даними стає необхідною компетентністю для фахівця з управління дорожнім рухом.

Впровадження ІІІ в освітній процес дозволяє студентам:

- аналізувати структуру транспортних потоків та просторово-часові закономірності руху;
- прогнозувати виникнення заторів, аварійності, надмірного навантаження на окремих ділянках мережі;
- моделювати оптимізаційні рішення щодо організації руху;
- працювати з реальними наборами даних та здійснювати їх автоматизовану обробку за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Результатом такого навчання є формування здатності приймати обґрунтовані рішення на основі даних, що є ключовою вимогою сучасної професійної діяльності.

Системи адаптивного управління дорожнім рухом, які використовують ІІІ, є центральним елементом сучасної транспортної інфраструктури. Студенти повинні розуміти принципи роботи таких систем, як [4]:

- адаптивні світлофорні комплекси, що підлаштовують сигнальні плани до реального трафіку;
- системи пріоритезації громадського транспорту;
- інтелектуальні алгоритми реагування на інциденти;
- системи прогнозування транспортних ситуацій;
- автоматизовані платформи керування мобільністю.

Вивчення принципів роботи цих систем забезпечує глибоке розуміння структури міської мобільності та ролі ІІІ в управлінні дорожнім рухом. Це сприяє не лише професійній підготовці, а й розвитку критичного мислення та здатності працювати в умовах технологічної мультикомпонентності.

Застосування систем штучного інтелекту для персоналізації навчання дозволяє:

- визначати рівень підготовки кожного студента;
- адаптувати навчальні матеріали до індивідуальних потреб та темпу засвоєння;
- формувати рекомендації щодо додаткового опрацювання окремих тем;
- створювати адаптивні навчальні траєкторії, оптимальні для конкретного профілю спеціальності (транспортні технології, дорожній рух, логістика, інфраструктура).

Такі системи підвищують мотивацію студентів та формують культуру відповідального навчання, що є важливою складовою професійного становлення.

Інтеграція ІІІ сприяє розвитку критичного мислення через роботу з неоднозначними або неповними даними, аналіз альтернативних сценаріїв управління рухом, обґрунтування рішень у ситуаціях невизначеності, усвідомлення етичних аспектів застосування алгоритмів ІІІ у транспортній галузі.

Студенти вчаться ставити запитання щодо достовірності даних, оцінювати ризики та наслідки рішень, перевіряти гіпотези та будувати логічні моделі, формувати навички командної та міждисциплінарної взаємодії.

Ці компетентності є ключовими у сфері управління дорожнім рухом, де рішення мають значний вплив на безпеку, мобільність і якість життя громадян.

Інтеграція ІІІ в транспортну освіту значно розширює можливості підготовки фахівців у галузі управління дорожнім рухом. Вона формує у студентів компетентності, необхідні для роботи з інтелектуальними транспортними системами, цифровими платформами мобільності, аналітичними інструментами прогнозування та моделювання.

Інтеграція технологій штучного інтелекту в освітній процес не лише модернізує підходи до підготовки фахівців у транспортній сфері, а й цілеспрямовано сприяє формуванню в студентів критичного мислення – ключової компетентності для ефективної роботи в умовах складних технологічних систем та динамічно змінюваної мобільності.

Література

1. Marr B. How Is AI Used In Education – Real World Examples Of Today And A Peek Into The Future. <https://bernardmarr.com/how-is-ai-used-in-education-real-world-examples-of-today-and-a-peek-into-the-future/>
2. OECD. (2021). *AI and the Future of Skills* [Електронний ресурс]. – OECD Publishing. – Режим доступу: <https://www.oecd.org/publications/ai-and-the-future-of-skills-5f70c0b0-en.htm>
3. Масименко М. О., Ковальчук О. В., Ковальчук О. О. (2021). Штучний інтелект у системах керування транспортними засобами. *Науковий вісник НГУ*, 1(1), 45–50.
4. Як ІІІ може вивчати людські упередження – і чому це важливо для управління дорожнім рухом [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.sea.com.ua/ua/news/ak-si-moze-perejmati-ludski-uperedzenna-i-comu-ce-vazливо-dla-upravlinna-doroznim-ruhom/?srsltid=AfmBOopRz0m5nLcSQUxEBFCryHSf31YOGeMtSHAHVlbk-EoDtjps6cBW&utm_source=chatgpt.com

СЕКЦІЯ 2. АДАПТИВНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ У МІСТАХ

УДК 656.13

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ РУХУ НА МІСЬКОМУ ПЕРЕХРЕСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛЬОВОГО МЕТОДУ

Балюк Є. О.¹ аспірант; Євтехова С. С.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²ВСП Автотранспортний фаховий коледж НТУ "Дніпровська політехніка"

yevhenii.baliuk@gmail.com

У сучасних умовах зростання інтенсивності дорожнього руху питання забезпечення безпеки на міських перехрестях набуває особливої актуальності. Перехрестя є складними елементами транспортної мережі, де перетинаються потоки транспортних засобів і пішоходів, що створює підвищений ризик виникнення аварійних ситуацій. Тому оцінювання рівня безпеки таких ділянок має важливе значення для подальшого вдосконалення системи організації дорожнього руху.

Серед основних методів дослідження транспортних перехресть виділяють камеральний та польовий підходи. Кожен з них має свої переваги й недоліки, залежно від поставлених завдань і доступних ресурсів. Камеральний метод дослідження перехрестя передбачає аналіз даних, статистики та моделювання руху в кабінетних умовах, тоді як польовий метод полягає в безпосередньому спостереженні за дорожньою ситуацією на місці. Камеральний підхід ефективний для попередньої оцінки, але польовий метод є більш дієвим, оскільки дозволяє враховувати реальні умови, такі як поведінка водіїв, пішоходів і непередбачувані фактори, які важко передбачити за допомогою моделювання. Тож в дослідженні був використаний саме польовий метод «конфліктних ситуацій»(МКС), який є важливим інструментом для оцінки безпеки дорожнього руху, особливо при розробці проектів реконструкції складних ділянок доріг. Цей метод дозволяє виявляти потенційні небезпечні зони на дорозі та допомагає у прийнятті заходів для їх усунення або мінімізації ризиків.[1]

Аналіз транспортних потоків дозволяє виявити ділянки, де можуть виникати проблеми, такі як затори або небезпечні взаємодії транспортних потоків.[2] Ці самі перетини являють собою точки на перехресті м. Кременчук вул. Героїв Крут та Лесі Українки, що використовуються у методі конфліктних точок, і які зображені на картограмі на рис. 1.

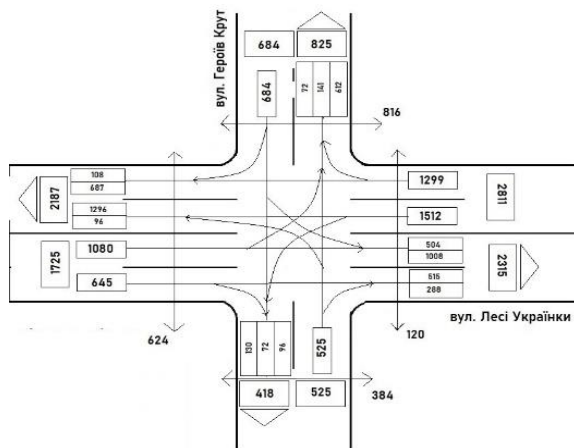


Рис.1 - Картограма транспортних та пішохідних потоків

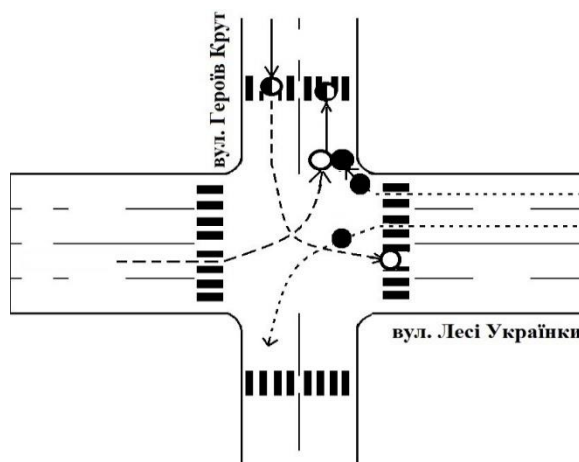


Рис.2 - Картограма конфліктних потоків та точок на перехресті

○ — точки частих конфліктних ситуацій; ○ — точки помірної кількості конфліктних ситуацій; ● — точки малої кількості конфліктних ситуацій.

За допомогою метода конфліктних точок ми можемо проаналізувати отримані дані, визначити місця з підвищеною аварійністю, оцінити безпеку даного перехрестя та оптимізувати безпеку руху на ньому.[3]

Рівень забезпечення безпеки руху, коефіцієнт аварійності, на перехресті складає

$$K_0 = \frac{9,4053 \cdot 0,12 \cdot 10^7}{25 \cdot (5745)} = 7,8582 \quad (1)$$

Отримавши значення K_0 , робимо висновки про небезпечність перехрестя: якщо $3 < K_0 < 8$ — перехрестя майже безпечне.

Але цей метод надає нам лише теоретичну інформації про перехрестя, в той час як польовий метод «конфліктних ситуацій» є більш дієвим, та вирішує вже наявні аварійні ситуації на перехресті. До того ж дані цих методів не завжди є схожими, тому ми використовуємо саме польовий підхід до дослідження.

Даним методом були досліджені конфліктні точки на перехресті, де перетинаються або небезпечно зближаються траєкторії руху різних учасників, що призводить до конфліктних ситуацій. Спостереження проводилися під час пікових навантажень, що дало змогу зібрати дані про ситуації різної складності — від легких до критичних. МКС оцінює небезпечні моменти на основі змін у поведінці водіїв, таких як швидкість і траєкторія, що дозволило створити детальну «карту безпеки» перехрестя для прогнозування ймовірності ДТП. У роботі представлено проведення аналізу конфліктних ситуацій на зазначеному вище перехресті, яке є важливим транспортним вузлом.

Під час спостережень було виявлено 24 конфліктні ситуації, серед яких 13 класифікуються як легкі, 8 — як середні, і 3 — як критичні. У результаті було виявлено 7 конфліктних точок, де виникли ці ситуації. Ці точки представлені на Рис. 2.

Кількість конфліктних ситуацій, приведених до критичної, можна визначити залежністю[1]:

$$K_{en} = 0,44 \cdot K_1 + 0,83 \cdot K_2 + K_3 \quad (2)$$

де K_1 — кількість легких конфліктних ситуацій на перехресті;

K_2 — кількість середніх ситуацій;

K_3 — кількість критичних ситуацій за період спостережень, рівний 1 год.

Маючи наші дані спостережень, отримуємо таке значення:

$$K_{en} = 0,44 \cdot 13 + 0,83 \cdot 8 + 3 = 15,36 \sim 16$$

Дана кількість конфліктних ситуацій є небезпечною на перехресті. В той час, як значення аварійності методу конфліктних точок $K_0 = 8$, що відповідало майже безпечному перехрестю.

Польове дослідження показало протилежні результати: зібрані дані свідчать, що перехрестя потребує впровадження додаткових заходів для підвищення безпеки. Метод аналізу конфліктних ситуацій надає точнішу та реальнішу картину, оскільки спирається на фактичні події — аварії, різкі маневри, порушення правил. Це робить його ефективнішим порівняно з камеральними підходами, які базуються лише на вторинній інформації.

Особливість цього методу полягає в тому, що він охоплює не лише вже зафіксовані ДТП, а й потенційно небезпечні події, завдяки чому дає змогу прогнозувати проблемні ділянки ще до виникнення інцидентів. Серед основних переваг методу конфліктних ситуацій — здатність передбачати ризики та швидко реагувати, адже збір даних про небезпечні моменти відбувається без очікування статистики аварій, формування якої потребує тривалого часу.

Крім того, цей метод дає змогу глибше зрозуміти контекст виникнення небезпечних ситуацій, фіксуючи основні причини конфліктів — такі як порушення правил дорожнього руху, наявність перешкод на проїзній частині чи особливості поведінки водіїв. Водночас недоліком методу є те, що для отримання повної та достовірної картини необхідний тривалий період спостережень, а також його чутливість до сезонних коливань. Камеральний метод, попри певні обмеження, має свої переваги: завдяки використанню проектної документації він забезпечує точність і може бути ефективним на початковому етапі аналізу, що дає змогу

зменшити потребу у проведенні трудомістких польових досліджень, особливо на складних ділянках.

Результати аналізу конфліктних ситуацій на досліджуваному перехресті дозволили визначити ключові проблемні зони та встановити основні причини виникнення небезпечних моментів. Застосування цього методу дало змогу не лише виявити поточні загрози, а й передбачити потенційні ризики. Серед основних проблем було визначено порушення правил проїзду світлофорів, ігнорування пріоритетів руху, а також недостатню увагу до пішоходів на нерегульованих переходах.

У результаті проведеного дослідження можна запропонувати низку заходів для підвищення рівня безпеки руху. Зокрема, доцільно вдосконалити світлофорне регулювання, здійснити перерахунок тривалості світлофорного циклу або збільшити кількість його фаз, а також встановити додаткові дорожні знаки чи обмежити виконання небезпечних маневрів. Реалізація цих рішень сприятиме зменшенню кількості конфліктних ситуацій та підвищенню загальної безпеки руху на перехресті. Після впровадження запропонованих рішень перехрестя необхідно повторно дослідити з використанням польових методів.

Польовий метод оцінювання рівня безпеки руху на міському перехресті довів свою ефективність, оскільки дає змогу досліджувати реальні умови дорожнього середовища та поведінку учасників руху, що неможливо повністю відтворити за допомогою моделювання. Саме спостереження безпосередньо на місці дозволяє виявити небезпечні ситуації, визначити їхню частоту та характер, а також оперативно ідентифікувати критичні точки, які потребують змін в організації руху.

Для подальшого підвищення точності аналізу доцільно застосовувати комбіновані методи, зокрема аудіовізуальний моніторинг із використанням відеокамер для тривалого спостереження за рухом транспортних засобів, а також метод опитування водіїв. Останній дає можливість отримати якісні дані щодо їхньої поведінки, дотримання правил дорожнього руху та суб'єктивного відчуття безпеки на даному перехресті.

Поєднання польових спостережень, відео аналізу та соціологічних досліджень створить комплексну основу для оцінювання рівня безпеки руху, дозволить визначити закономірності небезпечних маневрів, виявити ділянки з підвищеним ризиком і розробити ефективні заходи для підвищення безпеки дорожнього руху в міських умовах.

Література

1. Аудит безпеки дорожнього руху : підручник / Абрамова Л.С. та ін. Харків: ХНАДУ, 2015. 22с.
2. Chang, L. Traffic conflict technique for safety evaluation. - Elsevier, 2019.
3. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Форнальчик Є. Ю. та ін. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТРАНСПОРТНА СИСТЕМА МІСТА ЖЕШУВ**Є. Б. Демченко, М. Ю. Ломага***Український державний університет науки і технологій,*e.b.demchenko@ust.edu.ua

В сучасних умовах, коли транспорт стає дедалі важливішою складовою розвитку кожного міста як у економічному, так і в географічному аспектах, із розширенням міських агломерацій постає складне завдання забезпечення ефективного перевезення пасажирів і вантажів без затримок. Крім того, унаслідок стрімких темпів автомобілізації все більш актуальною стає проблема викидів парникових газів та шумового забруднення урбанізованих територій. Такий розвиток міського середовища зумовлює необхідність впровадження нових підходів до організації роботи транспорту, зокрема особливого значення набувають інтелектуальні транспортні системи (ІТС), що інтегрують електроніку, автоматику та аналітичні методи для оптимізації міських пасажирських та вантажних перевезень.

Одним з лідерів впровадження інтелектуальних транспортних систем є м. Жешув (Польща), аналіз досвіду якого представляє значний науковий та практичний інтерес в рамках розвитку та удосконалення транспортних систем міст України. Розвиток ІТС в містах Польщі зумовлений загальноєвропейськими тенденціями та політикою Європейського Союзу, спрямованими на зниження негативного впливу транспортного сектора на навколишнє середовище, підвищення ефективності перевезень і рівня безпеки дорожнього руху. У Польщі концепція ІТС почала активно розвиватися на початку 2000-х років, що відповідало загальноєвропейському курсу на впровадження інноваційних технологій у сфері транспортної інфраструктури та управління дорожнім рухом. Місто Жешув, розвиваючи концепцію «*Rzeszów – stolica innowacji*» («Жешув – столиця інновацій»), впроваджує комплексні рішення, спрямовані на оптимізацію транспортних процесів, підвищення ефективності перевезень та покращення безпеки дорожнього руху. Центральне місце серед цих ініціатив посідає створення єдиної комплексної інтелектуальної транспортної системи *RIST (Rzeszowski Inteligentny System Transportowy)*. Проєкт реалізовувався у 2015–2017 роках за рахунок коштів фондів Європейського Союзу в межах програм розвитку міського транспорту Жешува. Система інтегрує низку підсистем, зокрема: управління дорожнім рухом, надання пріоритету громадському транспорту, автоматизоване збирання даних і відеоспостереження, безконтактну систему оплати, механізми інформування пасажирів у режимі реального часу, а також управління паркувальними зонами.

Підсистема управління дорожнім рухом передбачає адаптивне керування світлофорними об'єктами на основі даних, отриманих із GPS-модулів, камер відеоспостереження та дорожніх сенсорів. Її основною метою є оптимізація транспортних потоків, скорочення часу очікування на перехрестях і запобігання утворенню заторів.

Пріоритет для громадського транспорту забезпечується завдяки відстеженню місцеположення транспортних засобів за допомогою GPS-модулів, установлених в автобусах. У момент наближення громадського транспорту до перехрестя система автоматично подає сигнал для ввімкнення зеленого світла, що скорочує час простою та сприяє регулярності руху.

Підсистема автоматизованого збору інформації та моніторингу дорожнього руху використовує радарні датчики й відеоаналітичні технології для вимірювання інтенсивності руху, середньої швидкості та щільності транспортних потоків. Вона також забезпечує безперервне спостереження за дорожньою ситуацією, фіксацію порушень правил дорожнього руху та оперативне реагування у випадках аварійних ситуацій.

Підсистема безконтактної оплати забезпечує можливість здійснення розрахунків за проїзд банківськими картками, а також за допомогою електронної картки мешканця міста (*Rzeszowska Karta Miejska – RKM*). Окрім оплати проїзду, картка *RKM* використовується для сплати за паркування та інші міські послуги, що сприяє інтеграції транспортної та сервісної інфраструктури міста.

Підсистема пасажирської інформації включає табло змінної інформації, розміщені на зупинках громадського транспорту та всередині транспортних засобів. Вони відображають прогнозований час прибуття автобусів у режимі реального часу. Актуальна інформація також доступна через мобільний додаток і вебпортал *Transport Rzeszów*, що підвищує зручність користування транспортом для пасажирів.

Підсистема управління паркуванням охоплює понад 200 паркоматів, систему відеоспостереження для моніторингу заповненості паркувальних місць, а також мобільний додаток, який дозволяє здійснювати оплату стоянки дистанційно.

Всі аналітичні та контрольні модулі системи, що забезпечують моніторинг транспортної ситуації, автоматичне регулювання світлофорних об'єктів відповідно до інтенсивності руху, координацію дій дорожніх служб і поліції, управління інформаційними табло, а також архівування даних для подальшого аналізу та планування транспортних процесів зосереджені в Центрі управління транспортом, що розташований у будівлі Міського управління транспорту Жешува.

Окрім упровадження системи *RIST*, м. Жешув у 2006 р. стало першим у Польщі містом, яке почало використовувати альтернативні джерела енергії в міських перевезеннях. На початковому етапі було закуплено автобуси, що працюють на природному газі, а з 2018 р. – електробуси. Для забезпечення їхньої експлуатації створено відповідну інфраструктуру, зокрема встановлено станції заряджання. Електробуси наразі обслуговують два маршрути – 0А та 0В, довжиною 9,2 км кожен. Вони проходять територією, де планується створення «зони нульових викидів».

Паралельно здійснено модернізацію інфраструктури зупинок громадського транспорту. Особливу увагу привертають «розумні зупинки» – павільйони, обладнані системами опалення та кондиціювання, які живляться від сонячних панелей. Надлишок виробленої енергії накопичується в акумуляторах і використовується для освітлення, заряджання мобільних пристроїв та обігріву.

Крім того, реалізується проєкт Підкарпатської агломераційної залізниці, метою якого є з'єднання Жешува з аеропортом Ясьонка-Жешув і сусідніми населеними пунктами. У межах проєкту передбачено будівництво нових станцій, пасажирських платформ і перехоплювальних паркінгів типу *Park & Ride* [1].

Результати впровадження системи *RIST* засвідчили її високу ефективність. Зокрема, час подорожей у години пік скоротився на 10-15%, інтенсивність заторів зменшилася на 20%, а кількість скарг пасажирів на затримки руху громадського транспорту знизилася удвічі [2]. Кожна із запроваджених інновацій сприяла підвищенню загальної оцінки якості життя в місті.

Таким чином, ІТС є одним із ключових елементів сучасної концепції розумного міста, орієнтованої на забезпечення сталого розвитку, підвищення ефективності міської інфраструктури та покращення якості життя населення. Досвід м. Жешув демонструє, що навіть середнє за розміром європейське місто може реалізувати комплексну ІТС, що забезпечує ключові функції, необхідні для ефективного управління міською логістикою, зокрема збір даних, оброблення інформації, передавання даних, інформаційну підтримку користувачів та управління транспортними потоками.

Література

1. Stec S. The role of innovation in urban logistics on the example of Rzeszów. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 77–89. URL: <https://doi.org/10.22630/eiol.2020.5.4.30>
2. Tompalski K., Leśniak A. Inteligentne systemy transportowe i ich zastosowanie w mieście Rzeszowie. *Zeszyty Studenckie „Nasze Studia”*. 2019. No. 9. P. 68–77. URL: <https://czasopisma.bg.ug.edu.pl/index.php/naszestudia/article/view/3376>.

METHOD FOR OFFSET ADJUSTMENT IN COORDINATED URBAN ARTERIAL SIGNAL CONTROL

Yevhen Liubiyi (Любий Є. В.)

Kharkiv National Automobile and Highway University

lion_khadi@ukr.net

Known existing methods of coordinated traffic signal control (MAXBAND, SCOOT, MULTIBAND, TRANSYT, PASSER II) are based on calculating offsets between signalized intersections depending on traffic flow speed, distances between intersections, and cycle duration. However, they do not take into account the dynamic processes of vehicle acceleration after the green signal begins – processes that occur due to the buildup of vehicles in queues at stop lines of downstream coordinated intersections [1–4].

The method most similar in technical essence, purpose, and achieved result to the one under consideration is presented in the dissertation [5], which proposes a technique for determining the parameters of coordinated traffic signal plans considering the size of the platoon of vehicles moving along the coordinated section of an urban arterial. The drawback of that approach is the lack of consideration of the influence of additional vehicles entering the coordinated arterial from secondary approaches and/or performing U-turns on the main corridor. These vehicles accumulate at the stop lines of subsequent coordinated intersections, thereby disrupting the smooth movement of the platoons.

Existing modern methods of signal coordination [5–12] do not guarantee uniform movement of green-wave vehicle platoons, especially in the presence of additional vehicles. Neglecting the advance time causes vehicle deceleration, reduces overall coordination efficiency, and increases travel time. Existing models and software [5–12] for coordination plan development partially account for vehicle queues before intersections but do not include precise values for the queue dissipation time.

The proposed method aims to improve the determination of offsets in coordinated traffic signal control plans by introducing consideration of advance time – the time required for queued vehicles to accelerate from a stop line to the platoon speed of the green wave. This method ensures that vehicle platoons can pass through all coordinated intersections without stops or loss of speed and allows for adaptation of offsets depending on actual traffic conditions.

The proposed solution includes calculating the offsets between signalized intersections based on their spacing, cycle length, and traffic flow speed, and is implemented through the following stages:

1. Data collection and analysis – gathering and analyzing input data on the section of the urban arterial and its traffic conditions (geometric parameters, distances between traffic signals, traffic flow speed, flow intensity, and volume of additional vehicle queues).
2. Base coordination plan calculation – determining the parameters of the basic coordinated signal plan for the arterial section.
3. Advance time consideration – accounting for the advance time, i.e., the time needed for vehicles queued before the stop line of a downstream signal to accelerate to the platoon's movement speed. The advance time is calculated considering the number of vehicles in the queue and their dynamic characteristics (acceleration and movement speed).
4. Offset adjustment – correcting the base offsets in the coordination plan according to the calculated advance time using the relation:

$$\varphi_i' = \varphi_i - t_a, \quad (1)$$

where ϕ_i' – adjusted offset for the start of the permissive signal at the downstream intersection, s;

ϕ_i – base offset determined from the coordinated section length and the established platoon speed, s;

t_a – advance time ensuring the platoon's continuous progression without stops, s;

5. Simulation modeling – performing microscopic simulation of the coordinated arterial section in a dynamic traffic modeling environment (e.g., PTV Vissim) to quantitatively assess the effect of advance time on average travel time, delay duration, and section capacity.

6. Optimization of coordination parameters – determining rational coordination plan parameters that minimize the average vehicle travel time while maintaining acceptable performance for secondary approaches.

The technical result is an improved method for determining offsets in coordinated signal control plans, allowing vehicle platoons of the green wave to pass through coordinated intersections without stops or speed loss. This increases the efficiency of traffic flow on the main (coordinated) direction while maintaining acceptable traffic conditions for vehicles arriving from secondary approaches. The method also enables adjustment of permissive signal offsets at downstream intersections according to actual traffic conditions.

The proposed method is based on considering the dynamic characteristics of vehicle movement to maintain a stable traffic flow speed. The dependence of advance time on the number of queued vehicles and their acceleration allows for more accurate determination of optimal green-onset moments at each coordinated intersection. The advance time can be calculated by the following relationship:

$$t_a = f(n, a, V), \quad (2)$$

where n – queue length (number of vehicles) before the stop line of the downstream signal in the coordination plan;

a – vehicle acceleration from standstill;

V – platoon travel speed of the green wave.

The obtained results can be used to adjust the base coordination plan so that each subsequent intersection opens exactly at the moment the green-wave platoon arrives, ensuring uninterrupted movement along the coordinated section of the urban arterial.

References

1. Stamatiadis, C., Gartner, N.H. MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. *Transportation Research Record*, 1996. 1554(1). P. 9–17. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400102>.
2. Gartner, N.H., Assman, S.F., Lasaga, F. Hou, D.L. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1991. 25(1). P. 55–74.
3. Chang, E.C.P., Messer, C.J., Marsden B.G. Reduced-Delay Optimization and Other Enhancements in the PASSER II-84. *Transportation Research Record*, 1985. 1005. P. 80–89.
4. Robertson, D.I. Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, 1986. 56. P. 36–40.
5. Шевченко В.В. Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях : дис. на здоб. наук. ступ. докт. філософії : спец. 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті). Харків: ХНАДУ, 2023. 224 с.
6. Tsay, H.S., Lin, L.T. New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth. *Transportation Research Record*, 1988. 1194. P. 15–30.

7. Lin, L.-T., Tung, L.-W., Ku, H.-C. Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial. *Journal of Transportation Engineering*, 2009. 136(8). P. 727–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000123).
8. Ye, B. L., Wu, W., Mao, W.A. Two-way Arterial Signal Coordination Method with Queueing Process Considered. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015. 16(6). P. 3440–3452. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2461493>.
9. Chen, C., Chen, X., Huang, W., Li, K. A Two-Way Progression Model for Arterial Signal Coordination Considering Side-Street Turning Traffic. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2019. 7(1). P. 1627–1650. <https://doi.org/10.1080/21680566.2019.1672590>.
10. Chen, Y.-H., Cheng, Y., Chang, G.-L. Incorporating Delay Minimization in Design of the Optimized Arterial Signal Progression. *Transportation Research Record*, 2022. 2676(4). P. 649–668. <https://doi.org/10.1177/03611981211064281>.
11. Timmerman, R.W., Boon, M.A.A. Platoon forming algorithms for intelligent street intersections. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021. 17(3). P. 278–307. <https://doi.org/10.1080/23249935.2019.1692962>.
12. Zhu, H., Nakamura, H. Modelling discharge flows at signalised intersections with adjustment of downstream effects. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2022. 18(3). P. 736–761. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1895360>.

МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ У МІСТІ

Пострелко Є. В.

*Факультет інформаційних технологій, кафедра цифрової економіки та системного аналізу
Державного торговельно-економічного університету, місто Київ*

y.postrelko@knute.edu.ua

Згідно з експериментальним дослідженням, проведеним у містах Тампа та Атланта (США), запровадження систем надання інформації в реальному часі (real-time information, RTI) дозволило скоротити середній час очікування пасажирів на зупинках приблизно на 2 хвилини. Крім цього, користувачі повідомили про зниження рівня стресу та підвищення задоволеності громадським транспортом загалом [1]. Це свідчить про те, що цифрові інформаційні системи здатні суттєво впливати на вибір користувачів, стимулюючи їх частіше користуватися саме громадським транспортом.

Для того щоб точніше прогнозувати час прибуття громадського транспорту, критично важливо враховувати динамічні затори на дорогах. Один із сучасних підходів — використання транспортних GPS-даних, які дозволяють у реальному часі визначати швидкість руху на різних сегментах маршруту. У дослідженні Lin & Zeng (1999) [2] було продемонстровано, як завдяки GPS-системам можна будувати моделі прогнозування на основі поточних координат транспортного засобу та історичних даних про швидкість і затримки на маршруті. Це дозволяє значно підвищити точність передбачення часу прибуття, враховуючи фактичні умови руху.

Інший підхід – використання даних від стільникових операторів. Сигнали мобільних телефонів, навіть без активного використання, дають змогу оцінити щільність транспортного потоку, оскільки пристрої переміщуються разом із пасажирами або водіями. Як показано в дослідженні The Cellular Network as a Sensor (2015) [3], такі дані можна агрегувати для виявлення зон заторів у реальному часі, визначати середню швидкість потоку та будувати моделі прогнозу трафіку на конкретних ділянках дороги. Комбінування цих методів – GPS і мобільних даних – дає потужний інструмент для управління міською мобільністю та точного інформування пасажирів.

Ще одним технологічно ефективним підходом до прогнозування дорожнього трафіку є відстеження автомобільних номерних знаків за допомогою камер відеоспостереження. Системи автоматичного розпізнавання номерних знаків (ANPR, або LPR – License Plate Recognition) дають змогу не лише фіксувати порушення, а й аналізувати швидкість, щільність трафіку та тип транспортного засобу. Вони широко застосовуються в інтелектуальних транспортних системах для виявлення заторів у реальному часі.

Серед методів, що використовуються для розпізнавання номерних знаків, можна виділити чотири основні групи:

- 1) методи, що використовують інформацію про краї зображення;
- 2) методи, які базуються на глобальній інформації про зображення;
- 3) методи, що аналізують колірні характеристики номерного знака;
- 4) методи, засновані на текстурних властивостях, зокрема HOG (Histogram of Oriented Gradients) та LBP (Local Binary Patterns).

Метод використання інформації про краї передбачає виділення країв номерного знаку на зображенні за допомогою операторів фільтрації, найчастіше – фільтра Собела або Канні. Завдяки чітким межах між номерним знаком і фоном, цей підхід дозволяє точно локалізувати прямокутну форму знаку, особливо в умовах чіткого контрасту. Слабкі сторони — зниження точності в умовах слабого освітлення або якщо знак частково перекритий. Цей метод показав ефективність до 96% в експериментальних умовах [4].

Методи з групи глобальної інформації про зображення працюють з усім зображенням одночасно, використовуючи, наприклад, аналіз зв'язаних компонент або морфологічну обробку, щоб виявити області, які за формою і пропорціями нагадують номерний знак. Вони

менш чутливі до фону, але потребують високих обчислювальних ресурсів і добре працюють лише при якісних зображеннях [5].

Підхід аналізу колірних характеристик використовує специфічні колірні поєднання номерного знаку (наприклад, білий фон + чорні символи) для його локалізації. Часто застосовуються моделі HLS або HSV, які кращі за RGB в умовах змінного освітлення. Метод забезпечує до 97–99% точності, але вимагає стабільного кольорового профілю та стикається з труднощами при складному тлі або поганому освітленні [6].

Методи, які аналізують структуру текстури знаку – наприклад, кількість вертикальних та горизонтальних ліній, симетрію тощо – мають кращу стійкість до спотворень і перспективних викривлень. Найбільш популярними є HOG та LBP. Ці методи особливо корисні при розмитих або перекошених зображеннях, але вимагають значної обчислювальної потужності [7].

Аналіз слабких і сильних сторін цих методів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняння методів розпізнавання номерних знаків автомобіля

Назва методу	Сильні сторони	Слабкі сторони
Метод виділення номерного знаку з використанням інформації про краї	Висока точність виявлення номерних знаків на зображеннях з високим контрастом між знаком та фоном	Низька ефективність у погано освітлених умовах або при низькій контрастності зображення
	Ефективність у визначенні прямокутних форм завдяки використанню оператора Собела для виявлення країв	Обмежена ефективність при виявленні знаків, які частково закриті або перекриті іншими об'єктами
Виділення номерного знаку з використанням глобальної інформації про зображення	Здатність інтегрувати інформацію з широкої області зображення, що підвищує точність локалізації	Вразливість до помилок через зміни в освітленості та інші зовнішні впливи
	Ефективність у розпізнаванні знаків на складних фонах завдяки аналізу зв'язаних компонент	Висока обчислювальна складність, що може знижувати швидкість обробки зображень
Екстракція номерного знаку з використанням колірних характеристик	Висока точність у виявленні номерних знаків специфічного кольору, що дозволяє ефективно фільтрувати не відповідні об'єкти.	Обмеженість у використанні в умовах, де кольори номерних знаків мають широкий діапазон або схожі з фоном
	Здатність адаптуватися до регіональних особливостей номерних знаків, які можуть відрізнятися за кольором.	Залежність від якості зображення та освітлення, що може впливати на колірну перцепцію
Виділення номерного знаку з використанням властивостей текстури	Ефективне виявлення номерних знаків за допомогою аналізу текстурних відмінностей між знаком та фоном.	Висока обчислювальна складність при використанні складних текстурних фільтрів
	Висока точність у виявленні знаків навіть на зображеннях зі складними текстурними властивостями.	Обмежена ефективність у низьких рівнях освітленості або при зображеннях з високим рівнем шуму

Комбінування методів виділення країв та текстурних ознак (HOG/LBP) дає найкращі результати в умовах змішаного освітлення, перекриттів і шуму. Таке рішення рекомендується для міського середовища, де трафік щільний, а зображення часто далекі від ідеальних. Деякі автори [8] також рекомендують додаткову валідацію кольором або геометрією.

Література

1. Brakewood C., Barbeau S., Watkins K. An experiment evaluating the impacts of real-time transit information on bus riders in Tampa, Florida. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2014. Т. 69. С. 409–422. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.09.003>.
2. Lin W.-H., Zeng J. Experimental Study of Real-Time Bus Arrival Time Prediction with GPS Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999. Т. 1666, № 1. С. 101–109. URL: <https://doi.org/10.3141/1666-12>.
3. Understanding individual mobility patterns from urban sensing data: A mobile phone trace example / F. Calabrese та ін. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. Т. 26. С. 301–313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.009>.
4. Dev A. A Novel Approach for Car License Plate Detection Based on Vertical Edges. 2015 *Fifth International Conference on Advances in Computing & Communications (ICACC)*, м. Kochi, India, 2–4 верес. 2015 р. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/icacc.2015.62>.
5. Chacon M M. I., Zimmerman S A. License plate location based on a dynamic PCNN scheme. 2003 *International Joint Conference on Neural Networks*, м. Portland, OR, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/ijcnn.2003.1223862>.
6. Fuzzy-based algorithm for color recognition of license plates / F. Wang та ін. *Pattern Recognition Letters*. 2008. Т. 29, № 7. С. 1007–1020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.01.026>.
7. Teoh S. S., Braunl T. Performance evaluation of HOG and Gabor features for vision-based vehicle detection. 2015 *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSC)*, м. Penang, Malaysia, 27–29 листоп. 2015 р. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/iccsc.2015.7482159>.
8. Lubna, Mufti N., Shah S. A. A. Automatic Number Plate Recognition: A Detailed Survey of Relevant Algorithms. *Sensors*. 2021. Т. 21, № 9. С. 3028. URL: <https://doi.org/10.3390/s21093028>.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОГРАМНО-АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА ПЕРЕХРЕСТІ МІСТА

Халимон В.К., ТД-51-24., Абрамова Л.С., д-р техн. наук, проф.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

abramova_ls@ukr.net, khalvaaaaaaaaa17@gmail.com

Розподіл транспортних потоків на перехрестях є критично важливим аспектом організації дорожнього руху, який безпосередньо впливає на ефективність транспортної системи, безпеку учасників дорожнього руху та екологічні показники міських територій. В умовах інтенсивного розвитку урбанізації та зростання кількості транспортних засобів проблема регулювання потоків стає однією з найактуальніших у сфері транспортного планування.

Неефективне управління рухом призводить до перевантаження магістралей, утворення заторів, підвищення рівня аварійності та забруднення повітря. Саме тому впровадження програмно-адаптивних систем керування дорожнім рухом розглядається як один із найперспективніших напрямів розвитку міського транспорту. Такі системи дозволяють оптимізувати роботу світлофорних об'єктів, підвищити швидкість сполучення та знизити час простою транспортних засобів на перехрестях [1].

Метою дослідження є розробка математичної моделі програмно-адаптивного управління дорожнім рухом у міських умовах на основі аналізу поточкорозподілу транспортних потоків, визначення параметрів вихідних потоків і побудови алгоритму оптимізації світлофорних циклів.

Основним завданнями є створити математичну модель поточкорозподілу транспортних потоків на перехрестях; врахувати вплив днів тижня на інтенсивність руху; розробити алгоритм програмного керування світлофорними циклами; виконати розрахунок і візуалізацію результатів на прикладі перехрестя вул. Валентинівська - вул. Ак. Павлова (м. Харків); обґрунтувати вибір дорожнього контролера для впровадження адаптивного управління.

У країнах ЄС та США адаптивні системи управління дорожнім рухом функціонують вже десятиліттями. Зокрема:

SCOOT (Велика Британія) — забезпечує безперервну оптимізацію фаз світлофорів, зменшуючи затори до 25%;

SCATS (Австралія) — аналізує поточні потоки за допомогою індукційних детекторів і адаптує сигнали в реальному часі;

BALANCE (Німеччина) — надає пріоритет громадському транспорту без шкоди загальному потоку;

InSync (США) — використовує відеоаналітику для регулювання сигналів світлофорів;

RHODES — прогнозує зміну трафіку на основі математичних моделей.

В Україні адаптивні системи лише починають впроваджуватись: пілотні проєкти реалізуються в Києві, Харкові та Львові. Основними перешкодами залишаються технічна застарілість контролерів, відсутність детекторів руху та недостатнє фінансування.

Для аналізу транспортних потоків застосовано графові моделі, що відображають транспортну мережу у вигляді вузлів і ребер; матричний аналіз поточкорозподілу, який враховує ймовірність переходів транспортних засобів між напрямками руху; методи динамічного програмування для оптимізації управління світлофорними циклами; факторні коефіцієнти, що враховують зміну інтенсивності руху залежно від дня тижня; імітаційне моделювання (Python, бібліотеки NumPy, Pandas, Matplotlib) для розрахунку та візуалізації даних [2].

Адаптивні методи управління дорожнім рухом охоплюють як програмні, так і програмно-адаптивні підходи, що забезпечують гнучке реагування транспортної системи на зміни умов дорожнього середовища. Основною метою таких систем є динамічна оптимізація транспортних потоків у вузлах вулично-дорожньої мережі на основі аналізу поточної ситуації та прогнозу її розвитку. Формалізація задачі адаптивного управління базується на створенні

керувальної функції, що автоматично змінюється в реальному часі. Ця функція враховує поточну інтенсивність руху, час доби, погодні умови, аварійні ситуації та рівень завантаженості кожного підходу до перехрестя. На відміну від традиційних систем із фіксованими циклами, адаптивне управління дозволяє швидко коригувати параметри світлофорних фаз відповідно до змін у трафіку [3].

Об'єктом дослідження є перехрестя вул. Валентинівська – вул. Академіка Павлова (м. Харків) (рисунок 1). Тип перехрестя — хрестоподібний. Виміряна інтенсивність входних потоків (L_1 – L_{12}) коливалась у межах від 102 до 468 авт./год. Для врахування добових і тижневих коливань використано факторні коефіцієнти (від 1.189 у неділю до 1.527 у понеділок).

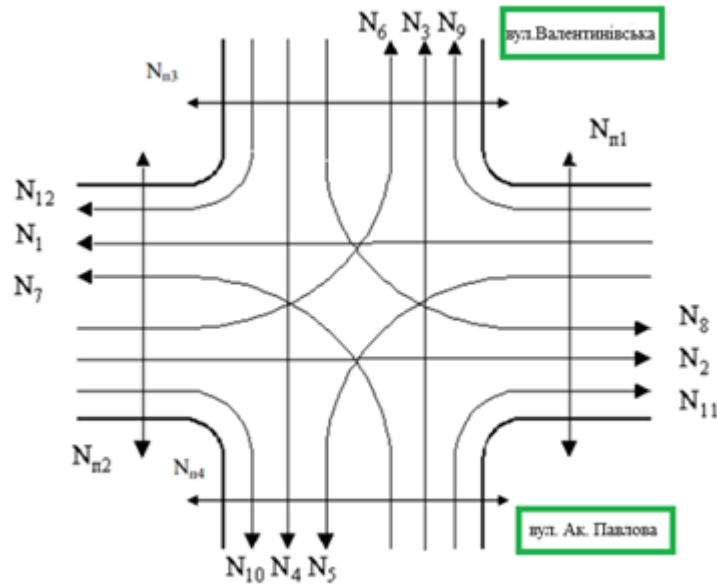


Рисунок 1. Картограма перехрестя вул. Валентинівська та вул. Ак. Павлова

Для опису процесу розподілу транспортних потоків використано рівняння матричного виду:

$$Y = P \times X \quad (1)$$

де X - вхідний вектор інтенсивності потоків, P - матриця ймовірностей переходів, Y - вихідний вектор потоків після перехрестя.

Матричний підхід дозволяє врахувати залежності між напрямками руху та зміну інтенсивності в часі [4]. Для моделювання використовували експериментальні дані з польових спостережень. Розрахунки виконано у середовищі Python, що забезпечило можливість програмної адаптації параметрів у реальному часі.

Приклади розрахунків (для N_1 – N_{12}) показали, що найбільші інтенсивності фіксуються в напрямках N_1 (≈ 267 авт./год) і N_{12} (≈ 215 авт./год). З урахуванням факторних коефіцієнтів за днями тижня інтенсивність у понеділок зростала до 408 авт./год, а в неділю зменшувалась до 256 авт./год.

З метою зниження часу очікування транспортних засобів на перехресті застосовано формулу Вебстера для визначення оптимальної тривалості циклу:

$$T_{\text{ц}} = \frac{t_{\text{пiш}} + T_n}{1 - \frac{N_T}{M_H}} \quad (2)$$

де $T_{\text{ц}}$ – тривалість світлофорного циклу, с; T_n – сума проміжних тактів, с, (приймаємо рівною 6 с); N_T – інтенсивність транспортних потоків, авт./год.; M_H – потік насичення, авт./год.

За результатами розрахунків оптимальний цикл становить $T_{\text{ц}} \approx 82$ секунд, з розподілом зелених фаз пропорційно до навантаження напрямків.

Для пікових днів (понеділок, вівторок) рекомендовано збільшення фази основних потоків на 8–10%, а для вихідних - скорочення на 12-15%.

У середовищі Python створено програму, що виконує - множення матриць потокорозподілу та вхідних потоків; застосування тижневих коефіцієнтів; побудову графіків зміни інтенсивності для кожного напрямку (рисунок 2).

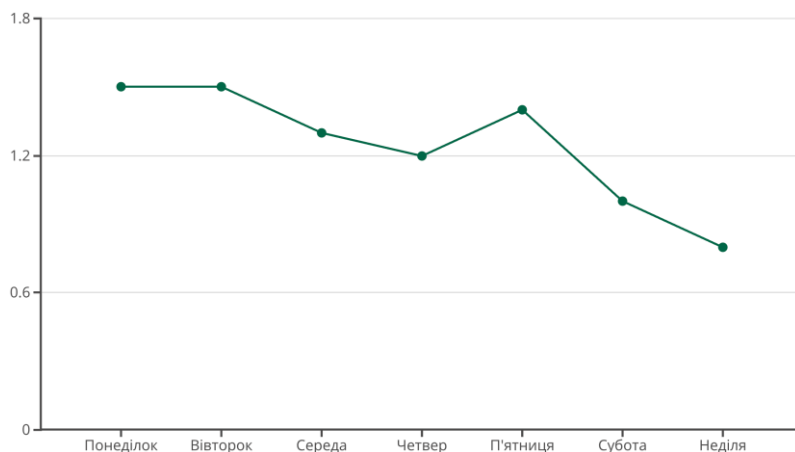


Рисунок 2. Графічна інтерпретація інтенсивності руху.

Графічна інтерпретація показала, що - у понеділок і вівторок спостерігаються максимальні навантаження (до +30%); у середу та четвер рух стабілізується; у вихідні - суттєве зниження потоків до 20-25% від пікових значень.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування черг, регулювання зелених фаз і планування ремонтних або будівельних робіт без перевантаження мережі.

Для реалізації програмно-адаптивної системи управління рекомендовано використати контролери типу Siemens Sitraffic sX або SCATS-compatible, які підтримують роботу в адаптивному режимі; мають відкриту архітектуру; забезпечують обмін даними через протоколи NTCIP, MQTT, TCP/IP; сумісні з відео- та радарними детекторами; дозволяють змінювати тривалість фаз у реальному часі [5].

Такі контролери здатні інтегруватися в інтелектуальні транспортні системи (ITS), що забезпечує зв'язок із міськими центрами управління, базами даних і навігаційними сервісами.

Світлофорне регулювання є одним із найважливіших інструментів організації дорожнього руху, що безпосередньо впливає на пропускну здатність перехресть, рівень заторів та безпеку учасників руху. Рациональне визначення тривалості світлофорного циклу та часу зелених фаз дає змогу забезпечити рівномірний розподіл транспортних потоків, скоротити час простою транспортних засобів і підвищити ефективність роботи транспортної мережі в цілому.

Дослідження показало, що застосування адаптивних і інтелектуальних методів регулювання дозволяє зменшити середній час очікування транспортних засобів на перехрестях на 25–30%, а також підвищити пропускну здатність транспортної мережі на 15–20% порівняно з традиційними фіксованими режимами [6].

Інтенсивність і розподіл транспортних потоків безпосередньо впливають на рівень забруднення атмосферного повітря в містах. Зі збільшенням заторів та нераціональним використанням дорожньої мережі зростає витрата пального, а разом із нею — обсяги викидів вуглекислого газу (CO_2), оксидів азоту (NO_x) та твердих частинок. Це погіршує якість повітря, сприяє утворенню смогів і негативно позначається на здоров'ї населення[7].

Рациональний розподіл транспортних потоків і впровадження адаптивного регулювання дозволяють суттєво зменшити екологічне навантаження. За результатами досліджень, оптимізація маршрутів руху здатна скоротити витрати пального на 10–15%, а також зменшити рівень викидів шкідливих речовин у повітря.

Розроблено математичну модель потокорозподілу транспортних потоків, яка враховує добові та тижневі коливання інтенсивності руху.

Визначено оптимальний цикл світлофорного регулювання (≈ 82 с), що дозволяє зменшити час очікування на перехресті на 25–30%.

Програмна реалізація в середовищі Python підтвердила можливість використання моделі для адаптивного управління в реальному часі.

Обґрунтовано вибір сучасного дорожнього контролера для інтеграції з системою адаптивного керування.

Впровадження запропонованої системи дає змогу підвищити ефективність пропускної здатності міських доріг, скоротити затори та зменшити шкідливі викиди.

Література

1. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів. Зі змінами. Київ, 2018. 55 с. (Інформація та документація).
2. Кашканов А. А., Кужель В. П. Організація дорожнього руху : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 125 с. URL : <http://pdf.lib.vntu.edu.ua/>
3. Stotsko, Z., Oliskevych, M. (2017). Vehicle driving cycle optimisation on the highway. *Transport Problems*, 11 (2), 123–131. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.12>
4. Абрамова Л. С. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом / Л. С. Абрамова, О. О. Бакуліч. Навч. посібник. Харків : ХНАДУ, 2013. 193 с.
5. Організація та регулювання дорожнього руху : підручник/ за заг.ред. В. П. Поліщука; О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін.. Київ : Знання України, 2012. 467 с.
6. Петровський Є. В. Вплив дорожніх умов на безпеку дорожнього руху // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених. Чернівці: НУ «Чернігівська політехніка», 2021 URL : <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/a1928323-f2cc-48b4-b6f0-5db7b89c140d/content>
7. Беленчук О.В., Бондар Т.В., Попович Н.І., Теплюк Є.Ф. Визначення рейтингу безпеки автомобільних доріг для обрання пріоритетності проведення їх перевірки безпеки. *Дороги і мости*. Київ, 2022. Вип. 25. С. 222–230. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.222>

АЛГОРИТМІЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИТИЧНИХ СТАНІВ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ НА ОСНОВІ БАГАТОДЖЕРЕЛЬНИХ ДАНИХ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ

Степанов О. В.¹, Олійник Д. В.²

¹*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна,
o.stepanov@nubip.edu.ua*

²*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

У сучасних умовах трансформації транспортної галузі особливого значення набуває впровадження цифрових та інтелектуальних технологій, спрямованих на підвищення ефективності, безпеки та екологічності транспортних процесів. Глобальні тенденції демонструють перехід від традиційних підходів до управління рухом до систем, що ґрунтуються на комплексному аналізі великих масивів даних, мережевій взаємодії та автоматизованому прийнятті рішень. Інтелектуальні транспортні системи (ІТС) розглядаються як стратегічний інструмент модернізації транспортної інфраструктури, забезпечення надійності перевезень, оптимізації транспортних потоків та зниження експлуатаційних витрат. У країнах Європейського Союзу розвиток ІТС визначено одним із ключових напрямів транспортної політики, що підтверджується впровадженням нормативних ініціатив та програм цифровізації дорожньої інфраструктури.

Для України питання модернізації транспортної системи на основі ІТС набуває особливої актуальності через необхідність підвищення рівня безпеки дорожнього руху, покращення транспортної логістики, розвитку цифрових сервісів і забезпечення адаптації транспортної інфраструктури до європейських вимог. Наукові дослідження вітчизняних авторів, присвячені застосуванню інтелектуальних технологій у транспортному процесі, засвідчують потребу у системному аналізі можливостей ІТС та визначенні перспектив їх інтеграції в українську транспортну систему. Зокрема, у працях дослідника наголошено на концептуальних основах побудови ІТС, структурі інформаційних потоків та впливі цифрових технологій на організацію перевезень [1–4].

Попри значну кількість досліджень, низка аспектів, пов'язаних із функціонуванням і впровадженням ІТС у складних експлуатаційних умовах України, потребує подальшого наукового опрацювання. Одним із таких аспектів є визначення впливу інтелектуальних технологій на безпеку руху, ефективність транспортної системи та взаємодію її ключових елементів — інфраструктури, транспортних засобів, учасників дорожнього руху та диспетчерських центрів. У цьому контексті важливим завданням є аналіз сучасних підходів до застосування ІТС у вантажних і пасажирських перевезеннях, оцінка їхніх можливостей та розробка напрямів удосконалення на основі світового досвіду.

Запропоноване дослідження спрямоване на розкриття теоретичних та прикладних аспектів використання інтелектуальних транспортних систем, узагальнення актуальних наукових результатів і формування науково обґрунтованих висновків щодо перспектив їх впровадження в умовах національної транспортної інфраструктури.

Стрімка урбанізація та зростання мобільності населення спричиняють суттєве ускладнення структури транспортних потоків у великих містах. Ускладнення дорожнього середовища призводить до підвищення ризиків виникнення критичних станів, зокрема передумов ДТП, раптових заторів, різких змін швидкісного режиму, порушень безпеки та зниження пропускної спроможності магістралей. Традиційні методи прогнозування, що базуються на спрощених аналітичних залежностях або на статичних моделях, вже не здатні забезпечити достатню точність у таких умовах. Це формує потребу у використанні більш гнучких та інтелектуально орієнтованих підходів, здатних працювати з різномірними, постійно оновлюваними даними.

Сучасний стан розвитку цифрових технологій створює можливості для комплексного збору інформації з різних джерел, включно з сенсорними мережами, дорожніми детекторами, міськими камерами, телематичними системами, GPS-даними мобільних користувачів, даними

громадського транспорту та сервісів мікромобільності. Об'єднання таких потоків дозволяє формувати просторово-часову модель транспортного середовища, що охоплює не лише макропоказники руху, але й детальну мікродинаміку поведінки транспортних засобів та груп водіїв. У науковій літературі підкреслюється, що багатоджерельні дані дозволяють розкривати приховані закономірності, які не фіксуються за допомогою одиничних датчиків чи звичайних методів моніторингу [1; 3].

Важливою особливістю багатоджерельних даних є їх різноманітність: кожне джерело характеризується власною частотою оновлення, рівнем точності, неповнотою та різним ступенем відповідності реальній ситуації. Проте такі недоліки компенсуються загальним обсягом інформації та можливістю застосування алгоритмів машинного навчання, здатних інтегрувати великі масиви даних і знаходити стійкі кореляції. Зокрема, сучасні моделі прогнозування критичних станів базуються на рекурентних нейронних мережах, градієнтних бутстреп-моделях, ансамблевих структурах та гібридних підходах, що поєднують стохастичні, статистичні та алгоритмічні методи аналізу [3; 4].

Особливої уваги заслуговує питання прогнозування виникнення небезпечних ситуацій, що пов'язані з поведінковими факторами водіїв. Аналіз мікроповедінки — різких гальмувань, коливань швидкості, маневрування в щільному потоці, реакцій на зміну фази світлофорного регулювання — дозволяє визначати передумови до формування аварійних сценаріїв. Дослідження показують, що критичні стани, пов'язані з поведінковими реакціями, формуються за кілька секунд або хвилин до фактичного порушення безпеки, і своєчасне виявлення таких тенденцій має першочергове значення для систем управління дорожнім рухом [4].

У працях вітчизняних науковців, наголошується на важливості переходу до інтелектуальних підходів у системах моніторингу та підтримки прийняття рішень. У дослідженні, присвяченому впровадженню інтелектуальних транспортних систем у транспортний процес, було підкреслено, що стабільність і безпека міської транспортної мережі значною мірою залежить від можливості інтегрувати інформацію з різних джерел та аналізувати її у режимі реального часу [5]. У більш новій роботі [6] окреслено концептуальні засади створення системи, здатної формувати прогностичні сценарії розвитку дорожньої ситуації з використанням алгоритмічних методів, що підвищує точність прогнозів і дозволяє запобігати розвитку критичних станів.

У практичному вимірі алгоритмічні моделі прогнозування критичних станів дають можливість органам управління дорожнім рухом оперативно визначати ділянки потенційного ризику, коригувати режими регулювання, оптимізувати роботу світлофорних об'єктів, планувати маршрути громадського транспорту з урахуванням завантаження мережі та мінімізувати негативні наслідки дорожніх інцидентів. Крім того, моделі передбачення можуть бути інтегровані у міські центри управління мобільністю для створення комплексних систем раннього попередження. Така інтеграція забезпечує значно вищий рівень контрольованості транспортної мережі, оптимізує розподіл потоків і сприяє підвищенню загальної ефективності роботи дорожньої інфраструктури.

Перевагою алгоритмічних підходів є здатність до самоадаптації. Використання механізмів навчання на основі стрімких потоків даних дає можливість моделі автоматично змінювати власну структуру відповідно до актуальних умов. Це дозволяє підтримувати високу точність прогнозів навіть у ситуаціях, які не були передбачені під час первинного тренування моделі. Така властивість є критично важливою для великих міст, де транспортна система часто працює в умовах нестабільності через погодні фактори, дорожні роботи, аварійні ситуації або нерівномірний розподіл мобільності.

Загалом використання алгоритмічних моделей прогнозування критичних станів на основі багатоджерельних даних відкриває нові перспективи у підвищенні безпеки та ефективності транспортних систем. Вони сприяють своєчасному реагуванню на загрози, формуванню збалансованих режимів руху та створенню умов для розвитку сучасних систем управління міською мобільністю. Враховуючи актуальні тенденції, такі моделі становлять фундамент для побудови інтелектуальних транспортних мереж майбутнього, здатних

забезпечити стійкість транспортної інфраструктури в умовах зростаючих вимог та навантажень.

Література

1. Андрущенко К.А. Інтелектуальні транспортні системи: концепції та принципи реалізації. Транспортні системи, 2020.
2. Бойченко А.Є. Методи прогнозування транспортних потоків у міських умовах. Вісник ХНАДУ, 2021.
3. Jackisch F., Stark H. Dynamic Modelling of Urban Mobility Patterns Using Multi-Source Traffic Data. Transportation Research Procedia, 2022.
4. Abdel-Aty M., Huang H., Lee J. Proactive Traffic Safety Analysis Using Real-Time and Historical Data. Accident Analysis & Prevention, 2021.
5. Степанов О.В., Волобуєва Т.В., Сирота В.М. Використання інтелектуальних транспортних систем у транспортному процесі. Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку транспорту». Одеса, 2020.
6. Степанов О. Інтелектуальні транспортні системи у сфері транспорту: концептуальний аспект. Матеріали міжнародної конференції МЦНД. Львів, 2025. С. 189–192.

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ДИНАМІЧНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДОСТАВКИ ТОВАРІВ В УМОВАХ МІСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ

Гутаревич О. С., Данчук В. Д.

Національний транспортний університет, oleksandr.hutarevych@gmail.com

Зростання обсягів міських поставок і поширення електронної комерції роблять процес доставки товарів (last-mile delivery) одним із найбільш важливих у міській транспортній логістиці. Саме на цьому етапі логістичного процесу формуються найбільші витрати часу та ресурсів через складну структуру міської вулично-дорожньої мережі (ВДМ), непередбачувані затори, аварії та тимчасові обмеження руху. Традиційні статичні методи планування маршрутів не здатні оперативно реагувати на ці зміни, що призводить до збільшення часу доставки, підвищення транспортних витрат та зниження рівня задоволеності споживачів. Це зумовлює потребу у створенні методу, здатного здійснювати маршрутизацію доставки вантажів у режимі реального часу з урахуванням динамічного стану ВДМ на основі актуальних даних [1-2].

Динамічна маршрутизація дозволяє в реальному режимі часу коригувати маршрути доставки на основі актуальної інформації про стан вулично-дорожньої мережі, отриманої з різних джерел інформації таких як ГІС, IoT дані сенсорів дорожнього руху, системи VANET, MANET, тощо [3-5]. Це дає змогу оптимізувати використання транспортних ресурсів, скоротити час доставки та підвищити надійність обслуговування кінцевих споживачів. Впровадження таких підходів є ключовим для розвитку ефективної last-mile логістики та інтеграції концепцій «розумного міста» у міські транспортні процеси.

Пропонується метод адаптивної динамічної маршрутизації процесу доставки вантажів, що базується на інтеграції джерел даних про стан ВДМ та інтелектуальних алгоритмів оптимізації. Метод базується на використанні двох систем: системи моніторингу стану ВДМ та системи оптимізації маршрутів користувачів. Система моніторингу консолідує актуальні дані про динамічні та статичні характеристики стану ділянок ВДМ з усіх доступних джерел для формування цілісної картини про стан ВДМ. Система оптимізації маршрутів в онлайн режимі вирішує завдання користувача, враховуючи поточний стан ВДМ, отриманий із системи моніторингу, і надсилає користувачеві найбільш оптимальне рішення відповідно до поточних дорожніх умов, забезпечуючи ефективну динамічну маршрутизацію.

Важливим аспектом системи моніторингу є збереження історичних даних про стан ВДМ, отриманих з різних доступних джерел інформації. Такі дані є цінним ресурсом для глибокого аналізу транспортних процесів, оскільки дозволяють виявляти закономірності формування транспортного потоку, визначати типові режими завантаженості мережі, відслідковувати сезонні або добові зміни параметрів транспортного потоку. Історичні дані також допомагають ідентифікувати місця систематичних заторів, оцінювати ефективність проведених інфраструктурних змін, прогнозувати майбутній транспортний попит та ефективно планувати розвиток дорожньої інфраструктури. Їх використання сприяє підвищенню якості міського транспортного планування, прийняттю обґрунтованих управлінських рішень та формуванню більш стійких і ефективних транспортних систем.

Одним із ключових викликів моніторингу стану ВДМ є неповнота даних на певних ділянках. Зокрема, на практиці багато ділянок ВДМ обладнано лише детекторами інтенсивності транспортного потоку, тоді як швидкість або щільність залишаються невідомими. Для подолання цієї проблеми у методі пропонується застосування реконструкції параметрів транспортного потоку шляхом кластеризації однорідних ділянок мережі та використання повних наборів даних для репрезентативних ділянок ВДМ. Градуовальні залежності та нормувальні коефіцієнти, визначені через дані від репрезентативних ділянок, дозволяють відтворити відсутні параметри на інших фрагментах ВДМ [6].

В рамках запропонованого методу для оптимізації маршрутів задача доставки товару розглядається як асиметрична динамічна задача комівояжера (DTSP), де ВДМ представлено у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графу. Вершини графу відповідають пунктам

доставки товару, а дуги графу відображають оптимальні маршрути руху між парами вершин за певним критерієм (час, відстань, тощо). Кожна дуга графу описується послідовністю ділянок ВДМ, що утворюють маршрут між відповідними вершинами, що дає змогу враховувати актуальний стан дорожньої мережі та динамічно оновлювати ваги дуг графу у відповідності до змін характеристик ділянок ВДМ. На першому етапі формування такого графу передбачено за допомогою сучасних ГІС.

Для проведення дискретної оптимізації маршруту в рамках розв'язку DTSP на графі передбачено використання модифікованого мурашиного алгоритму ACO_{mod} [7]. Він базується на класичному АСО [8], проте доповнений спеціальними механізмами, що дозволяють ефективно враховувати динамічні зміни графу. В ACO_{mod} реалізована можливість фіксації оптимальної конфігурації частково пройденого маршруту, яка є топологічним образом реальної конфігурації відповідного фрагменту ВДМ, перед оновленням графу, що забезпечує коректне врахування поточного стану ВДМ під час динамічної маршрутизації [7].

Апробація запропонованого методу була проведена на основі імітаційних досліджень динамічної маршрутизації доставки вантажів у межах фрагмента ВДМ міста Києва, що включав 19 пунктів доставки поштового оператора «Нова Пошта». Для заданого моменту відправлення транспортного засобу з депо моделювався кільцевий маршрут із послідовним відвідуванням пунктів доставки та поверненням до депо. Побудова та оновлення графу ВДМ виконувалося на основі даних отриманих з ГІС-сервісу Azure Maps та інформації з датчиків дорожнього руху наданих ЦОДР. Розроблена програмна реалізація системи показала прийнятні часові витрати на побудову та оновлення графу, а також оперативне знаходження оптимального маршруту за допомогою алгоритму ACO_{mod} . Результати експериментів виявили характерну перебудову маршруту в моменти різкого зростання або перерозподілу транспортних потоків, а проведення реоптимізації забезпечувало суттєве скорочення очікуваного часу доставки – до 19,4% в окремих випадках [6].

Отже, запропонований метод адаптивної динамічної маршрутизації доставки товарів демонструє високу ефективність у розв'язанні задач міської логістики. Інтеграція різнорідних джерел даних про стан ВДМ у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами оптимізації забезпечує можливість побудови актуальних та обґрунтованих рішень у режимі реального часу. Запропонований підхід до формування зваженого орієнтованого графу ВДМ та застосування модифікованого мурашиного алгоритму ACO_{mod} дає змогу ефективно вирішувати асиметричну динамічну задачу комівояжера, коректно враховуючи поточні зміни дорожніх умов. Результати імітаційних досліджень на фрагменті вулично-дорожньої мережі міста Києва засвідчили його практичну придатність, показавши здатність системи оперативно реагувати на зміну дорожньої ситуації та перебудовувати маршрут відповідно до актуального стану мережі. Таким чином, запропонований метод має високий потенціал для впровадження у міські логістичні системи, спрямований на підвищення ефективності процесів доставки товарів, зниження затримок та покращення якості транспортного обслуговування в міських умовах.

Література

1. Kerner B. S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02605-8>
2. A review of dynamic vehicle routing problems / V. Pillac та ін. *European Journal of Operational Research*. 2013. Т. 225, № 1. С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015>
3. Badole M. H., Thakare A. D. An optimized framework for VANET routing: A multi-objective hybrid model for data synchronization with digital twin. *International Journal of Intelligent Networks*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2023.10.001>
4. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2002. Т. 2, № 5. С. 483–502. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcm.72>
5. Real-Time and Efficient Traffic Information Acquisition via Pavement Vibration IoT Monitoring System / Z. Ye та ін. *Sensors*. 2021. Т. 21, № 8. С. 2679. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21082679>

6. Danchuk V., Hutarevych O., Taraban S. Dynamic Routing in Urban Transport Logistics under Limited Traffic Information. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*. 2025. Т. 27, № 2. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2025.021>
7. Данчук В. Д., Гутаревич О. С. Метод адаптивної оптимізації маршруту в динамічній задачі комівояжера з використанням модифікованого мурашиного алгоритму. *Вісник Національного транспортного університету*. 2024. Т. 1, № 58. С. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2024-1-58-055-066>
8. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization Algorithms for the Traveling Salesman Problem. *Ant Colony Optimization*. 2004. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/1290.003.0005>

СЕКЦІЯ 3. ВЗАЄМОДІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ МІСЬКОГО РУХУ

УДК 656.183

ІНТЕГРАЦІЯ ВЕЛОІНФРАСТРУКТУРИ З МЕРЕЖЕЮ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Голубнічій Є. А., Орда О. О.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
orda@khadi.kharkov.ua*

Сучасні міста зіштовхуються з багатьма викликами у сфері організації транспортної інфраструктури. Зростання автомобільного трафіку призводить до заторів, погіршення екологічної ситуації та збільшення енергетичних витрат. У цьому контексті виникає потреба у впровадженні нових підходів до організації міського транспорту, які враховують принципи сталої мобільності. Стала мобільність орієнтована на створення зручної, екологічно безпечної та енергоефективної транспортної системи, що сприяє підвищенню якості життя населення [1].

Одним із основних елементів сталої мобільності є розвиток велосипедної інфраструктури. Велосипедний транспорт є не лише екологічно чистим, а й доступним для більшості мешканців, сприяє зниженню транспортного навантаження на дороги та формуванню здорового способу життя. Велосипеди все більше набувають популярності як ефективний, доступний і екологічний засіб пересування, але їхня корисність значно зростає, коли спосіб пересування велосипедами поєднується з громадським транспортом. Розвинена велосипедна інфраструктура може суттєво змінити модель пересування у місті, зробивши її більш екологічною, зручною та безпечною [2-4]. Результати досліджень [3] свідчать про те, що розроблені моделі вибору маршруту руху велосипедистів враховують не лише найкоротший шлях, а й безпекові параметри та комфортність поїздки, що підвищує ефективність веломережі і стимулює впровадження інноваційних рішень.

У контексті розбудови сталої та безпечної велосипедної інфраструктури в містах України розробка практичних рекомендацій щодо формування велосипедної інфраструктури відіграє ключову роль у переході від теоретичного аналізу до реалізації конкретних заходів. Рекомендації повинні ґрунтуватися на результатах аналізу поточного стану, досвіді впровадження аналогічних проєктів в інших містах, а також на нормативних документах та стандартах, що регулюють організацію велоруку в Україні.

Інтеграція велосипедної інфраструктури з мережею громадського транспорту є важливою складовою сталої розбудови транспортних систем міст. Це сприяє зниженню використання приватних автомобілів, та дозволяє мешканцям швидко та комфортно долати як короткі, так і довгі відстані, скорочуючи час у дорозі, зменшуючи навантаження на дороги та покращуючи екологічну обстановку в місті. В умовах зростаючої урбанізації та посилення екологічних вимог інтеграція цих двох видів транспорту стає пріоритетом для планувальників та урбаністів.

Велоінфраструктура відіграє ключову роль у забезпеченні доступності зупинок громадського транспорту та розширенні їх ефективної зони обслуговування. Значна частина поїздок у сучасних містах має мультимодальний характер, коли користувачі поєднують велосипед із автобусом, метро чи трамваєм. Згідно з дослідженнями Oeschger J. [5], оцінка інтеграції мікромобільності і громадського транспорту базується на аналізі доступності та просторовому співвідношенні веломаршрутів і зупинок транспорту. Успішні приклади міст України і Європи демонструють, що інвестиції в розвиток велосипедної інфраструктури за умови її інтеграції з громадським транспортом сприяють сталому мобільному розвитку.

Згідно зі звітом КМР [6], комплексний розвиток веломережі в поєднанні з оптимізацією маршрутів громадського транспорту і створенням паркінгів для велосипедів біля транспортних хабів є основою успішної інтеграції. Паралельно міжнародні організації, такі як OECD, рекомендують впровадження інтегрованих квиткових систем та комфортних

пересадкових пунктів для полегшення міжвидових поїздки. Представлені у звіті OECD [7] рекомендації підкреслюють важливість координації транспортних послуг з урахуванням інноваційних технологій та соціально-економічних аспектів.

На першому етапі інтеграції з громадським транспортом здійснюється інвентаризація зупинок та станцій громадського транспорту: автобусних, трамвайних, метрополітену та міської електрички. Пріоритетними визначаються вузли з високим пасажиропотоком – понад 1000 осіб на день. Для об'єктивної оцінки доцільності облаштування велосипедного паркування також враховується інтенсивність велоруку в районі за допомогою GPS-даних, камер відеоспостереження або результатів польових досліджень. Успішність інтеграції залежить від співпраці між органами влади, мешканцями та бізнесом.

Використання кращих світових практик, як показують дослідження Spierenburg [8], є запорукою розробки ефективної інфраструктури, спрямованої на підвищення доступності та безпеки. Проекти, що розвиваються з урахуванням потреб користувачів, отримують більш позитивний соціальний резонанс і сприяють популяризації велосипедного транспорту. З метою оцінки потенційного використання велосипедів як частини мультимодальної поїздки пропонується проведення соціологічного опитування мешканців району. Водночас аналізуються дані про модальний розподіл видів транспорту (modal share), що дозволяє визначити поточний стан мобільності та перспективи для розвитку велосипедного транспорту.

Розміщення велопарковок має відповідати ряду обов'язкових вимог [9]:

- відстань до входу на станцію або зупинку не повинна перевищувати 30 м.
- обов'язкова наявність освітлення, захисту від опадів, антивандального захисту.
- передбачення можливості розширення паркінгу в майбутньому.
- При плануванні простору для паркування велосипедів потрібно визначитись з видом велопарковки. Типологія велопарковок включає:
 - відкриті U-подібні стійки (для короткочасного паркування);
 - закриті велобоксы або велогаражі (для тривалого зберігання);
 - багаторівневі системи (у великих транспортно-пересадочних вузлах ТПВ із обмеженою площею).

Кількість місць для паркування велосипедів визначається в розмірі 5-10 % від середньоденного пасажиропотоку на конкретному ТПВ. Проектна площа на один велосипед складає 1,5-2 м², з урахуванням габаритів не лише звичайних, а й електровелосипедів та велоприцепів. Ці підходи дозволять забезпечити перехід від традиційного запам'ятовування матеріалу здобувачами до активного створення та впровадження інноваційних рішень, що є суттю інноваційної компетентності та ефективним поєднанням технічної грамотності із цифровими та управлінськими навичками у відповідності до вимог ринку праці.

Забезпечення інтеграції велосипеда з громадським транспортом включає не лише розвиток фізичної інфраструктури, але й впровадження доступних систем перевезення велосипедів. Для повноцінної інтеграції важливо передбачити можливість перевезення велосипедів у транспорті (особливо в метро, трамваях, електричках), а також встановлення спеціальних кріплень. Доцільним є використання мобільних застосунків, що поєднують планування велосипедного маршруту та поїздки громадським транспортом. Інформаційні табло та вказівники з позначками «Bike+Ride» повинні бути доступними на кожній ключовій точці пересадки. Дослідження U-Cycle [10] показують, що організація умов для перевезення велосипедів у транспорті підвищує привабливість мультимодальних поїздки і сприяє зменшенню використання автомобілів.

Запропоновано використовувати наступні індикатори для моніторингу результатів:

- кількість велосипедів, що паркуються щодня;
- відсоток завантаженості велопарковки;
- скорочення кількості коротких поїздки автомобілем у зоні дії проекту.

Згідно з дослідженнями транспортної поведінки мешканців, велосипед найчастіше залишають у таких локаціях:

- біля станцій метро та великих зупинок громадського транспорту;
- поблизу навчальних закладів, офісів, магазинів, адміністративних установ;
- біля торговельних і розважальних центрів, ринків, лікарень, парків.

Для обґрунтованого проектування варто враховувати середню тривалість паркування, а також динаміку заповнення паркомісць протягом дня. Ці дані дозволять не лише оптимально розмістити велопарковки, а й забезпечити їх гнучке масштабування за потреби.

Інтеграція велоінфраструктури і громадського транспорту є стратегічним напрямом розвитку сучасних міст. Вона допомагає досягти цілей сталого розвитку, зокрема зниження викидів CO₂ і підвищення мобільності населення. Практика свідчить, що комплексний підхід до розвитку цієї інтеграції, що враховує технічні, організаційні та соціальні аспекти, є найбільш ефективним для українських міст. Впровадження запропонованих заходів з розбудови велоінфраструктури сприятиме зменшенню кількості приватних автомобілів на дорогах, зниженню обсягів викидів шкідливих речовин, поліпшенню якості повітря, а також покращенню загального рівня життя мешканців. Крім того, такий проект має чіткий соціально-економічний ефект, оскільки скорочує транспортний час, зменшує витрати громадян і стимулює здоровий спосіб життя, і є стратегічним інвестиційним рішенням, яке забезпечить тривалий розвиток міста, його екологічну сталість та конкурентоспроможність серед інших територій.

Література

1. Бажинов, А., Сідак Ю., Майбутня стала міська мобільність: перспективи розвитку. *Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталій розвиток транспортних систем: наука і практика : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., 25–26 листоп. 2024 р.* Харків: ХНАДУ. 2024. С. 290-293.
2. Кашуба О., Гудзь С. Закордонний досвід формування велосипедної мережі та його вплив на створення велоцентрів в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Архітектура». № 2 (10), 2023. С. 67-76.*
3. Чернишова О. Формування мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання: дис. канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2019. 207 с.
4. Фоменко Г. Р. Велотранспорт і його розвиток у населених пунктах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 35 (74). № 6. 2024. с. 288-292.
5. Oeschger J. Measuring the integration of micromobility and public transport networks: a spatial accessibility perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2025. Vol. 136. P. 53-67. DOI: 10.1016/j.tra.2020.06.001.
6. Концепція розвитку велосипедної інфраструктури в місті: Звіт КМР / Кіровоградська міська рада. 2023. 56 с.
7. OECD. Integrating Urban Public Transport Systems and Cycling // OECD Publishing. — 2023. 120 p. URL: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/urban-transport> (дата звернення: 10.11.2025).
8. Spierenburg J. Strategic placement of cycling infrastructure to enhance job accessibility by transit. *Transport Policy.* 2024. Vol. 120. P. 107-116. DOI: 10.1016/j.tranpol.2024.01.005.
9. ДСТУ 8906:2019. Планування та проектування велосипедної інфраструктури. Загальні вимоги. Чинний від 2020-10-01. Вид. офіц. 2019. 51 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=85776 (дата звернення: 10.11.2025).
10. U-Cycle. Safe integration of bicycle infrastructure in urban transport systems // U-Cycle. 2015. URL: <https://velotransport.u-cycle.org.ua> (дата звернення: 10.11.2025).

ШВИДКІСТЬ ЩІЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ З ТРЬОМА ПОВІЛЬНИМИ АВТОМОБІЛЯМИ БЕЗ МОЖЛИВОСТІ ЇХ ОБГОНУ ТА ВИПЕРЕДЖЕННЯ

Горбачов П. Ф., Свiчинський С. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

stas_svichinsky@ukr.net

Транспортні потоки (ТП) у містах створюють значне навантаження на вулично-дорожню мережу (ВДМ), породжуючи низку транспортних, екологічних і безпекових проблем [1]. Для їх подолання необхідна інформація про основні параметри ТП, серед яких важливе місце належить випадковій величині швидкості. Дану величину можна вважати достатньо вивченою у вільних умовах руху, при яких вона добре описується нормальним законом розподілу [2]. Що стосується швидкості автомобілів у складних умовах, то на сьогоднішній день для її опису не встановлено єдиного розподілу, придатного до повсюдного застосування. Це говорить про те, що задача прогнозування характеристик ТП у містах залишається актуальною, і з її вирішенням допомагає фундаментальна діаграма (ФД) ТП. Дана діаграма встановлює зв'язок між швидкістю, щільністю та інтенсивністю потоку і в одній системі координат поєднує усі стани ТП [3]. В той же час, ступінь врахування у ФД процесів, які відбуваються у щільних ТП та спричиняють коливання швидкості і впливають на її середнє значення, потребує ретельного аналізу.

Ущільнення ТП на певних ділянках міської ВДМ можна розглядати як наслідок неможливості водіїв обрати альтернативну траєкторію руху, яка би дозволила їм безперешкодно подолати подібні ділянки. Перехід ТП у щільний стан можливий за різних ситуацій, серед яких часто трапляються звуження дороги до однієї смуги руху в певному напрямі за високої інтенсивності ТП і в'їзд з регульованого перехрестя на ділянку ВДМ із однією доступною для руху смугою. В обох ситуаціях водії сильно обмежені у можливостях маневрування і вимушені прямувати один за одним. Прямкування зі швидкістю, обмеженою їдучим попереду автомобілем, призводить до того, що вся пачка транспортних засобів (ТЗ) ділиться на більш дрібні, очолювані повільними автомобілями (ПА). Це створює умови для формалізації процесу руху і виведення залежності середньої швидкості потоку від швидкості окремих його учасників.

У попередніх дослідженнях були розглянуті випадки наявності у ТП одного [4] та двох [5] ПА. Наявність у потоці трьох ПА є наступною за складністю задачею оцінки середньої швидкості автомобілів на смузі руху без обгонів та випереджень. Для вирішення даної задачі вона була формалізована наступним чином: нехай N автомобілів ($N > 3$) рухаються щільним потоком і у випадковому порядку в'їжджають на смугу руху, де неможливі обгони та випередження; нехай нумерація автомобілів у пачці, що утворюється на смузі, починається з 0, і тоді при рівній ймовірності для кожного автомобіля зайняти будь-яке місце у пачці X кожен з них з ймовірністю $1/N$ може мати номер $[0; N - 1]$, $x \in [0; N - 1]$; нехай усі водії, крім трьох, прагнуть їхати з максимально дозволеною швидкістю $V_{\max}$; нехай водій першого повільного автомобіля (ПА1) їде зі швидкістю V_s , $0 < V_s < V_{\max}$, другого ПА (ПА2) – зі швидкістю V_2 , $V_s < V_2 < V_{\max}$, третього ПА (ПА3) – зі швидкістю V_3 , $V_s < V_2 < V_3 < V_{\max}$; нехай $\Delta_s = (V_{\max} - V_s)$ – відхилення швидкості ПА1 від максимально дозволеної, $\Delta_2 = (V_2 - V_s)$ – відхилення швидкості ПА2 від швидкості ПА1, $\Delta_3 = (V_3 - V_s)$ – відхилення швидкості ПА3 від швидкості ПА1.

Оскільки обгони на смузі руху неможливі, то у ситуації з трьома ПА швидкість $(N - 3)$ автомобілів, водії яких бажають їхати зі швидкістю $V_{\max}$, буде залежати від того, за яким із ПА вони опинилися. Якщо за першим, то вони виїжджатимуть з односмугової ділянки зі швидкістю V_s ; якщо за другим, то зі швидкістю V_2 ; якщо за третім – зі швидкістю V_3 ; швидкі

автомобілі перед усіма ПА – виїжджатимуть зі швидкістю $V_{\max}$. Очевидно, що швидкість потоку залежить від розміщення автомобілів у ньому, і загальна кількість його варіантів дорівнює $N!$.

Якщо найповільніший ПА, що їде зі швидкістю V_s , опинився в потоці поперед ПА2 і ПА3 та зайняв у ньому якусь позицію X (рисунок 1), то середня швидкість потоку на виїзді зі смуги руху буде такою самою, як і у випадку єдиного ПА, та представлена у статті [4]. Кількість таких ситуацій у повному наборі перестановок автомобілів дорівнює $N!/3$, а ймовірність цієї події дорівнює $1/3$. При цьому набір позицій, які займає перший ПА, обмежується першими $(N-2)$ позиціями у черзі, оскільки за ним обов'язково мають перебувати другий і третій ПА. З такою самою ймовірністю $1/3$ на якійсь позиції X поперед першого ПА може опинитися як другий ПА, що бажає їхати зі швидкістю V_2 , так і третій ПА, що прагне мати швидкість V_3 .

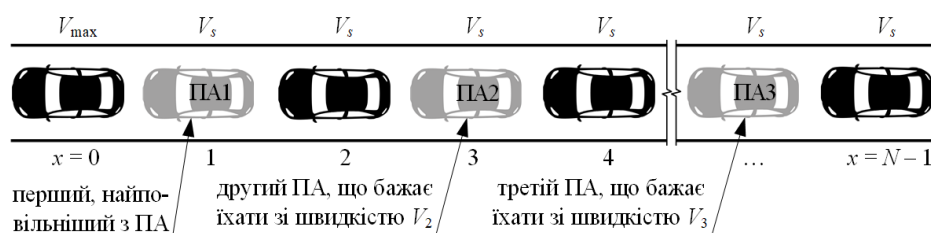


Рисунок 1 – ТП з трьома ПА, коли найповільніший із них опинився поперед інших ПА

При другому ПА попереду всі автомобілі перед ним їхатимуть зі швидкістю $V_{\max}$, він – зі швидкістю V_2 , а автомобілі за ним – або зі швидкістю V_2 , якщо перед ними немає ПА1 (рисунок 2а), або зі швидкістю V_s , якщо він перед ними є (рисунок 2б).

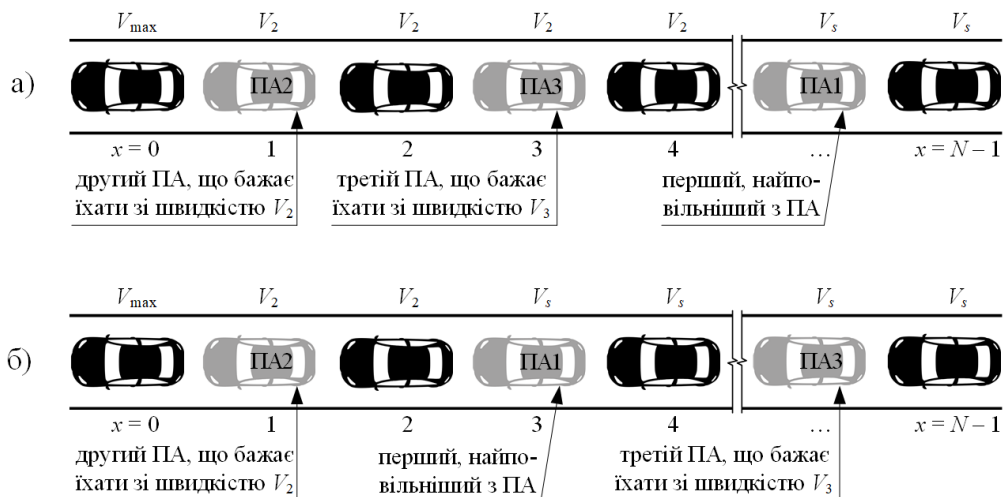


Рисунок 2 – ТП з трьома повільними автомобілями, коли другий із них виявився поперед інших: а) найшвидший ПА попереду найповільнішого ПА; б) найповільніший ПА попереду найшвидшого ПА

Аналогічна ситуація для повного набору з N автомобілів і з такими самими швидкостями вже описана у статті [5].

Якщо ж раніше двох найповільніших ПА на позиції X в потоці перебуватиме третій ПА, то всі автомобілі попереду нього їхатимуть зі швидкістю $V_{\max}$, він – зі швидкістю V_3 , а автомобілі позаду нього – зі швидкістю V_3 , якщо перед ними немає жодного з двох самих

повільних автомобілів. Якщо ж один із двох найповільніших ПА перед ними зустрічається, вони їхатимуть або зі швидкістю V_2 , якщо в хвості потоку за третім ПА раніше зустрічається ПА2 (рисунок 3а), або зі швидкістю V_s , якщо в цьому хвості раніше зустрічається перший, найповільніший ПА (рисунок 3).

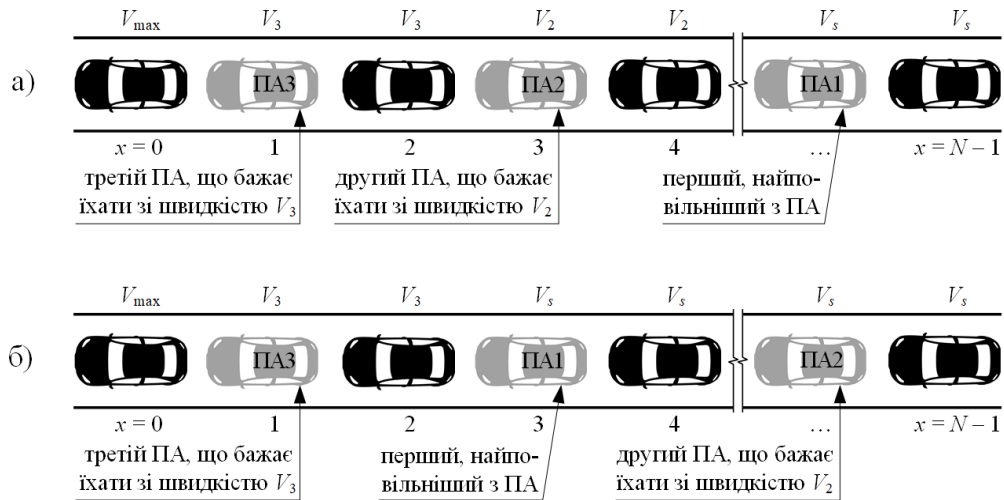


Рисунок 3 – ТП з трьома повільними автомобілями, коли третій (найшвидший) з них виявився попереду інших: а) другий ПА в хвості потоку попереду найповільнішого ПА; б) найповільніший ПА в хвості потоку попереду другого ПА

Результати статей [4] і [5] та виконані спираючись на представлену формалізацію математичні перетворення дозволили отримати формулу для розрахунку середньої швидкості щільного ТП з трьома ПА на ділянці дороги з однією доступною для руху смугою без можливості виконання маневрів обгону або випередження:

$$\bar{V} = V_s + \frac{\Delta_s}{N} \cdot \frac{N-3}{4} + \frac{\Delta_2}{N} \cdot \frac{N+1}{6} + \frac{\Delta_3}{N} \cdot \frac{N+1}{12}. \quad (1)$$

Дана формула дає можливість оцінити внесок кожного із трьох ПА у середню швидкість потоку та створює основу для подальших досліджень ТП з будь-якою кількістю ПА.

Література

1. Vuchic V.R. Transportation for Livable Cities. Abingdon: Routledge, 2017. 376 p.
2. Khan J.A., Tarry S.R. Speed spot study by comparing time mean speed and space mean speed: A case study. *International Journal of Advanced Science and Research*. 2018. Vol. 3(1). P. 97–102.
3. Inose H., Hamada T. Road Traffic Control. Tokyo: University of Tokyo Press, 1975. 331 p.
4. Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Середня швидкість щільного транспортного потоку з одним повільним автомобілем на ділянці дороги з обмеженими можливостями маневрування. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2(23). С. 57–64.
5. Horbachov P., Svichynskyi S. The average vehicle speed in a dense traffic flow with two slow-moving vehicles on a road section with limited manoeuvring opportunities. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2025. № 1(24). P. 30–44.

КІЛЬЦЕВІ ПЕРЕТИНАННЯ НА ВУЛИЦЯХ МІСТ ЯК ФАКТОР ВПЛИВУ НА РУХ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Осипов В. О., Хоменко В. О.

Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Osipov.valentin100@gmail.com

В глобальному масштабі дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) щорічно стають причиною майже 1,3 мільйонів смертей, яких можна було б запобігти та близько 50 мільйонів випадків травмувань, що робить їх основною причиною смертності молоді у всьому світі. За твердженням фахівців, якщо не впроваджувати екстрених заходів, ДТП з великою долею вірогідності стануть причиною ще близько 12-13 млн. смертельних випадків та близько 400-500 млн. випадків поранень у наступні 10 років; це призведе до стагнації у соціально-економічному розвитку, особливо в країнах з невисоким економічним рівнем. Таку динаміку попри зусилля міжнародних організацій та урядів науковці спостерігають протягом останніх двох десятиріч.

Усвідомлюючи всю глибину наслідків аварійності провідними урядами світу була прийнята резолюція 74/299 Генеральної Асамблеї ООН, в якій вони проголосили 2021-2030 р.р. Другим Десятиліттям дій із забезпечення безпеки дорожнього руху, з мета якого - зниження смертності та травматизму через ДТП принаймні на 50 відсотків протягом вказаного періоду. У Плані перелічено заходи, запропоновані для реалізації вказаної мети, передбачається, що План стане базисом національних урядів та органів місцевого самоврядування для розробки відповідних місцевих програм з безпеки руху.

План пропонує шукати фахівцям нові інноваційні підходи до вирішення нагальних питань мінімізації ризиків скоєння ДТП та взяти за основу так званий комплексний підхід - «Безпечна система», як такий, що стане «наріжним камінням» у розвитку нової цивілізаційної парадигми. План також закликає до дій, які допоможуть світовій спільноті досягти мети - скорочення до 2030 року кількості смертей та серйозних травмувань внаслідок ДТП мінімум на 50 відсотків, у тому числі впроваджуючи нові інженерні рішення.

Геометричні параметри кільцевого пересічення є на сьогодні фактором впливу на рух транспортного потоку, який, на думку авторів, потребує додаткового вивчення. Відсутність у певної частини водіїв знань та навиків руху кільцевим пересіченням вимагають від дослідників пошуку способів мінімізації впливу людського фактору на проблему.

Задача дослідження - добитися передбачуваності поведінки водіїв завдяки фізичному каналізуванню транспортних потоків. Згідно з пунктом 9.2.2.2 ДБН В. 2.3-4:2015 [1], основні геометричні параметри кільцевих пересічень визначаються відповідно до ГБН В.2.3-37641918-555:2016 «Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні. Проектування» [2]. У вказаному нормативі визначені всі геометричні параметри елементів пересічення, достатньо розпливчати залишилися тільки параметри висоти безпосередньо центрального кільця. Згідно з вказаним нормативом (пункт 6.1.8.2) з метою полегшення розвороту великогабаритного транспорту вся або майже вся поверхня центрального кільцевого острівця повинна бути доступною для руху і мати тверде покриття - асфальтобетонне, цементобетонне, бруківку або інший міцний матеріал, який може витримувати навантаження від розрахункового транспорту.

На центральних острівцях міні кільцевих розв'язок згідно з [2] не можна розміщувати жодної перешкоди (знаки, світильники, маячки, рослини тощо). Острівці мають бути припідняті по крайці на висоту від 5 мм до 10 мм над рівнем проїзної частини. Острівець слід влаштовувати куполоподібної форми з підвищенням центральної частини (вершини купола) відносно крайки оточуючого кільця на 150 мм. Покриття поверхні центрального острівця міні кільцевої розв'язки повинно бути світлішим ніж покриття колової проїзної частини та мати світлоповертальні властивості.

Згідно з програмою облаштування кільцевих пересічень малого радіусу у місті Києві було влаштовано близько 30 пересічень різної конфігурації, у тому числі різної висоти

центрального острівця. Так, на вул. Уїнстона Черчилля було влаштовано «пологий» острівець згідно з [2], у той же час на вул. Кіото влаштовано острівець, периметр якого облаштовано підвищеним бордюрним камінням заввишки 15 см над проїзною частиною по всьому периметру.

З метою визначення впливу висоти центрального острівця кільцевого пересічення на пропускну спроможність транспортних потоків були проведені виміри затримки автомобілів у вказаних місцях. Під затримкою розуміється виконання водієм маневру об'їзду центрального кільця згідно з чинними Правилами дорожнього руху із зниженням швидкості транспортного засобу. Суть проведеного дослідження полягає у визначенні сумарної затримки, накопиченої призупиненими перед центральним кільцем автомобілями і приведення її до одного умовного автомобіля, що проїхав безпосередньо через центральне кільце.

Дослідження мало наступний вигляд. У заздалегідь підготовлені таблиці за кількістю напрямів руху на обстежуваній ділянці вулично-дорожньої мережі заносяться дані про кількість транспортних засобів, що пройшли без зупинки, та кількість автомобілів, що призупинилися перед центральним кільцем та здійснили маневр його об'їзду із зниженням швидкості транспортних засобів згідно з чинними Правилами дорожнього руху. Підрахунок проводився протягом 10 хвилин.

У результаті проведеного дослідження виявлено, що затримки транспортних засобів на під'їзді до центрального кільця не мають суттєвого впливу на швидкість руху транспортного потоку, проте швидкість руху транспортного потоку може мати значне зниження у разі збільшення висоти центрального кільця. З'ясовано, що при використанні центрального кільця, побудованого згідно з [2] 10% водіїв, що попадають на кільцеве пересічення, прокладають маршрут прямою траєкторією ігноруючи існуючі вимоги дорожніх знаків, розмітки та Правил дорожнього руху, що може говорити про часткову неефективність виконаних заходів та пропорційне підвищення небезпеки на об'єкті через неочікуваний маневр, який стає можливим через недосконалі геометричні особливості центрального кільця [3-5].

Таким чином, у зв'язку з виявленими обставинами виникає потреба у зміні підходів до проектування, в яких було б закладено обов'язкове підвищення центрального кільця на рівень 15 см, та внесення змін до існуючих нормативів. Такі заходи дадуть можливість на законодавчому рівні внормувати недосконалості засобів заспокоєння руху в населених пунктах.

Література

1. Автомобільні дороги: ДБН В. 2.3-4:2015. [Чинний від 2016-10-31]. К.: Держбуд України, 2015. 91 с.
2. ГБН В.2.3-37641918-555:2016 Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні. Проектування: ГБН В.2.3-37641918-555:2016 [Чинні з 2016-01-07]. К. : Укравтодор, 2016. 61 с.
3. Густелєв О. О. Досвід використання засобів заспокоєння руху у м. Києві / О. О. Густелєв, В. О. Осипов // Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні матеріали та технології для будівництва та ремонту автомобільних доріг». К. : ДП «ДерждорНДІ», 2019. С. 20-22.
4. Осипов В. О., Мельниченко О. І. Удосконалення методу оцінки безпеки дорожнього руху на окремих ділянках автомобільних доріг : монографія / Осипов В. О., Мельниченко О.І. К. : НТУ, 2019. 172 с. ISBN 978-966- 632-294-7
5. Olexandr Melnychenko, Valentyn Osypov. Development of mechanism for the economic efficiency evaluating of measures to enhance road traffic safety // Innovations in science: current research and advanced technologies : Scientific monograph. Part 1. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2025. P. 26-43. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-531-0-2>

ЗНИЖЕННЯ ЗАТОРНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПУНКТАХ ЗУПИНКИ МАРШРУТІВ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

В. А. Кашканов¹, О. В. Рябушенко², К. І. Томляк¹

¹*Вінницький національний технічний університет*

²*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

kash_2004@ukr.net

У наукових працях вітчизняних та зарубіжних вчених зазначено, що якість транспортного обслуговування міського населення пасажирським транспортом загального користування багато в чому визначається: частотою руху транспортних засобів (ТЗ) на міських маршрутах, можливістю безпересадкової реалізації найбільш затребуваних кореспонденцій, забезпеченням гарантованого обслуговування пасажирів, у тому числі у періоди пікових навантажень [1]. На практиці реалізація більшості заходів, спрямованих на підвищення якості транспортного обслуговування населення за такими показниками, як регулярність, надійність і доступність пов'язана зі збільшенням чисельності транспортних засобів на маршрутах, що обслуговуються, і, як наслідок, на магістральних міських вулицях. Зростання чисельності пасажирських ТЗ, їх концентрація на міських магістралях (особливо в години пік), неузгодженість графіків руху ТЗ різних маршрутів призводять до формування заторних процесів на пунктах зупинки, що призводить до значного зниження ефективності роботи міського пасажирського транспорту (МПТ), ефективності використання вулично-дорожньої мережі та транспортної інфраструктури [2].

Основні заходи, застосування яких впливає на зниження заторних процесів на зупинках міського пасажирського транспорту, можна поділити на чотири основні групи: інженерно-планувальні, організаційно-технологічні, інформаційно-управлінські, соціально-поведінкові. Сформуємо відповідність можливих заходів зниження заторних процесів до визначених факторів впливу на пропускну здатність ділянки дороги біля зупинки МПТ у таблицю 1.

Таблиця 1 – Можливі заходи на пропускну здатність ділянки дороги біля зупинки МПТ

Фактори	Заходи
1	2
Інженерно-планувальні	
Тип зупинки (заїзна, виїзна, острівна)	Заїзна зупинка зменшує вплив на потік автомобілів, але ускладнює повернення автобуса на смугу; виїзна (на проїжджій частині) підходить для виділених смуг
Довжина та ширина посадкового майданчика	Збільшення довжини дозволяє одночасно приймати кілька транспортних засобів, зменшуючи черги
Відстань між зупинками	Оптимальна відстань (біля 500 м у міських умовах) зменшує частоту зупинок і затримки
Розташування щодо перехрестя	Зупинки після перехрестя меншою мірою блокують рух, ніж перед перехрестям
Наявність виділеної смуги для громадського транспорту	Забезпечує безперешкодний підхід/виїзд, знижуючи вплив на загальний потік
Організація підходів пішоходів	Безпечні переходи, відсутність хаотичного переходу дороги біля зупинки зменшують додаткові затримки
Організаційно-технологічні фактори	
Тривалість посадки/висадки пасажирів	Основний параметр, що визначає тривалість блокування зупинки скорочується за рахунок оптимізації параметрів входу/виходу з ТЗ та системи оплати проїзду
Число дверей у ТЗ та організація потоків пасажирів	Розділення входу та виходу, використання декількох дверей зменшує час стоянки

Продовження таблиці 1

1	2
Система оплати проїзду	Безконтактна чи попередня оплата скорочує час стоянки ТЗ на 20–40%
Синхронізація графіків маршрутів	Уникнення одночасного прибуття кількох автобусів на одну зупинку знижує локальні затори
Контроль часу стоянки водіями	Дотримання нормативів стоянки зменшує час блокування смуги
Частота рейсів і наповненість транспортних засобів	Надмірна кількість рейсів або переповненість призводять до черг на зупинці; оптимізація розкладу вирівнює потоки
Інформаційно-управлінські фактори	
Інтелектуальні транспортні системи (ІТС)	Дають змогу відстежувати рух МПТ, коригувати його графіки, керувати світлофорами з урах. прибуття ТЗ
Пріоритет громадського транспорту на світлофорах	Зменшує затримки при виїзді із зупинки, покращуючи пропускну здатність
Інформаційне забезпечення пасажирів	Табло з часом прибуття зменшує скупчення пасажирів і хаос при посадці
Моніторинг і моделювання транспортних потоків	Дозволяє виявити проблемні зупинки та розробити точкові рішення (подовження платформи, перенесення, зміна розкладу)
Соціально-поведінкові фактори	
Дисципліна пасажирів при посадці/висадці	Організована черга, дотримання правил посадки скорочує час стоянки
Культура водіїв і дотримання графіка	Водій, який своєчасно під'їжджає та не перевищує норматив стоянки, зменшує затримки
Рівень інформованості пасажирів	Якщо пасажирів знають розклад і маршрут, вони швидше організовуються під час посадки

Інженерно-планувальні заходи дозволяють зменшити геометричні перешкоди для руху МПТ (застосування виділених смуг, заїзних кишень, встановлення оптимальних відстаней між зупинками), організаційно-технологічні – дозволяють скоротити час стоянки ТЗ та уникнути їх черг (безконтактна оплата, розділення потоків пасажирів, контроль графіка руху ТЗ), інформаційно-управлінські – дозволяють підвищити керованість процесів (ІТС, моніторинг GPS, пріоритет на світлофорах), соціально-поведінкові – дозволяють забезпечити дисципліну та ефективність користування МПТ (інформація для пасажирів, навчання водіїв).

Зниження заторних процесів на зупинках міського пасажирського транспорту можливе лише за умови комплексного підходу, який охоплює: технічну оптимізацію зупинок, організацію ефективного руху та посадки/висадки, впровадження систем управління рухом, підвищення культури користування транспортом. У сукупності ці фактори дозволяють зменшити час простою МПТ, збільшити пропускну здатність вулично-дорожньої мережі і підвищити комфорт перевезень.

Література

1. M. Zhuk, V. Kovalyshyn, V. Zelemskyi. Study of the passengers average waiting time at public transport stops. *TRANSPORT TECHNOLOGIES*. 2023; Volume 4, Number 1 : 21-28 <https://doi.org/10.23939/tt2023.01.021>
2. Кашканов В. А. Актуальність використання програм з імітаційного моделювання транспортних потоків для підготовки фахівців автотранспортної галузі. Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Полтава, 20-21 березня 2023 року)*. Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023. С. 403-407. URL: <https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/handle/123456789/9720>

ПЕРСПЕКТИВА ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОЦЕНТРОВОЇ МЕРЕЖІ ДОСТАВКИ З КОНФІГУРАЦІЄЮ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В МІСТІ**Павленко О. В., к.т.н., доц.***Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ttpov@ukr.net*

Швидке зростання електронної комерції та платформ онлайн-шопінгу призвело до різкого збільшення споживчого попиту на товари серед міських жителів, який дедалі більше демонструє характеристики диверсифікації та фрагментації [1, 2, 3]. Згідно зі звітом, наприклад, опублікованим у 2024 році, обсяг міських послуг доставки та збору (МДЗ) на останній милі в Китаї досяг вражаючих 174,5 мільярда товарів, а доходи від бізнесу склали 1,4 трильйона юанів, що відображає вражаючі темпи зростання на 21% та 13% відповідно порівняно з попереднім роком [4]. Одночасно загальна вартість МДЗ соціальної логістики перевищила поріг у 360 трильйонів юанів [5]. Однак, невідповідність між величезним ринковим попитом та відносно обмеженою базовою логістичною інфраструктурою загострила конкуренцію серед малих та середніх логістичних компаній, що спеціалізуються на системах розподіленої логістики (МДЗ) [6, 7]. У цьому контексті традиційні логістичні підприємства, які працюють незалежно та надають лише разові послуги доставки або самовивозу, все частіше стикаються з проблемами, пов'язаними з дефіцитом капіталу, обмеженими ресурсами та недостатніми масштабами. Ці підприємства зазвичай стикаються з такими проблемами, як зниження прибутковості та низька стійкість до ризиків [8, 9]. Щоб пом'якшити ці проблеми, деякі логістичні компанії активно шукають зовнішньої співпраці, досліджуючи нові шляхи для логістичної кооперації та інтеграції ресурсів шляхом залучення зовнішнього фінансування, додаткових ресурсів та спільних логістичних каналів. Ця тенденція каталізувала перехід логістичних мереж доставки та збору (ЛМДЗ) від моделей з одним центром до спільних багатоцентрових мереж [10, 11]. Створення спільних розподільчих центрів в умовах міських та приміських обмежень, може спричинити нове партнерство між кількома великими логістичними компаніями. Такі ініціативи, як спільні підприємства та спільна логістична інфраструктура (наприклад, стандартизовані системи доставки та обладнання), можуть знизити експлуатаційні витрати на доставку «останньої милі» в місті приблизно на 30-50%, одночасно підвищуючи операційну ефективність розподільчих центрів на 20-40%. Таким чином, оптимізація роботи спільної багатоцентрової мережі доставки та збору (СБМДЗ), ефективна інтеграція МДЗ, зниження експлуатаційних витрат мережі та підвищення ефективності використання інфраструктурних ресурсів, особливо в умовах обмеженої міської логістичної інфраструктури та транспортних ресурсів, стає важливим та цінним питанням для підприємств міської логістики, які прагнуть сталого розвитку.

На відміну від традиційних ЛМДЗ, СБМДЗ демонструють більш різноманітний спектр функцій у своїх розподільчих центрах та центрах видачі замовлень. Ці центри не лише обслуговують власних клієнтів, але й надають МДЗ іншим об'єктам, значно розширюючи сферу своїх послуг [12]. З точки зору планування маршрутів, СБМДЗ демонструє надзвичайну гнучкість: транспортні засоби, що відправляються з будь-якого об'єкту, можуть або повернутися до того ж об'єкту, або обслуговувати клієнтів в інших об'єктах перед поверненням, формуючи таким чином гібридну модель відкрито-закритих маршрутів доставки та видачі замовлень [13, 14]. Для реалізації цих функцій та проектів формування логістичного альянсу є найефективнішим та найстабільнішим підходом серед різних форм логістичної співпраці [15]. В операційній структурі альянсу, СБМДЗ може централізувати та ефективно розподіляти розосереджені замовлення клієнтів, прості транспортні засоби та інші логістичні ресурси через ділову співпрацю та синергетичні послуги між членами альянсу. Ця структура не тільки сприяє інтенсивним мережевим операціям, але й заохочує значну синергію альянсу [16]. Синергія в логістичних альянсах реалізується через: спільні платформи, що дозволяють об'єднувати ресурси за допомогою навчання зі збереженням конфіденційності; синхронізоване планування та угоди про розподіл витрат для справедливого розподілу

економії від консолідації вантажів та зменшення кількості порожніх пробігів. Однак варто зазначити, що різні форми альянсу та комбінації членів відповідають різним масштабам клієнтів, можливостям обслуговування та рівням ресурсів.

Незважаючи на створення логістичного альянсу між членами для синергетичного обслуговування клієнтів у рамках СБМДЗ, певні логістичні ресурси, такі як стаціонарні міські логістичні об'єкти та логістичні канали, що потребують значних інвестицій для будівництва та розширення, залишаються складними для розподілу як внутрішньо, так і зовнішньо між членами альянсу через їхню унікальність та дефіцитність [17, 18]. Ці ресурси часто втілюють основну конкурентоспроможність логістичних компаній. Натомість, транспортні ресурси для експлуатації в місті можна придбати більш гнучко, як правило, шляхом оренди, купівлі та іншими способами. Логістичні компанії демонструють високий рівень прийняття розподілу вільних транспортних ресурсів, отримуючи переваги від таких домовленостей, значно зменшуючи капітальні обмеження, тим самим створюючи більшу норму прибутку [19]. Таким чином, розподіл транспортних ресурсів між членами альянсу, безсумнівно, може служити ефективним засобом підвищення ступеня синергії альянсу та ефективності мережі. Зокрема, в рамках спільного проектування багатоцентрової мережі доставки та збору вантажів з використанням послуг синергії альянсу (ПСА), планування гібридних відкрито-закритих МДЗ забезпечує зручність для гнучкого розподілу всіх видів ресурсів. Зокрема, в межах допустимого часу руху транспортні засоби можуть послідовно виконувати МДЗ вздовж одного маршруту, що дозволяє гнучке розгортання та розподіл між різними клієнтами доставки та збору вантажів. Отже, конфігурацію транспортних ресурсів (КТР) можна інтегрувати в мережі доставки та збору вантажів з використанням послуг синергії альянсу для дослідження проектування спільної багатоцентрової мережі доставки та збору вантажів з КТР та ПСА (мережа доставки та збору вантажів з використанням послуг синергії альянсу). Ця ініціатива значною мірою сприятиме низьковитратному, інтенсивному та сталому розвитку інфраструктури, в тому числі в межах міст.

Література

1. A sustainable on-demand urban delivery service enabled by synchromodality and synergy in passenger and freight mobility / O. Labarthe et al. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 161. P. 104544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104544>.
2. Two-echelon collaborative many-to-many pickup and delivery problem for agricultural wholesale markets with workload balance / J. Li et al. *Omega*. 2025. Vol. 130. P. 103164. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103164>.
3. Pavlenko O., Muzylyov D., Ivanov V. Determination of an Effective Supply Chain: Case Study for Delivering Products from the USA to Ukraine. *Advanced Manufacturing Processes V*. Cham, 2023. P. 82–93. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_8.
4. State post bureau of the People's Republic of China (SPBPRC), 2024. Postal industry's delivery volume exceeds 190 billion packages. URL: <https://www.spb.gov.cn/gjyzj/c204534nvg/202501/d9f5203896b04dbbb9f9b2231f86f71c.shtml>
5. China federation of logistics & purchasing (CFLP), 2024. Logistics operation analysis from January to August in 2024. URL: <http://www.chinawuliu.com.cn/lhhzq/202410/05/638694.shtml>
6. Karademir C., Beirigo B. A., Atasoy B. A two-echelon multi-trip vehicle routing problem with synchronization for an integrated water- and land-based transportation system. *European Journal of Operational Research*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.047>.
7. Medvediev I., Muzylyov D., Montewka, J. A model for agribusiness supply chain risk management using fuzzy logic. Case study: Grain route from Ukraine to Poland. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 190, 2024. P. 103691.
8. Multi-Stage Resource Leveling Problem with Self-operation and Outsourcing Cooperation in Sharing Logistics / X. Xu et al. *Omega*. 2024. P. 103221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103221>.
9. Muzylyov D. Medvediev I. Pavlenko O. Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2024, Vol. 1376 (1), 012038.

10. Time-dependent fleet size and mix multi-depot vehicle routing problem / C. E. Schmidt et al. International Journal of Production Economics. 2022. P. 108653. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108653>.
11. Pavlenko O., Muzylyov D., Trojanowska J., Ivanov V. Rational Logistics of Engineering Products to the European Union. International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance. Springer. 2023. P. 25-38.
12. The multi-depot pickup and delivery vehicle routing problem with time windows and dynamic demands / Y. Wang et al. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. Vol. 139. P. 109700. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109700>.
13. Dragomir A. G., Van Woensel T., Doerner K. F. The pickup and delivery problem with alternative locations and overlapping time windows. Computers & Operations Research. 2022. Vol. 143. P. 105758. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105758>.
14. Kopytkov D., Pavlenko O. An approach to determine the rational scheme of delivery for the international consolidated shipments. *Комунальне господарство міст*. 2019, № 147 (1), С. 35-41.
15. A multi-visit flexible-docking vehicle routing problem with drones for simultaneous pickup and delivery services / J. Jiang et al. European Journal of Operational Research. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.021>.
16. A sustainable on-demand urban delivery service enabled by synchromodality and synergy in passenger and freight mobility / O. Labarthe et al. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024. Vol. 161. P. 104544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104544>.
17. Multi-task differential evolution algorithm with dynamic resource allocation: A study on e-waste recycling vehicle routing problem / Y. Hou et al. Swarm and Evolutionary Computation. 2025. Vol. 92. P. 101806. URL: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101806>.
18. DETERMINING THE OPTIMAL SERVICE AREA OF A LOGISTICS CENTER: A QUANTITATIVE APPROACH / I. TARAN et al. Transport Problems. 2025. Vol. 20, no. 3. P. 5–18. URL: <https://doi.org/10.20858/tp.2025.20.3.01>.
19. Scheduled service network design with resource management for two-tier multimodal city logistics / P. Fontaine et al. European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 558–570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.02.009>.

ВПЛИВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗУПИНОК ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА РІВЕНЬ КОМФОРТНОСТІ РУХУ В ОБМЕЖЕНИХ МІСЬКИХ УМОВАХ**Птиця Г. Г.¹, Ярута А. М.², Шевченко В.В.³, Мерзляков В.В.¹**¹*Харківський національний автомобільно-дорожній університет,*²*Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова*³*Департамент будівництва та шляхового господарства Харківської міської ради*gennadij.ptitsa@gmail.com

Зручність використання й доступність в економічному плані для населення такого автотранспортного засобу як легковий автомобіль стали причинами перенасичення транспортними потоками вулично-дорожньої мережі міст. В наслідок цього в багатьох містах швидкості руху знижуються, на окремих ділянках спостерігаються заторові й передзаторові ситуації, частішають випадки дорожньо-транспортних пригод, погіршується екологічний стан міста тощо. Ускладнює ситуацію неспроможність прогнозування з необхідною точністю поведінки всіх учасників руху. Адже кожен водій самостійно вибирає маршрут пересувань відповідно до власного ліміту часу на поїздки.

Останнім часом в багатьох містах різних країн все більше набирає обертів тренд відмовляння міського простору від автомобіля та їх заборона у основних районах міста та/або їх обмеження іншими способами [1]. Такі міста часто розглядаються як провідні приклади сталого міського розвитку, оскільки міста в усьому світі прагнуть задовольнити стандарти стабільності міста шляхом вдосконалення громадського транспорту, заохочення немоторизованих режимів, створення пішохідних зон, обмеження використання приватних автомобілів та інше, намагаючись змінити трансформацію міст, спричинену домінуванням автомобілів.

Міський пасажирський транспорт є одним із головних факторів, що створюють ефективне та безпечне функціонування міста, що забезпечують соціальну взаємодію суспільства, тим самим поєднуючи різні частини міста, створюючи єдину систему сполучень. Основними проблемами, пов'язаними з громадським транспортом залишається достатньо висока небезпека руху міськими вулицями в загальному потоці та маневрування на певних типах зупинок. Це призводить до невиправданих людських і матеріальних втрат. В момент коли громадський транспорт зупиняється в зоні зупинки для посадки та висадки пасажирів, за наявності або відсутності заїзної кишені, швидкість руху транспортних засобів по тій самій та іншій (за наявності) смузі значно знижується. У деяких випадках учасникам дорожнього руху, які прямують за громадським транспортом, доводиться вдаватися до екстреного гальмування. У такій ситуації може виникнути потреба обгону, який є одним із небезпечних маневрів, що виконуються водієм [2].

Продумане та обґрунтоване планування «вузького» місця повинно приводити до підвищення ефективності дорожнього руху та, зокрема, до зниження затримок і підвищення безпеки та середніх швидкостей руху. А отже і вирішення питання застосування раціональних підходів організації руху транспорту та пішоходів в місцях розташування зупинок громадського транспорту може забезпечити підвищення загальної ефективності функціонування транспортної системи міста. Це може привести до скорочення числа і ступеня небезпеки конфліктних ситуацій, до зниження і вирівнювання рівня завантаження ділянки вулиці, до оптимізації режиму руху транспортних засобів і пішоходів [3].

Оцінка ефективності дорожнього руху повинна надати можливість встановлення меж допустимих умов функціонування об'єкту дослідження та можливість пропонувати реалізацію необхідних заходів щодо удосконалення, за необхідності, організації дорожнього руху на ділянках ВДМ міста. Одним з показників, що використовується на практиці є рівень комфортності руху, який визначається на основі значень коефіцієнту завантаження дороги рухом [4] або коефіцієнту обслуговування (*LOS*), який широко використовується в світовій практиці.

На основі отриманих значень часу, що витрачається на обслуговування транспортних засобів громадського транспорту на зупинці та відповідних значень інтенсивності руху встановлено зміни коефіцієнту обслуговування. При цьому відповідний розрахунок коефіцієнту рівня обслуговування запропоновано здійснити за залежністю

$$LOS = \frac{t_i}{t_{\max}}, \quad (1)$$

де t_i – час, що витрачається на обслуговування відповідної інтенсивності транспортних засобів в місці розташування зупинок громадського транспорту (включає інтенсивність автобусів та загальний транспортний потік), с;

$t_{\max}$ – загальний час періоду оцінювання (прийнято 1 година), с.

Таке співвідношення має аналогічний підхід до відношення інтенсивності до пропускної здатності, однак спроможне врахувати додаткові витрати часу на перегоні, що пов'язані з обслуговуванням транспортних засобів на зупинках громадського транспорту, які реалізовані без додаткового облаштування заїзними кишенями. Тобто, даний підхід враховує умови руху на обраному об'єкті: перегін вулиці з однією смугою руху в кожному напрямку, що додатково має облаштовану на проїзній частині зупинку громадського транспорту.

Розрахунок проведено з урахуванням діапазону зміни досліджуваних випадкових величин часу обслуговування на зупинці. Результати наведено на рис. 1. Наведемо приклад розрахунку для ділянки однієї з розглянутих вулиць в зоні розташування однойменної зупинки:

- інтенсивність транспортного потоку – 340 авт/год;
- інтенсивність автобусів – 10 авт/год;
- час на здійснення операцій на зупинці враховує основні етапи та змінюється в діапазоні (час обслуговування пасажирів від 5 до 60 с, час, що витрачається на відхід із зупиночного пункту від 3 до 12 с);
- час який витрачається на проїзд транспортних засобів перерізу перегону без зупинки, прийнято 3 с, як інтервал часу руху транспортних засобів в потоці з встановленими швидкостями [5].

За таких умов, $LOS = 1100 / 3600 = 0,31$.

На рисунку 1.А відображено зміну рівня обслуговування при зміні часу обслуговування пасажирів на зупинці. На рисунку 1.Б відображено зміну рівня обслуговування при зміні часу, що витрачається на відхід від зупиночного пункту.

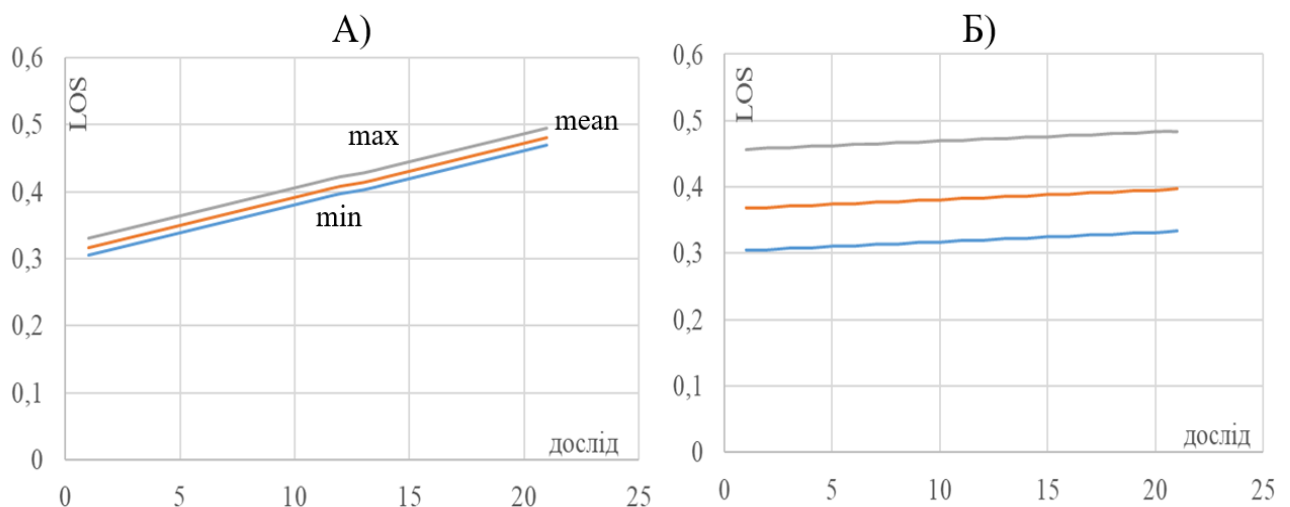


Рисунок 1 – Рівень обслуговування (LOS) відповідно до існуючих умов функціонування досліджуваних ділянок ВДМ

З даних графіків видно, що рівень обслуговування ділянки вулиці задовільний (не перевищує значення 0,5 – рівень «В») при будь яких умовах зайнятості зупинок, які реально склалися на обраних об'єктах дослідження.

Для розробки рекомендацій та встановлення критичних умов функціонування типової ділянки проведено моделювання параметру рівня обслуговування при збільшенні інтенсивності як загального транспортного потоку, так і інтенсивності транспортних засобів громадського транспорту. В результаті (рис. 2) встановлено апроксимуючу функцію значення коефіцієнта обслуговування від зміни інтенсивності руху транспорту.

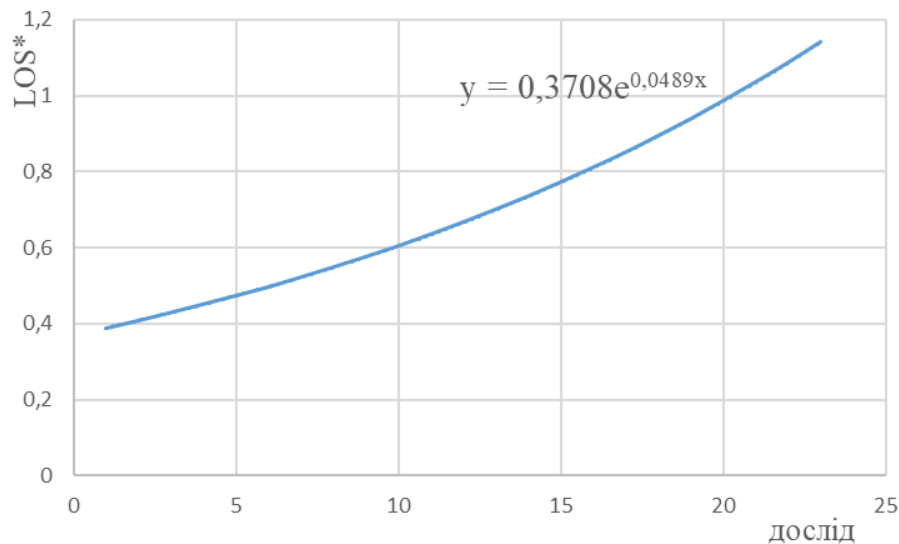


Рисунок 2 – Зміна значення коефіцієнта обслуговування від зміни інтенсивності руху транспорту на ділянці ВДМ

Отримані розрахункові значення дозволяють визначати критичні зони стану потоку на типових ділянках, у яких рух буде мати задовільні або незадовільні характеристики. Також це дозволяє сформулювати рекомендацію щодо критичних інтенсивностей руху при яких стан потоку буде стрімко наблизитись до заторового: при інтенсивності автобусів в потоці більше 12 од. та загальній інтенсивності більше 500 авт/год рівень комфортності досягне рівня «Г-а».

Література

1. Streetfight: Handbook for an Urban Revolution, by Janette Sadik-Khan & Seth Solomonow, Penquin Books, 2017, 368 pages.
2. Аудит безпеки дорожнього руху: підручник / Л.С. Абрамова, І.С. Наглюк, В.В. Ширін, С.В. Капінус, Г.Г. Птиця; під заг. ред. І.С. Наглюка. – Х.: ХНАДУ, 2016. – 260 с.
3. Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. <https://doi.org/10.17226/26432>.
4. Практикум з проведення аудиту безпеки дорожнього руху / Л.С. Абрамова, І.С. Наглюк, В.В. Ширін, Г.Г. Птиця, С.В. Капінус, О.С. Левченко, Т.В. Харченко. Навч. посібник. – Х.: ХНАДУ, 2019. – 140 с.
5. The Three (3) Second Rule - Following Distance. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dmv.ri.gov/node/1321>

IMPROVING TRANSPORT SERVICE QUALITY IN ROAD LOGISTICS
Ptytsia Nataliia (Птиця Н. В.)¹, Ptytsia Valeriia (Птиця В. Г.)^{1,2}, Babkova valeriia (Бабкова В. О.)¹

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University*

²*Taras Shevchenko National University of Kyiv*

nataliya.ptitsa@gmail.com

In recent years, the concepts for the development of Ukraine's transport sector and related strategic documents [1–2] have placed significant emphasis on improving the quality of transport services. However, this issue is often addressed selectively – when one factor influences only a particular quality characteristic, while the notions of «transport service» and «transportation service provision» are frequently equated. Due to the complexity and multidimensional nature of the concept of «transport service provision», especially in the freight transport segment, measures aimed at improving service quality do not always yield the expected results. The primary reason lies in the insufficient methodological and theoretical foundation.

Freight transportation services must be provided in accordance with agreements with clients and official transport documentation. In a competitive market, road transport companies that offer a broader service range at reasonable prices while maintaining high quality gain a strategic advantage. This requires modernizing approaches to managing transport operations, including the application of advanced delivery technologies, planning methods, and logistics modelling tools. Developing effective solutions for freight transport planning remains essential, as it directly influences service quality and customer satisfaction. Although both «freight transportation» and «transport service» involve cargo delivery, these concepts differ. Freight transportation focuses on the carrier's obligation to ensure timely and safe cargo delivery, regardless of who owns the vehicle. By contrast, a transport service provider is responsible for organizing the delivery process in full compliance with safety requirements, with responsibilities clearly outlined in the contract. At the same time, carriers may be released from liability for cargo damage under unforeseen circumstances.

Transport services encompass a broader range of activities, including pre-transport operations and follow-up services after delivery [2, 3]. Accordingly, contracts for freight transportation and for the provision of transport services have different legal frameworks. In the former case, the obligation is to deliver freight in proper condition, while in the latter to organize the logistics process with the possibility of specifying the freight forwarder's scope of responsibility. This allows customers to better control service quality. Therefore, achieving a high level of transport service quality requires thorough theoretical elaboration of key concepts «transport service provision», «quality of transport service», and «transport service». It is necessary to clearly define their structure, classify them, distinguish them from one another, and justify quality assessment indicators and measurement methods considering cargo specifics. A review of academic sources demonstrates that the concept of «transport service provision» is often equated with «transport service», which is theoretically and methodologically unjustified [3–5].

There is no unified definition of freight transportation service in the national regulatory framework. In scholarly literature, transport service provision is predominantly interpreted as a process rather than merely a result of activity. Summarizing existing approaches, transport service provision can be defined as the result of delivering a transport service that meets the needs of the shipper, consignee, or passenger in accordance with applicable requirements. A service is the result of an activity aimed at satisfying demand without transferring ownership of a material object. Service provision, in turn, is the process of delivering a service; therefore, a service is an integral element of service provision. It is the end result of a transport company's activity in fulfilling contractual obligations [6].

Some authors [4, 5, 7] interpret transport service provision as «transport service» – activity related to the movement of goods or passengers and the provision of auxiliary services. Other researchers emphasize the procedural aspect and consider transport service provision as a set of actions in accordance with established norms and requirements. Given these approaches, preference

should be given to the procedural interpretation. Transport service provision can be characterized as a process within the system of economic relations in the sphere of distribution and circulation of goods, implemented through a set of elements – transport output, transport process, and customer interaction.

Given the complexity of transport service provision and its customer-oriented evaluation, a structured approach is essential to define key service components and quality criteria. This approach covers the transport output, including the physical movement of goods and related operations such as loading, warehousing, labeling, and forwarding; the transport process, which spans preparation, route planning, documentation, and coordination among logistics participants; and customer interaction, which involves service flexibility, communication, and access to information on tariffs, schedules, and delivery status. Road transport plays a crucial role in Ukraine's logistics system, ensuring mobility of material flows and timely delivery to end users. Efficient organization of road freight operations helps balance service quality and logistics costs, strengthening competitiveness. A key managerial task involves selecting suitable vehicles according to cargo specifics, distance, and operational conditions for example, refrigerated trucks for perishables or specialized equipment for oversized goods. When the use of an in-house fleet is economically inefficient, outsourcing becomes a justified solution. Another important element is the consolidation of small shipments to maximize vehicle utilization, reduce trips, and lower costs. Logistics centers support sorting, packing, and labeling cargo according to routes, while proper loading and unloading organization helps minimize vehicle downtime and ensure safety. Continuous monitoring and analysis of transport costs enable timely detection of inefficiencies and cost optimization. In this context, Transport Management Systems (TMS) are effective tools, providing real-time vehicle tracking, automated cost calculation, scheduling, and logistics performance analysis.

Evaluation of the performance of transport services, including the role of road transport, is based on a set of criteria classified into technical-operational, economic, and integrated indicators. These criteria provide a comprehensive assessment of logistics efficiency and make it possible to objectively evaluate service quality from both the carrier's and the customer's perspectives. Proper justification and selection of indicators require clearly defining the boundaries of the research object, as this determines not only the relevance of the applied criteria but also affects the volume, structure, and accuracy of results. For the road transport sector, important service quality parameters include delivery speed, reliability, cargo safety guarantees, and continuity of the logistics chain [11].

The production activities of a road transport enterprise involve various types of resources: material, labor, and financial. Indicators reflecting these expenditures are represented by technical-operational performance measures, which significantly affect the level of transport service. These include production capacity, resource utilization levels, and energy efficiency. Economic criteria include total logistics costs, transportation cost per unit, total revenue, profitability level, and business efficiency. Integrated indicators combine technical and economic aspects for a comprehensive evaluation.

A key direction for improving transport service efficiency is the implementation of optimization approaches to routing [6, 7, 11]. Routing refers to establishing and organizing the most efficient route between the origin and destination points. A well-designed routing system significantly reduces transportation costs, optimizes resource utilization, minimizes empty runs, shortens delivery time, prevents delays, and enhances overall logistics quality. Key factors include shipment volume, geographical structure of routes, transportation duration, road conditions, service sequence at intermediate points, and other technical-organizational specifics.

Route development requires assessing route feasibility, stability of freight flows, adequacy of road infrastructure in terms of safety and load capacity, and availability of infrastructure facilities such as parking areas, turnaround sites, and dedicated service zones [11]. The next stage is the technical and economic justification of introducing a new route or adjusting an existing one. Achieving strong performance in this area ensures timely delivery, enabling customers to reduce inventory volumes and storage costs. This also enhances logistics flexibility and adaptability to demand fluctuations.

Significant attention is paid to the use of modern software solutions that automate routing processes and performance analysis. Such systems include Microsoft AutoRoute, ArcLogistics, and

TruckStops [6, 11]. These tools support data import on customer orders, calculation of optimal routes considering geographical, temporal, and technical constraints, route sheet generation, reporting, and vehicle utilization analysis. Implementing such systems improves delivery transparency, reduces empty runs, increases customer service levels, and enhances fleet management efficiency. Both exact and heuristic methods are applied in routing. Exact methods ensure a global optimum, while heuristic approaches provide near-optimal solutions within shorter timeframes under constraints. These methods rely on specialized algorithms for solving logistics problems. Local optimization techniques involve incremental improvement of route options based on predefined transformation rules. Geographic Information Systems (GIS) play an important role by enabling spatial data visualization, infrastructure constraint analysis, and alternative delivery route development.

The ultimate goal of route planning is to minimize vehicle mileage. However, mileage reduction does not always guarantee minimum total time. In urban environments, delays due to road congestion, time restrictions for freight traffic, breakdowns, and administrative barriers must be considered. The choice of routing method depends on various factors: one approach relies on geographic data and actual transport routes, while another involves analyzing road networks to identify the shortest paths between specified points. Such approaches significantly improve transport service efficiency, ensure stability and predictability of logistics operations, and enhance the competitiveness of transport enterprises.

References

1. Стратегічні напрями відновлення та розвитку транспортної інфраструктури України. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2322/2242>.
2. Рудяк Ю., Піроженко О., Маханько О. (2007). Усе про облік та організацію транспортно-експедиторської діяльності. Харків : Фактор, 416 с.
3. Лучникова Т.П., Тарновська І.В., Воробйов Є.В. (2023). Адаптація транспортних підприємств України до умов воєнного стану. Бізнес Інформ, Вип. 1. С. 116–122.
4. Ширяєва С.В., Дяченко І.О. (2023). Дослідження проблем транспортно-експедиторської діяльності в сучасних умовах. Вісник Національно-го транспортного університету. Серія «Технічні науки». К.: НТУ. Вип. 1 (55). С. 318–322.
5. Войтович О.А., Ткач В.О., Сусорова О.А. (2021). Дослідження показників якості транспортно-го обслуговування вантажоперевезень. Вісник ХНТУ. Інженерні науки. 1. №3 (78). С. 20–26.
6. Григорак М. Ю. (2017). Інтелектуалізація рин-ку логістичних послуг: концепція, методологія, компетентність : монографія. К. : Сік Груп Україна. 513 с.
7. Гурч Л. М. (2008). Логістика : Навчальний посібник. К.: ДП «Видавничий дім «Персонал». 560 с.
8. Зовнішня торгівля України товарами за 2024 рік. URL: https://stat.gov.ua/uk/publications/zovnishnya-torhivlya-ukrayiny-tovaramy-za-2024-rik-ekspres-vypusk?utm_source=chatgpt.com.
9. Зовнішня торгівля України у 2024 році: підсумки, виклики та перспективи. URL: https://events.org.ua/zovnishnya-torgivlya-ukrayiny-u-2024-roczy-pidsumky-vyklyky-ta-perspektyvy/?utm_source=chatgpt.com.
10. Про схвалення Стратегії розвитку та розбудови прикордонної інфраструктури з країнами Європейського Союзу та Республікою Молдова до 2030 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024-2030 роках. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1337-2024-%D1%80?utm_source=chatgpt.com#Text.
11. Босняк М.Г. (2010). Вантажні автомобільні перевезення : навчальний посібник для студентів спеціальності 7.100403 «Організація перевезень і управління на транспорті (автомобільний)». Київ: Видавничий Дім «Слово». 408 с.

СТАЛИЙ РОЗВИТОК СИСТЕМИ ДОСТАВКИ «ОСТАННЬОЇ МИЛІ» В УМОВАХ ВЕЛИКОГО МІСТА НА ПРИКЛАДІ САЛТІВСЬКОГО РАЙОНУ М. ХАРКІВ

Резник А. В., Ребрищева В. І.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
nastareznik25@gmail.com, rebrisevaviktoriyaa@gmail.com

Розвиток електронної комерції зумовив суттєве зростання обсягів доставки товарів у великих містах України. Найбільш проблемним етапом логістичного ланцюга є «остання миля» – переміщення від логістичного вузла до кінцевого споживача, адже саме на цьому етапі формуються затримки, затори у житлових кварталах та додаткові транспортні викиди. Для густонаселених районів, зокрема Салтівського району м. Харків, проблема організації ефективної та сталої доставки набуває особливої актуальності.

Практика країн Європейського Союзу демонструє інтеграцію питань міської логістики до Планів сталої міської мобільності (SUMP). Наприклад, у місті Сен-Жермен-ан-Ле (Франція) запроваджено поглиблену діагностику для оцінювання впливу містобудівної документації на вантажні перевезення, використання логістичних зон та кількісного аналізу транспортних потоків [1]. У межах цього підходу здійснюється перевірка сумісності містобудівної документації з вимогами мобільності товарів, а також розглядається можливість включення логістичних просторів до місцевих планів містобудування (PLU). Крім того, передбачається резервування земельних ділянок для об'єктів міської логістики та застосування «логістичного коефіцієнта» при розробленні нових проєктів економічної або комерційної діяльності (наприклад, у Барселоні мінімум 25 м² логістичної площі на кожні 500 м² забудови) [1].

У м. Зальцбург (Австрія) запроваджено підтримку розвитку концепцій управління мобільністю на підприємствах, у муніципалітетах та туристичних установах, а також на інтенсифікацію інформаційних та маркетингових кампаній з громадського транспорту [1]. Наприклад, ця провінція з 1 травня 2025 року запровадить безкоштовний регіональний громадський транспорт для туристів завдяки новому «Квитку мобільності гостей». Ця ініціатива спрямована на зменшення заторів, сприяння сталому туризму та покращення послуг громадського транспорту як для відвідувачів, так і для мешканців [2].

У Німеччині, зокрема в місті Берлін, у 2018 – 2019 роках було розроблено положення, що регулюють діяльність комерційного транспорту [3]. Ця робота здійснювалась у межах реалізації Закону про мобільність Берліна. Одним із напрямів стало опрацювання можливості запровадження системи концесій для комерційного транспорту, яка передбачає видачу спеціальних дозволів на здійснення вантажних перевезень у межах міста. Реалізацію цього завдання планувалося розпочати з 2020 року.

У столиці Польщі м. Варшава запроваджено зонні або лінійні обмеження за тоннажем або заборони на рух для вантажних транспортних засобів, особливо в центральних районах та в години пік, з метою підвищення безпеки, зниження шуму та забруднень [3]. Також відзначається поява логістичних центрів на околицях міст та поблизу транспортних вузлів. Проте, План сталої міської мобільності Варшавської агломерації (SUMP MW) також вказує на відсутність єдиної політики щодо вантажної логістики та брак місць, призначених для доставок, що призводить до проблем із рухом та паркуванням. План SUMP MW передбачає подальші дії, такі як розробка принципів обмежень за тоннажем, визначення спеціалізованих місць для доставок, сприяння регулюванню вантажного транспорту за допомогою законодавства, співпрацю з приватним сектором для доставки «останньої милі», та визначення перевантажувальних зон. Крім того, планується встановлення пре селекційних ваг для вантажних транспортних засобів на в'їздах до міст MW для захисту дорожнього покриття. Серед оперативних цілей SUMP MW є «Екологічна логістика товарів», що має забезпечити ефективний, функціональний та безпечний транспорт товарів, який також є нульовим або низьковуглецевим і не має негативного впливу на навколишнє середовище, антропогенний простір або дорожній рух.

Порівняльний аналіз свідчить, що в Україні відповідні підходи лише починають формуватися. Окремі оператори вже впроваджують сталі рішення: «Нова Пошта» розширює мережу поштоматів і тестує електромобілі для кур'єрських маршрутів, Meest підтримує модель партнерських пунктів видачі, «Укрпошта» модернізує логістичні вузли та оптимізує адресні доставки поміж відділеннями.

З огляду на результати опитування, проведеного здобувачами 4 курсу факультету транспортних систем Харківського національного автомобільно-дорожнього університету в період з 06.06.2025 по 27.06.2025, під час якого було отримано 56 відповідей від клієнтів служби доставки «Нова Пошта» з різних регіонів України, вдалося визначити основні проблеми, що турбують споживачів: висока вартість доставки (59,6 %), пошкодження відправлень (46,8 %), затримки доставки (38,3 %). Водночас 64,5 % респондентів зазначили, що готові частіше користуватися поштоматами, що свідчить про зростання попиту на автоматизовані та зручні формати отримання відправлень.

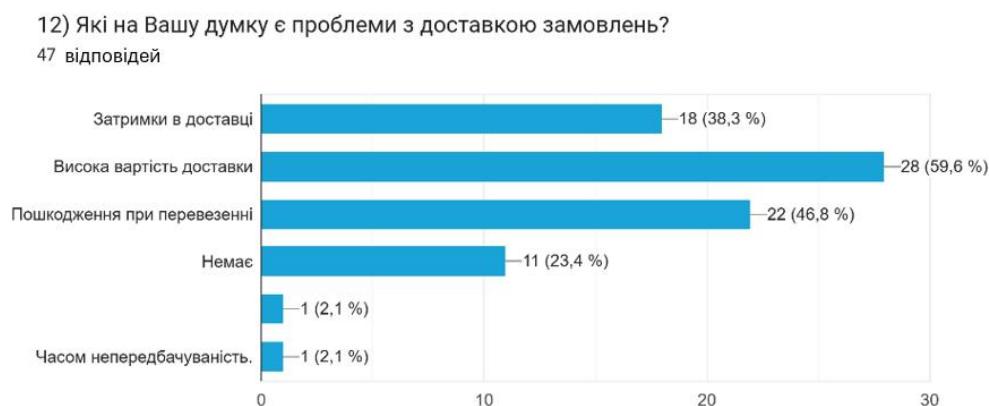


Рисунок 1 - Діаграма відповідей користувачів, щодо проблем які стосуються доставки замовлень (досліджено здобувачами ХНАДУ)

Отримані результати свідчать про доцільність скорочення частки адресної доставки та розвитку мережі автоматизованих пунктів видачі, що узгоджується з підходами сталої міської логістики у країнах Європи.

Результати стали основою для пропозицій із розвитку сталої міської логістики і дали змогу обґрунтувати необхідність впровадження екологічного транспорту та мікро-хабів для скорочення часу й витрат доставки для побудованої теоретичної побудованої моделі розташування мікро-хабів на прикладі Салтівського району у місті Харків. Район було обрано з огляду на те, де проблеми вантажних перевезень є актуальними.

Для зменшення транспортного навантаження в Салтівському районі доцільно застосовувати системи оптимізації маршрутів, зокрема ANT-Logistics [4]. Вона автоматично формує маршрути з урахуванням щільності забудови, доступності дворів та часових інтервалів доставки. Це дозволяє перейти від адресної доставки до кластерної, коли кур'єр обслуговує групу адрес у межах мікрорайону, а не розрізнені точки.

На (Рис. 2) зображено моделювання маршрутів для Салтівського району і було встановлено, що використання кластерної схеми та розміщення мікро-логістичних хабів поблизу громадського транспорту дозволяє:

- скоротити середню довжину кур'єрського маршруту на 14 – 18 %;
- зменшити кількість заїздів у дворові простори на 22 – 27 %;
- виконувати 35 – 40 % коротких доставок за допомогою вантажних велосипедів (до 2 – 3 км).

Це знижує рівень заторів, шумового навантаження та викидів, а також підвищує швидкість обробки замовлень.

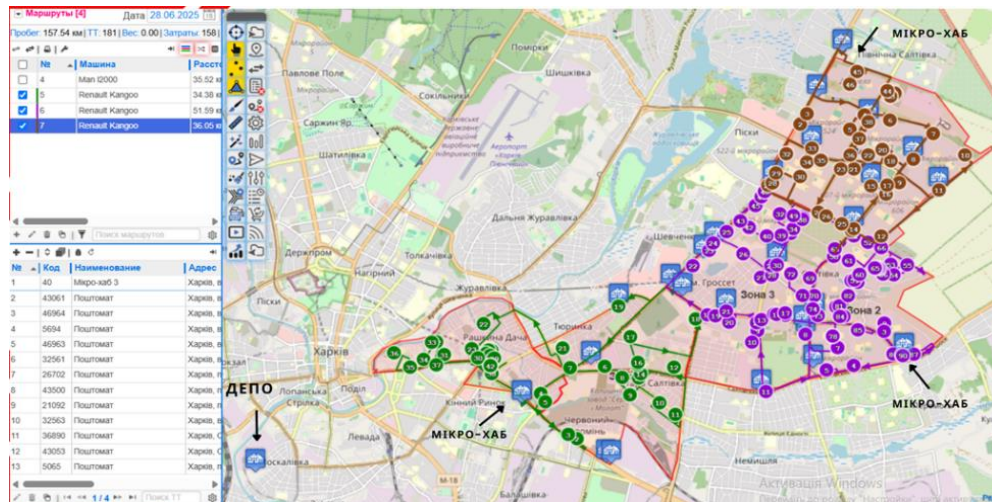


Рисунок 2.- Діаграма оптимальної моделі розташування мікро хабів на межах району (змодельовано здобувачами ХНАДУ)

Попри позитивні передумови, існують системні бар'єри, що стримують впровадження таких рішень:

1. Відсутність інтеграції міської логістики у плани мобільності міст. У більшості міст логістика розглядається окремо від транспортної політики;
2. Нестача просторів для розміщення поштоматів та мікро-хабів у житлових кварталах через щільну забудову та відсутність регуляторних норм у ДБН;
3. Недостатня інфраструктура для електротранспорту (відсутність станцій підзарядки, шляхів для логістичних маршрутів);
4. Домінування автомобільної адресної доставки, що пов'язано зі звичками користувачів та поточними бізнес-моделлями кур'єрських служб.

З урахуванням наведеного досвіду та результатів аналізу рекомендовано:

1. Створити мікро-логістичні хаби поруч із станціями метро, транспортними вузлами та торговими центрами;
2. Розширити мережу поштоматів у житлових кварталах та підвищити їх доступність у пішохідному радіусі;
3. Запровадити доставку вантажними електро велосипедами для внутрішньорайонних маршрутів замість автомобілів;
4. Включити міську логістику до планів сталої мобільності, передбачивши просторові норми для логістичних зон;
5. Стимулювати партнерські пункти видачі у малому бізнесі за моделлю Meest, що знижує потребу у новому будівництві.

Як висновок можна сказати, що впровадження сталої моделі доставки «останньої милі» у Салтівському районі м. Харків є доцільним та обґрунтованим. Ключовими компонентами ефективної системи є кластеризація маршрутів, розширення мережі поштоматів, створення мікро-хабів та використання електротранспорту. Такі рішення дозволяють зменшити транспортне навантаження, скоротити витрати логістичних операторів та підвищити зручність для мешканців, що повністю відповідає європейським принципам міської мобільності.

Література

1. База даних міст ЄС щодо PCMM. URL: <https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu>. (дата звернення: 10.11.2025)
2. Зальцбург запроваджує безкоштовний громадський транспорт для туристів. URL: <https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu>. (дата звернення: 10.11.2025)
3. Орда О.О., Резник А.В., Ребрищева В.І. Про транспорт. *Європейський досвід у розвитку сталої міської логістичного розвитку* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Варшава, 30 вересня. 2025 р. Харків, 2025. С. 109–111.
4. Ознайомчий навчальний курс TMS ANT-Logistics. URL: <https://antlogistics.kwiga.com/courses/oznaiomchii-kurs>. (дата звернення: 10.11.2025)

ANALYSIS OF SYNTHETIC MODELS FOR FORMING MATRICES OF PASSENGER CORRESPONDENCE

Xiaoxuan Qin, Orhina Anastasiia

Kharkiv National Automobile and Highway University

xiaoxuan@ukr.net

Two fundamentally different approaches to forming matrices of passenger correspondences (MPC) are generally recognized [1]:

- field observations of public transport operations and/or population mobility surveys;
- creation of MPCs using various models (statistical, synthetic, probabilistic).

The advantages and disadvantages of the first approach are described in detail in [1]. Meanwhile, among the models of the second approach, the most widespread group consists of synthetic (theoretical, a priori) models, which will be discussed in this paper.

Using models of this group requires significantly fewer resources to create MPCs, but they do not guarantee sufficiently accurate modeling results. The most common among these models are gravity models, entropy models, and the intervening opportunities method. However, it should be understood that these models apply only to the stage of correspondence distribution between transport zones (TZ) [2].

One of the first synthetic models applied to determine and estimate inter-district correspondences was the gravity model [3, 4]. This model is based on a simple principle: the correspondence between district i and district j is proportional to the total number of trips originating from district i , the total number of trips arriving at district j , and a certain function of individual travel costs, which typically depend on the distance between these districts. The distance between TZ reflects the accessibility level of the transport system, considering speed and comfort of travel provided by the transport network. The method of determining this parameter (travel impedance) may vary depending on the specific model variant.

By analogy with Newton's law, the gravity model for calculating passenger correspondence can be represented as:

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j}{c_{ij}^2}, \quad (1)$$

or

$$h_{ij} = D_i \frac{A_j \cdot c_{ij} \cdot \omega_j}{\sum_m^n A_m \cdot c_{im} \cdot \omega_m}, \quad (2)$$

where ω – calibration coefficient; D_i – capacity of origin TZ i , passengers; A_j – capacity of destination TZ j , passengers; c_{ij} – function of individual passenger travel costs (impedance between TZs); n – number of TZs in the modeled system.

It should be understood that gravity models require a calibration procedure to ensure the balance condition between calculated and input TZ capacities:

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad \sum_{i=1}^n h_{ij} = A_j, \quad \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j, \quad h_{ij} > 0. \quad (3)$$

Calibration continues until conditions (3) are satisfied. This procedure leads to significant changes in the initial correspondence estimates obtained by equation (2), indicating low reliability and accuracy of the MPC results derived from this model. The difference between calculated and observed (real) correspondence values can be quite substantial [5].

Other variations of the gravity model relationship for calculating passenger correspondences are also common [6]:

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i^\alpha \cdot A_j^\beta}{c_{ij}^\gamma}, \quad (4)$$

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j \cdot f(c_{ij})}{\sum_m A_m \cdot f(c_{im})}, \quad (5)$$

where α, β, γ – empirical constants.

The author of [7] proposed a simultaneous computation and calibration procedure for correspondences using the gravity model based on actual movement data between TZs. The objective function of this optimization problem is

$$F(h_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h'_{ij} - h_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

where $F(h_{ij})$ – deviation function from potential correspondences; h'_{ij} – potential correspondences between TZs without considering ω ; h_{ij} – actual correspondences between TZs.

According to [7], the main advantage of this approach compared to those using correction factors is that it provides a closer analogy to the physical law of gravitational attraction. To solve problem (6), the author employed Lagrange multipliers to find a relative extremum of the function.

Unlike “classical” gravity models, the approach in [7] allows computing passenger correspondences while satisfying constraints (3). However, as with most gravity model modifications, it considers only one transport factor – the distance between TZs [6].

Modifications of the gravity model mainly revolve around changes in the form of the impedance (gravity) function. The formulation of this function is based on data on preferences in choosing origin–destination pairs or by comparing calculated and observed passenger correspondences. The possible forms of the impedance function are diverse: exponential, power, hyperbolic, combined, based on probability distributions, or derived from population settlement data [6].

The most common forms of impedance functions used in gravity-based MPC modeling [1] include:

- classical function – inversely proportional to distance between TZs:

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}, \quad (7)$$

where n – parameter defining impedance sensitivity (in the «classical» model $n=1$, in Yakshin’s model $n=2$; in some studies n varies depending on c_{ij} , improving accuracy);

- exponential function

$$f(c_{ij}) = e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (8)$$

where β – empirical coefficient;

- combined function

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (9)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{(1 + c_{ij})^{\varphi(c_{ij})}}, \quad (10)$$

subject to

$$\varphi(c_{ij}) = \frac{E}{1 + e^{(F - G \cdot c_{ij})}}, \quad (11)$$

where E, F, G – calibration coefficients;

- functions based on probability distributions (where a transportation factor serves as the distribution argument)

$$d_F = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}}, \quad (12)$$

$$d_{ij} = \frac{4 \cdot t^2}{\alpha^3 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{\alpha^2}}, \quad (13)$$

given known average, minimum, and maximum travel distances, according to [8], the impedance

function can be expressed using the Simpson probability density distribution:

$$f(l) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (l - l_{\min})}{(l_{\max} - l_{\min})(l_0 - l_{\min})}, & \text{при } l_{\min} \leq l \leq l_0, \\ \frac{2 \cdot (l_{\max} - l)}{(l_{\max} - l_{\min})(l_{\max} - l_0)}, & \text{при } l_0 \leq l \leq l_{\max}, \\ 0, & \text{у всіх інших випадках,} \end{cases} \quad (14)$$

where σ – distribution parameter, $\sigma = T_{\max}/3$; t – travel time between TZs; α – Maxwell distribution parameter; $l_{\max}, l_{\min}$ – maximum and minimum random variable values; l_0 – mode of the random variable.

The common drawback of these impedance functions is that they use only one factor – travel time or distance – to characterize impedance. Moreover, studies [6, 9] confirm that transport factors have only a limited influence on travel demand formation.

Another gravity model modification was proposed in [10], where an EVA combined impedance function was applied. However, the correspondence distribution is still based on one parameter – travel time – and accuracy is verified by the functional:

$$\sum_{i=1}^n |E_i| = \sum_{i=1}^n |F_i - F'_i| \rightarrow \min, \quad (15)$$

where F_i, F'_i – empirical and calculated passenger flows.

Analysis of gravity model modifications leads to the conclusion that the main drawbacks of this class of synthetic models are: the need for calibration to satisfy the balance condition (5), which affects model reliability; dependence of accuracy on the form of the impedance function, whose parameters require field observations; consideration of only transport factors (time or distance), which inadequately reflect real travel demand formation; questionable correctness of applying the “gravitational law” to human travel behavior modeling.

Among synthetic models, entropy-based models have also gained wide use. They are based on an analogy between transport system processes and thermodynamic processes [1, 11]. Their main appeal lies in formalizing the hypothesis of equilibrium and random behavior of system elements. The most probable system state corresponds to the maximum entropy condition [1]:

$$\max E = \max \left(- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln(h_{ij}) \right), \quad (16)$$

where E – system entropy; n – number of TZs.

In practice, the randomness hypothesis is replaced by the assumption of a priori data on passenger preferences when choosing TZ pairs, transforming the relationship into:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln\left(\frac{S_{ij}}{h_{ij}}\right) \rightarrow \max, \quad (17)$$

where S_{ij} – “ideal” correspondences reflecting passenger preferences.

Constraints similar to (3) are considered:

$$\begin{cases} h_{ij} \geq 0; \\ \sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^m h_{ij} = A_j, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot h_{ij} = B_{\text{заг}}, \end{cases} \quad (18)$$

where $B_{\text{заг}}$ – total transport costs of travel.

The main advantages of entropy models are low computational complexity (simple software implementation) and clear optimization criteria. Key drawbacks include: applicability only to closed transport systems (no new or removed network links); assumption of constant transport costs; consideration of only one transport factor despite the multifactorial nature of demand; questionable analogy between thermodynamic and transport processes [6, 11].

Another representative of synthetic models is the intervening opportunities method [12]. Its essence lies in assuming that each public transport user satisfies their travel needs as they move away from the origin – thus, the longer the trip, the more opportunities arise. When calculating correspondences, the probabilities of trip termination at alternative destinations along the route are considered. The mathematical formulation is:

$$h_{ij}^y = D_i \frac{(e^{-p \cdot n_{y-1}} \cdot e^{-p \cdot n_y})}{(1 - e^{-p \cdot n_A})}, \quad (19)$$

where h_{ij}^y – correspondence volume between TZ i and j with y alternative destinations; p – probability of satisfying the travel need at one destination; n_{y-1}, n_y – cumulative number of alternative destinations up to y ; A – total number of alternatives.

The method's disadvantages are its assumption of uniform distribution of alternative destinations within the study area and the use of only one transport factor – trip distance [12].

Within the synthetic model group, Sheleikhovsky's model [6] also stands out, based on observed regularities in population distribution across urban areas:

$$F_{j(t_1, t_2)} = A_j \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T_{\max}} \ln \frac{T_{\max}}{t_n} dt, \quad (20)$$

where $F_{j(t_1, t_2)}$ – passenger flow from a zone between isochrones t_1 and t_2 , to zone j .

Thus, all synthetic models for MPC estimation share a common drawback: they inadequately account for the factors influencing travel impedance, usually considering only distance or travel time. Moreover, they rely on a limited set of indicators often chosen subjectively, which fails to reflect the probabilistic and multifactorial nature of commuting relationships. Consequently, the obtained data may significantly deviate from reality, while the acceptable forecasting error for transport demand should not exceed 20–25% [6, 13].

References

1. Цинь, С., Любий, Є. (2025). Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 11(42), Частина 2, 394-409. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409).
2. Білоус А.Б., Демчук І.А. Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(3(69) (2014). С. 53–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>.
3. Carrothers G.A.P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*. 1956. № 22. P. 94–102.
4. Vries J.J., Nijkamp P., Rietveld P. Alonso's General Theory of Movement: Advances in Spatial Interaction Modeling. Free University of Amsterdam, Department of Spatial Economics, Tinbergen Institute Discussion Paper. 2000. TI 2000-062/3.
5. Transport Planning and Traffic Engineering / [M.G.H. Bell, P.W. Bonsall, G.R. Leake, A.D. May, C.A. Nash, C.A. O'Flaherty] ; C.A. O'Flaherty Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 544 p.
6. Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Інтервальне моделювання потреб населення міст у перевезеннях громадським транспортом на основі функції розселення : монографія. Харків: ХНАДУ, 2016. 148 с.
7. Вдовиченко В.О. Ефективність функціонування міської пасажирської транспортної системи : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.01. Київ, 2004. 19 с.
8. Кузькін О.Ф. Моделювання пасажирських кореспонденцій у системах міського маршрутного транспорту загального користування. *Вісник ВПІ*. 2009. 5. С. 79–82.

9. Горбачов П.Ф. Оцінка впливу транспортних факторів на результати вибору людиною робочого місця. *Вісник ХНАДУ*. 2008. 43. С. 86–91.
10. Lohse, D., Teichert, H., Dugge, B., Bachner, G. Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, H. 5/1997, Fakultät Verkehrswissenschaften, "Friedrich List", Technische Universität Dresden, 1997. Available: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/tvp/Downloads/Heft-5.pdf/
11. Wilson A.G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion, 1970. 166 p.
- Ortuzar J. de D., Willumsen L.G. Modelling transport. Third edition. John Wiley & Sons Ltd., 2006. 499 p.
12. Quarmby D.A. Choice of Travel Mode for the Journey to Work. *Journal of Transport Economics and Policy*. 1967. 1(3). P. 273–314.

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ В УМОВАХ М. ДНІПРО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ANYLOGIC

Таран І. О., Литвин В. В., Кравець К. В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
lytvyn.v.v@nmu.one

Перехрестя як елементи вулично-транспортної мережі (ВТМ), відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки дорожнього руху. Вони об'єднують автомобільні, пішохідні, велосипедні та інші потоки, забезпечуючи їх взаємодію та безпечне пересування. На жаль, сьогодні перехрестя переважно є слабкою ланкою транспортної мережі міст. В умовах постійного зростання кількості учасників дорожнього руху і недостатньої пропускної здатності ВТМ збільшується ймовірність виникнення дорожньо-транспортних пригод (ДТП), що в свою чергу призводить до значних людських та матеріальних втрат. Одним з ефективних заходів підвищення ефективності організації дорожнього руху (ОДР) є застосування кільцевих перетинів з круговим рухом, які сприяють уповільненню руху транспортних засобів та зменшенню аварійності [1-4].

Департаментом транспорту та транспортної інфраструктури Дніпровської міської ради було прийнято рішення з 14.08.2023 р. [5] запровадити на Т-подібному нерегульованому перехресті вул. Калинова – пр. П. Калнишевського (м. Дніпро) нову схему проїзду з круговим рухом (рис. 1). Дане рішення ґрунтувалося лише на підставі позитивного досвіду реалізації подібних заходів, та не було підтверджено моделюванням.

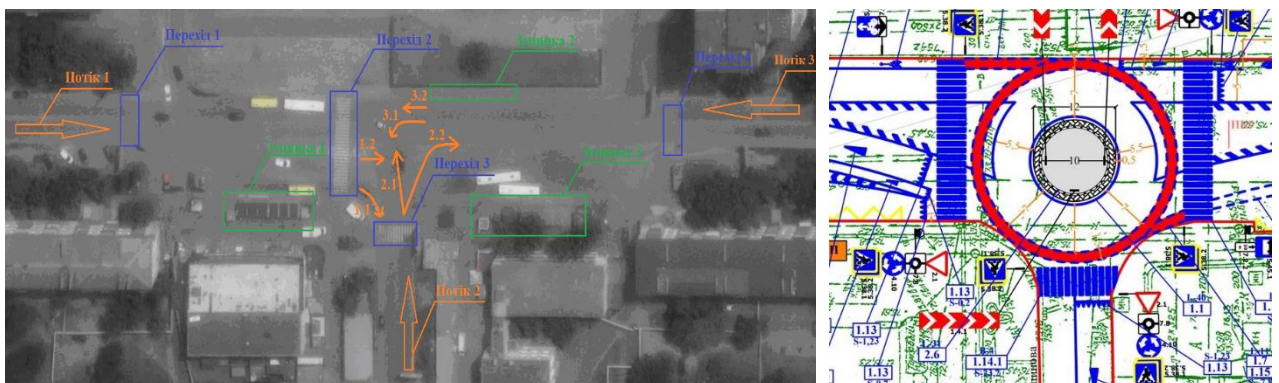


Рисунок 1 – Схема Т-подібного перехрестя вул. Калинова – пр. П. Калнишевського після 14.08.2023

Але при впровадженні будь-яких проектів, які пов'язані з організацією дорожнього руху та спрямовані на підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі, важливо доводити ефективність їх реалізації на ще стадії проектування. Тому метою даного дослідження є кількісна оцінка ефективності зміни схеми руху на перехресті вул. Калинова – пр. П. Калнишевського за допомогою засобів імітаційного моделювання. У якості програмного середовища був обраний пакет імітаційного моделювання AnyLogic (розробник компанія AnyLogic North America), який має вбудовану галузеву *Бібліотеку Дорожнього Руху*. Ця бібліотека є потужним інструментом, який дозволяє детально планувати, проектувати та моделювати транспортні потоки з урахуванням індивідуальної поведінки кожного водія; виконувати оцінку завантаженості та пропускної спроможності доріг; оптимізувати тривалості фаз світлофорів, тощо [6]. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі: визначити інтенсивності транспортних та пішохідних потоків; розробити дві імітаційні моделі перехрестя для обох схем руху; виконати моделювання транспортних потоків на перехресті та визначити їх основні кількісні характеристики.

Т-подібне перехрестя просп. П. Калнишевського – вул. Калинова має по 2 полоси руху в кожному напрямку, чотири пішохідних переходи, на ньому розташовані три зупинки міського громадського транспорту: для автобусних маршрутів №31, №95, №95А, №57А.

Результати натурних спостережень інтенсивностей транспортних потоків, які були виконані для ранкової години «пік» з 8⁰⁰ до 9⁰⁰ наведені у табл. 1. Вони будуть використані у якості вихідних даних для розроблених імітаційних моделей.

Таблиця 1 – Результати натурних спостережень інтенсивностей транспортних потоків

Хвилини	Потік 1	Потік 2	Потік 3
10	26	28	54
20	16	33	32
30	11	37	56
40	20	30	43
50	19	39	36
60	12	19	48
СУМА	104	186	269

Геометричні параметри перехрестя (довжина доріг, кількість та ширина смуг, розташування розділювальних ліній, тощо) були встановлені за допомогою супутникового знімка у сервісі «Google Maps». Для завдання логіки руху транспортних засобів були використані наступні блоки: *Car Source*, *Car Dispose*, *Car Move To*, *Road Network Description*, *Delay* та *Select Output* рис. 2. Якісні та кількісні результати імітаційного моделювання руху транспортних потоків на об'єкті дослідження для обох варіантів ОДР наведені на рис. 3-6.

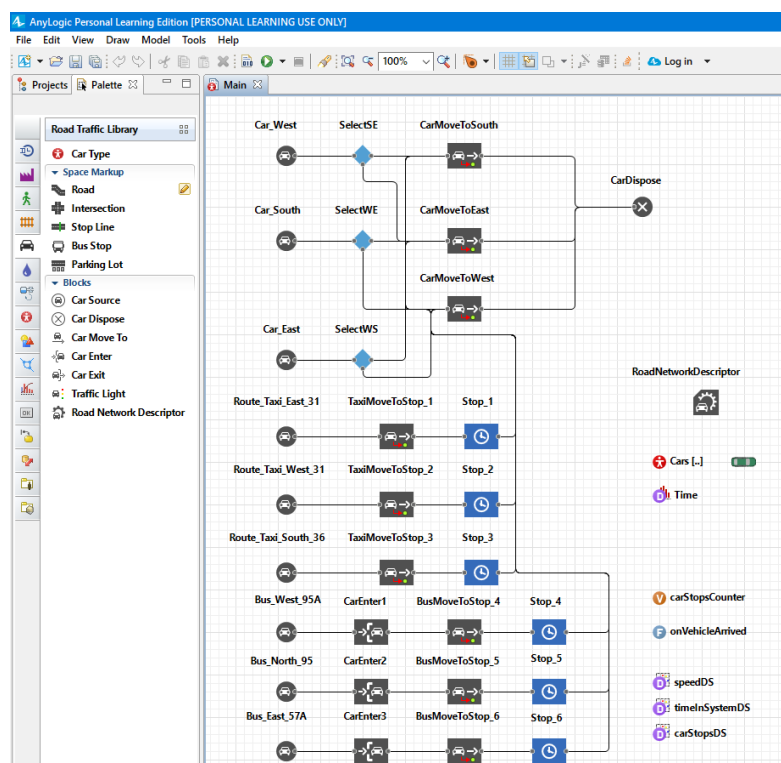


Рисунок 2 – Завдання логіки руху транспортних засобів на перехресті

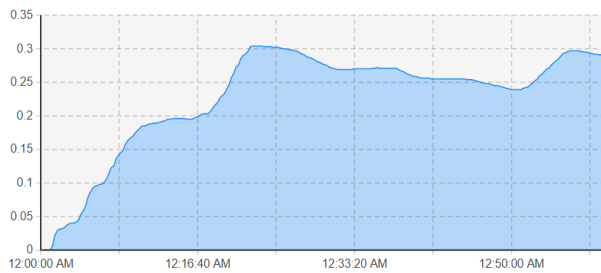


а – Т-подібне нерегульоване перехрестя

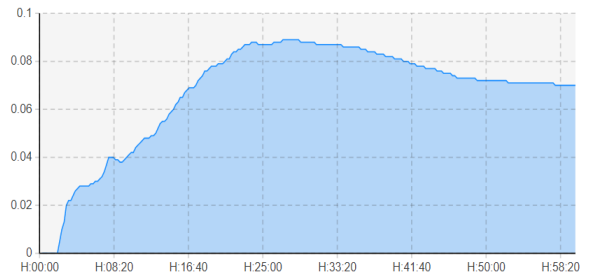


б – кільцевий перетин з круговим рухом

Рисунок 3 – Процес імітації руху транспортних засобів на перехресті

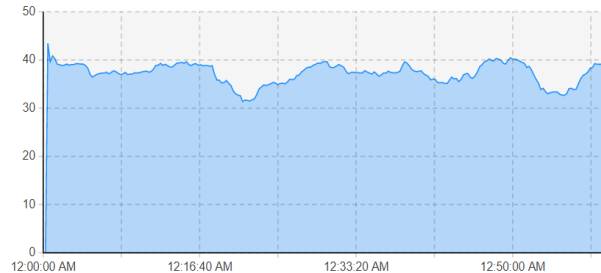


а – Т-подібне нерегульоване перехрестя



б – кільцевий перетин з круговим рухом

Рисунок 4 – Кількість зупинок автомобіля за час проїзду перехрестя, од.

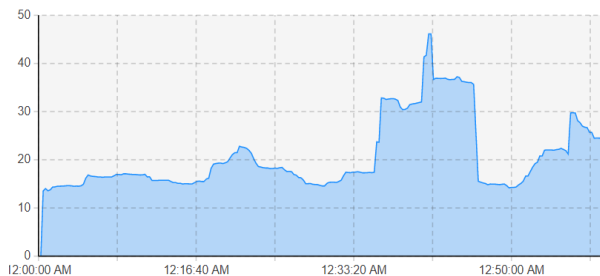


а – Т-подібне нерегульоване перехрестя



б – кільцевий перетин з круговим рухом

Рисунок 5 – Швидкість автомобілів під час проїзду перехрестя, км/год.



а – Т-подібне нерегульоване перехрестя



б – кільцевий перетин з круговим рухом

Рисунок 6 – Тривалість проїзду перехрестя, с

Аналіз результатів моделювання, яка наведені на рис. 3-6 свідчить, що запровадження кільцевого руху дозволяє підвищити ефективність організації дорожнього на перехресті пр. П. Калнишевського – вул. Калинова за всіма показниками, які досліджувалися.

Література

1. Литвин В. В., Таран І.О., Кононенко К.С. Обґрунтування ефективності застосування кільцевого руху на вулично-дорожній мережі м. Дніпро у програмному середовищі PTV VISSIM. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. № 2. С. 95-107.
2. Ляшук О. Л., Сташків М.Я., Цьонь О.П., Рожко Н.Я., Плекан У.М., Гевко Б.Р. Підвищення ефективності функціонування нерегульованого перехрестя з круговим рухом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 8(39). С. 219-229.
3. Бугайов І.С., Холодова О.О., Бугайова М.О. Оцінка ефективності впровадження засобів заспокоєння дорожнього руху на перехресті. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. №1 (20). С. 79-86.
4. Хітров І. О. Оцінка ефективності функціонування перехрестя з круговим рухом. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. №2(21). с. 227-235.
5. У Дніпрі на проспекті Петра Калнишевського з'явилася кільцева розв'язка. *dp.informator.ua*: URL: <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipri-na-prospekti-petra-kalnishevskogo-z-yavilasya-kilceva-rozv-yazka>.
6. Горбова О.В. Мерзлий О.Д. Дослідження автомобільних потоків засобами імітаційного моделювання. *Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2021. №5. С. 36-50.

ВЗАЄМОДІЯ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА МІСЬКОГО РУХУ ЯК ОСНОВА ПІДВИЩЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ БЕЗПЕКИ

Хітров І. О.

Національний університет водного господарства та природокористування
i.o.khitrov@nuwm.edu.ua

Сучасні міста характеризуються високою інтенсивністю транспортних потоків, що зумовлює зростання вимог до ефективності та безпеки дорожнього руху. Взаємодія транспортної інфраструктури та руху міського транспорту виступає визначальним чинником у формуванні безпечного середовища для учасників дорожнього руху. Раціональна організація вулично-дорожньої мережі, впровадження інтелектуальних систем управління рухом та належний технічний стан інфраструктури забезпечують зниження аварійності, підвищення пропускної спроможності та комфортності перевезень. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексного підходу до розвитку транспортних систем міст з урахуванням безпеки як одного з ключових показників їхньої ефективності.

Транспортна інфраструктура – це сукупність об'єктів, споруд, технічних засобів і організаційних систем, що забезпечують функціонування транспортних процесів, взаємодію різних видів транспорту та задоволення потреб суспільства в перевезеннях пасажирів і вантажів (табл. 1) [1, 2]. Вона формує просторово-організаційну основу транспортної системи міста, регіону, держави.

Таблиця 1 -Основні складові транспортної інфраструктури

Складова	Характеристика / приклади
Вулично-дорожня мережа	Автомобільні дороги, вулиці, площі, розв'язки, мости, тунелі
Транспортні вузли та об'єкти обслуговування	Вокзали, станції, автовокзали, зупинкові комплекси
Інженерно-технічні засоби	Світлофори, дорожні знаки, розмітка, огороження, освітлення
Інфраструктура громадського транспорту	Депо, парки, кінцеві станції, платформи, зупинки
Інтелектуальні транспортні системи	Системи моніторингу, регулювання та управління рухом
Сервісна інфраструктура	Паркінги, стоянки, зарядні станції для електротранспорту, СТО

Процес взаємодії транспортної інфраструктури та міського руху починається з етапу планування та проектування. На цьому етапі формуються вулично-дорожні мережі, визначаються маршрути громадського та приватного транспорту, розташовуються транспортні вузли – станції, автовокзали, депо. Проектування враховує прогнозовані потоки транспорту, щільність населення та вимоги безпеки руху [3, 4].

На етапі організації руху транспортних потоків інфраструктура регулює взаємодію транспортних засобів і пішоходів. Встановлюються світлофори, дорожні знаки, розмітка та пішохідні переходи, створюються виділені смуги для громадського транспорту. Інфраструктурні рішення визначають маршрути руху, допустимі швидкості та порядок пропуску транспортних потоків, зменшуючи конфлікти на перехрестях та підвищуючи безпеку.

На етапі функціонування та експлуатації міський рух формує навантаження на дорожні споруди та транспортні об'єкти. Інфраструктура забезпечує пропускну спроможність, комфорт перевезень і безпеку учасників руху. Системи моніторингу та управління транспортними потоками, такі як інтелектуальні транспортні системи (ІТС), аналізують рух у реальному часі та регулюють його при виникненні заторів або аварійних ситуацій.

Слід враховувати і зворотний вплив міського руху на інфраструктуру. Інтенсивність руху спричинює зношування дорожнього покриття, впливає на технічний стан мостів, розв'язок та світлофорів, а також на роботу паркувальних зон. Дані про аварійність, перевантаження та затори використовуються для планування модернізації та оптимізації інфраструктури.

Нарешті, процес взаємодії передбачає постійну оптимізацію. Використовуються інтелектуальні транспортні системи, адаптивне регулювання світлофорів, зміни маршрутів руху, розширення або реконструкція доріг та транспортних вузлів. Додатково впроваджуються заходи щодо управління трафіком у реальному часі, модернізації зупинок громадського транспорту, облаштування пішохідних зон та веломереж. Також проводиться регулярний моніторинг транспортних потоків, аналіз аварійності та заторів, що дозволяє своєчасно коригувати організацію руху та технічний стан інфраструктури. Основна мета оптимізації – забезпечити безпеку, ефективність та сталий розвиток міського руху при мінімальних витратах і ризиках, а також підвищити комфорт і доступність перевезень для всіх учасників дорожнього руху [5].

Таким чином:

1. Взаємодія транспортної інфраструктури та міського руху є ключовим фактором забезпечення безпеки перевезень, ефективності транспортної системи та комфорту учасників руху. Планування та проектування інфраструктури на ранніх етапах дозволяє врахувати потоки транспорту, щільність населення та потенційні ризики, що значно знижує аварійність.

2. Організація руху транспортних потоків, облаштування світлофорних об'єктів, дорожніх знаків, пішохідних переходів та виділених смуг для громадського транспорту дозволяє регулювати інтенсивність трафіку та запобігати конфліктам між різними учасниками руху.

3. Постійний моніторинг стану інфраструктури та транспортних потоків, використання інтелектуальних транспортних систем і адаптивних рішень для управління рухом сприяють зменшенню аварійності, підвищенню пропускну здатності доріг та оптимізації маршрутів руху.

4. Ефективна взаємодія інфраструктури та міського руху вимагає комплексного підходу, який поєднує планування, технічні засоби, організаційні рішення та технології. Такий підхід забезпечує сталий розвиток міської транспортної системи, знижує ризики дорожньо-транспортних пригод і підвищує загальну безпеку учасників руху.

Література

1. Турченко І. В. Критичний аналіз сучасних доктринальних та законодавчих підходів до визначення категорії «транспортна інфраструктура». *Право та інновації*. 2024. № 4 (48). С. 20-31 [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2024-4\(48\)-3](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2024-4(48)-3).

2. Luqi Wang, Xiaolong Xue, Zebin Zhao, Zeyu Wang. The Impacts of Transportation Infrastructure on Sustainable Development: Emerging Trends and Challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, Vol. 15(6), 1172; <https://doi.org/10.3390/ijerph15061172>.

3. A Comprehensive Guide to Transportation Planning. Iteris : веб-сайт. URL : https://www.iteris.com/blog/comprehensive-guide-transportation-planning?utm_source=chatgpt.com.

4. A Guide to Transportation Planning. PTV Planung Transport : веб-сайт. URL : https://www.ptvgroup.com/en-us/application-areas/transportation-planning?utm_source=chatgpt.com.

5. Macharis C., Kin B. The 4 A's of Sustainable City Distribution: Innovative Solutions and Challenges ahead. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2016. Vol. 7. P. 59–71. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1196404>.

МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ЦИКЛУ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА ПЕРЕХРЕСТЯХ З УРАХУВАННЯМ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ ТА КІЛЬКОСТІ СМУТ**Холодова О. О., Бугайова М. О., Покусай П. О.***Харківський національний автомобільно-дорожній університет*olgakholodova280781@gmail.com

Одним із дієвих методів організації дорожнього руху (ОДР) в умовах зростання інтенсивності транспортних і пішохідних потоків є запровадження світлофорного регулювання. Використання світлофорів дозволяє упорядкувати рух, знизити рівень конфліктності транспортних і пішохідних потоків, підвищити безпеку на перехрестях та забезпечити більш рівномірний розподіл пропускної здатності між напрямками. При цьому важливу роль відіграє саме правильне визначення тривалості циклу світлофорного регулювання, адже від цього безпосередньо залежать пропускна здатність перехрестя, середні затримки транспортних засобів (ТЗ), рівень обслуговування учасників дорожнього руху, а також екологічні та соціальні показники функціонування транспортної системи. Таким чином, дослідження методів розрахунку оптимальної тривалості циклу світлофорного регулювання є актуальним завданням сучасної транспортної науки та практики ОДР.

У світовій практиці для визначення оптимальної тривалості циклу світлофорного регулювання розроблено низку підходів. Найбільш відомими та широко застосовуваними є методика Вебстера [1], яка вважається класичною та орієнтована на мінімізацію затримок ТЗ, а також методика, викладена у Highway Capacity Manual (HCM) [2], що передбачає більш детальний аналіз пропускної здатності, затримок та рівня обслуговування на перехрестях.

Методика Вебстера вирізняється простотою та прозорістю: для розрахунків не потрібні великі обсяги даних, а результати легко інтерпретувати, що робить її придатною для попередніх оцінок та проєктів. Водночас вона розроблена в середині ХХ століття, не враховує сучасну поведінку учасників руху (пішоходів, велосипедистів, громадського транспорту) та неоднорідність потоків, орієнтована лише на мінімізацію затримок і може давати неточні результати при високих навантаженнях або складних багатофазних перехрестях. Методика HCM, навпаки, більш сучасна та деталізована: дозволяє оцінювати цикл світлофора, ефективність перехрестя, рівень обслуговування та різні режими роботи. Її міжнародне визнання робить її стандартом для транспортного моделювання, проте застосування потребує значної кількості вхідних даних і є менш зручним для швидких попередніх оцінок, хоча надзвичайно цінним для детальних досліджень.

Отже, виходячи з обмежень класичних методик, зупинятися лише на них недостатньо. Для досліджень, спрямованих на моделювання тривалості циклу світлофорного регулювання, необхідно розглядати додаткові підходи та алгоритмічні рішення, які дозволяють адаптувати розрахунки до реальних умов міського руху, поєднувати емпіричні дані з сучасними методами моделювання та оптимізації. Такий підхід забезпечує більшу гнучкість і точність моделювання та створює логічну основу для подальшого розвитку теми цієї статті.

Сучасні дослідження показують, що класичні методики визначення тривалості циклу світлофорів мають обмеження, оскільки орієнтовані на статичні умови руху та не враховують динаміку транспортних потоків у великих містах. Для підвищення ефективності регулювання застосовують алгоритмічні та обчислювальні підходи, включно з методами штучного інтелекту, симуляційними моделями та метаевристичними алгоритмами, що дозволяють адаптивно оптимізувати тривалість циклу та фаз світлофорів у реальному часі, зменшуючи затримки та збільшуючи пропускну здатність перехресть [3-17].

Дане дослідження продовжує сучасний тренд, поєднуючи класичні інженерні підходи з алгоритмічними методами моделювання, водночас зберігаючи акцент на реальних параметрах перехрестя. Такий підхід забезпечує наукову новизну та практичну значущість для українських умов міських транспортних мереж. Тобто, нами запропоновано розглянути даний підхід як проміжну ланку між класичними теоретичними методиками (Webster, HCM) та національними стандартами, зокрема ДСТУ 4092:2024 «Безпека дорожнього руху. Світлофори

дорожні. Загальні технічні умови» [18]. В роботі здійснена спроба формалізувати емпіричні правила, визначені у цьому стандарті, у вигляді математичної моделі, що дозволяє автоматизувати розрахунки та підвищує гнучкість застосування нормативних умов у наукових дослідженнях та практичних сценаріях організації світлофорного регулювання.

Світлофорне регулювання на перехрестях за допомогою транспортних світлофорів типів 1, 2 та пішохідних світлофорів рекомендовано впроваджувати за наявності певних нормативних умов, що забезпечують ефективність і безпеку дорожнього руху [18]. Основними критеріями є: середні пікові інтенсивності руху ТЗ на головній та другорядній дорогах (Умова 1); наявність інтенсивності руху пішоходів та велосипедистів (Умова 2); одночасне виконання умов 1 та 2 на рівні не менше 80 % (Умова 3); історичні дані про ДТП (Умова 4); безпосередній виїзд спецтранспорту на регульовану вулицю (Умова 5); та наявність навчальних закладів на магістральній вулиці з шириною проїзної частини більше 12 м без регульованого переходу в межах 100 м (Умова 6).

У запропонованому підході використовується математизація нормативних співвідношень головної та другорядної доріг, закладених у [18]. Іншими словами, замість застосування табличних правил інтенсивності та кількості смуг, які перевірені на практиці (емпіричні дані, що лягли в основу національних та зарубіжних нормативів), пропонується узагальнена функціональна залежність для розрахунку часу циклу світлофора

$$T_{\text{ц}} = f(n_{\text{гол.}}, n_{\text{друг.}}, N_{\text{гол.}}, N_{\text{друг.}}), \quad (1)$$

де $n_{\text{гол.}}$, $n_{\text{друг.}}$ - кількість смуг головної та другорядної доріг відповідно, од.; $N_{\text{гол.}}$, $N_{\text{друг.}}$ - середні інтенсивності руху на головній та другорядній дорогах відповідно.

Причому ця функція прагне зменшити час очікування на світлофорі, особливо на головній дорозі, де інтенсивність більша; збалансувати розподіл зеленого сигналу між головною та другорядною дорогами, щоб уникнути зайвих черг; врахувати кількість смуг і фактичні інтенсивності, як передбачає таблиця 9 згідно Умові 1 в [18], тобто є узагальненою математичною моделлю, що враховує перевірені на практиці нормативні співвідношення і дозволяє автоматизувати розрахунки світлофорного циклу; підвищити гнучкість застосування нормативних умов у дослідженнях; забезпечити перехід від табличних правил до аналітичного підходу, що полегшує оптимізацію та інтеграцію з сучасними методами моделювання транспортних потоків. Таким чином, запропонований підхід фактично є «математизацією нормативу», оскільки він переводить емпірично перевірені табличні умови в функціональну залежність, яка може безпосередньо застосовуватись для побудови цільової функції та подальшої оптимізації роботи світлофорних перехресть.

Вихідні параметри таблиці 9 є результатом багаторічних емпіричних та нормативних досліджень у сфері ОДР, проведених у 1960–1980-х роках у Києві, Харкові та інших містах. Під час цих робіт здійснювали систематичні спостереження на великій кількості перехресть, вимірюючи інтенсивність руху по головній та другорядній дорогах і визначаючи співвідношення, при яких виникають затримки, конфлікти та небезпечні ситуації. Результати узагальнювали у вигляді порогових значень інтенсивності та кількості смуг, що лягли в основу рекомендацій щодо введення світлофорного регулювання. Згодом ці дані інтегрувалися у нормативні документи, зокрема українські стандарти, де чітко зазначено: при перевищенні певних інтенсивностей руху пріоритет головної дороги вже не забезпечує безпеки, що обумовлює необхідність світлофора. Логіка цих співвідношень базується на пропускній здатності доріг: збільшення кількості смуг головної дороги підвищує її пропускну здатність і жорсткіше визначає порогові значення для другорядної. Таким чином, таблиця відображає узагальнені експериментальні дані, закріплені у нормативних документах, і слугує практичним інструментом для прийняття рішень щодо світлофорного регулювання. Хоча прямий доступ до оригінальних експериментів обмежений, у науковій літературі та сучасних стандартах цей метод визнано достовірним для отримання порогових значень.

Для оцінки ефективності запропонованого підходу ми провели його порівняння з класичними методиками регулювання світлофорів, зокрема з критеріями Вебстера та методикою НСМ. Порівняння показує, що наш підхід орієнтований на баланс між потоками

головної та другорядної доріг з урахуванням безпеки та нормативних порогів, використовує як вхідні дані інтенсивності руху та кількість смуг, має середній рівень складності, трансформує табличні правила в функціональну залежність і дозволяє швидко визначати доцільність введення світлофорного регулювання в українських умовах. У той час як метод Вебстера фокусується на мінімізації затримок із простими розрахунками, а HCM передбачає детальну оцінку рівня обслуговування та пропускної здатності, наш підхід забезпечує практичну адаптацію до локальних нормативів, хоча й може бути менш універсальним порівняно з класичними методиками.

Запропонований підхід має значну наукову та практичну цінність, оскільки формалізує емпіричні правила з нормативних таблиць і системно застосовує їх для оцінки необхідності світлофорного регулювання, інтегруючи безпеку та ефективність руху. Модель дозволяє швидко оцінювати оптимальний цикл світлофора на основі базових параметрів, прогнозувати час циклу та обирати схему регулювання на ескізному етапі проєктування, а також проводити сценарний аналіз при зміні кількості смуг чи інтенсивності руху. Вона враховує вплив тривалості циклу на затримки та екологічні показники (CO_2 , NO_x), що підвищує її практичну значущість. У науковому контексті модель корисна для розробки спрощених підходів до регулювання руху в містах із обмеженими даними, дослідження взаємозв'язку пропускної здатності, безпеки та екології, а також може слугувати основою для оптимізаційних алгоритмів інтелектуальних транспортних систем, де цикл світлофора підбирається в реальному часі. Таким чином, вона дозволяє визначати умови необхідності світлофорного регулювання та прогнозувати зміну оптимального циклу залежно від співвідношення потоків і кількості смуг, забезпечуючи інтеграцію безпеки, ефективності та екологічності.

Наступним етапом дослідження є безпосередній розрахунок тривалості світлофорного циклу. Для цього буде використано класичну методику Вебстера, яка дозволяє визначити оптимальний цикл світлофора на основі відомих інтенсивностей транспортних потоків та кількості смуг руху. Отримані розрахункові значення тривалості циклу будуть інтегровані у програмне середовище PTV VISSIM для моделювання транспортних потоків на перехрестях. Такий підхід забезпечує двоступеневу перевірку: спочатку — аналітичний розрахунок циклу, а потім — оцінка ефективності його застосування через симуляційні експерименти. Результатом стане кількісна залежність часу циклу від кількості смуг та інтенсивності руху, а також функціональні зв'язки між затримками транспортних потоків, кількістю смуг, інтенсивністю та тривалістю циклу. Це дозволяє не лише формалізувати нормативні дані, а й отримати практично застосовну модель для прогнозування та оптимізації ОДР на міських перехрестях.

Література

1. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич: за заг. ред. Є.Ю. Форнальчика. - Львів:Видавництво Львівської політехніки, 2018. 236 с.
2. Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. <https://doi.org/10.17226/26432>
3. Chu, H.-C., Liao, Y.-X., Chang, L.-h., & Lee, Y.-H. (2019). Traffic Light Cycle Configuration of Single Intersection Based on Modified Q-Learning. *Applied Sciences*, 9(21), 4558. <https://doi.org/10.3390/app9214558>
4. Han, S.-Y., Sun, Q.-W., Yang, X.-H., Han, R.-Z., Zhou, J., & Chen, Y.-H. (2022). Adaptation Scheduling for Urban Traffic Lights via FNT-Based Prediction of Traffic Flow. *Electronics*, 11(4), 658. <https://doi.org/10.3390/electronics11040658>
5. Wang, B., He, Z., Sheng, J., & Chen, Y. (2022). Deep Reinforcement Learning for Traffic Light Timing Optimization. *Processes*, 10(11), 2458. <https://doi.org/10.3390/pr10112458>
6. Duraku, R., & Boshnjaku, D. (2024). Enhancing Traffic Sustainability: An Analysis of Isolation Intersection Effectiveness through Fixed Time and Logic Control Design Using VisVAP Algorithm. *Sustainability*, 16(7), 2930. <https://doi.org/10.3390/su16072930>

7. D. Gunarathne, N. Amarasingha, and V. Wickramasighe, "Traffic Signal Controller Optimization Through VISSIM to Minimize Traffic Congestion, CO and NOx Emissions, and Fuel Consumption", *Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 9–21, Apr. 2023, doi: [10.54327/set2023/v3.i1.56](https://doi.org/10.54327/set2023/v3.i1.56).
8. Tang-Hsien Chang, Jen-Ting Lin. Optimal signal timing for an oversaturated intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*. V. 34, Issue 6, 2000. P. 471-491. ISSN 0191-2615. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00034-X).
9. Cheng, Dingxin & Tian, Zong & Messer, Carroll. (2005). Development of an Improved Cycle Length Model over the Highway Capacity Manual 2000 Quick Estimation Method. *Journal of Transportation Engineering-asce - J TRANSP ENG-ASCE*. 131. 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:12(890).
10. Akgüngör, A.P. i Korkmaz, E. (2018). Investigating Parameter Interactions with the Factorial Design Method: Webster's Optimal Cycle Length Model. *Tehnički vjesnik*, 25 (Supplement 2), 391-395. <https://doi.org/10.17559/TV-20170908185847>
11. Wu Y., Lu J., Chen H., Yang H. Development of an Optimization Traffic Signal Cycle Length Model for Signalized Intersections in China. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Article ID 954295. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/954295>.
12. Jamal, A., Tauhidur Rahman, M., Al-Ahmadi, H. M., Ullah, I., & Zahid, M. (2020). Intelligent Intersection Control for Delay Optimization: Using Meta-Heuristic Search Algorithms. *Sustainability*, 12(5), 1896. <https://doi.org/10.3390/su12051896>
13. Alvaro J. Calle-Laguna, Jianhe Du, Hesham A. Rakha. Computing optimum traffic signal cycle length considering vehicle delay and fuel consumption. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. V. 3, 2019. 100021. ISSN 2590-1982. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100021>.
14. Cheng, Dingxin & Messer, Carroll & Tian, Zong. Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000. URL: [\(PDF\) Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000](#) (дата звернення 19.09.2025)
15. Shao, Junqi, Zhang, Ke, Wang, Anyou, Li, Shen, Dynamically Signal Timing Optimization of Isolated Intersection Traffic Lights Based on a Dual-Layer Framework, *Journal of Advanced Transportation*, 2024, 1260664, 13 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/1260664>
16. Sahar Araghi, Abbas Khosravi, Douglas Creighton. A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing. *Expert Systems with Applications*. V. 42, Issue 3, 2015. P. 1538-1550. ISSN 0957-4174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.003>.
17. Gedeon, G. Signal Timing Optimization. Course No: C05-005. Continuing Education and Development, Inc., 5 PDH. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [C05-005 - Signal Timing Optimization.pdf](#)
18. Національний стандарт України ДСТУ 4092:2024 Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні умови. [Чинний з 2025-05-01]. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2025. 48 с.

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДИК РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ВВЕДЕННЯ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ НА ПЕРЕХРЕСТЯХ

Шевчук Є. В., аспірант, Наглюк І. С., Бекетов Ю.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

shev81089@gmail.com

Сучасні міста стикаються з постійним зростанням інтенсивності транспортних потоків, що обумовлено як підвищенням рівня автомобілізації населення, так і збільшенням мобільності в цілому. Перехрестя залишаються найбільш уразливими елементами вулично-дорожньої мережі, де концентрується найбільша кількість конфліктних точок, виникають затори та аварійні ситуації. Саме на цих ділянках найчастіше спостерігається зниження пропускної здатності доріг, підвищення рівня затримок і втрат часу, що безпосередньо впливає на ефективність функціонування всієї транспортної системи міста [1].

У більшості випадків необхідність введення світлофорного регулювання визначається тоді, коли неорганізований рух стає причиною критичного перевантаження перехресть. Проте своєчасне впровадження систем управління рухом дозволяє не лише зменшити транспортні затримки, а й підвищити безпеку дорожнього руху, знизити рівень аварійності та поліпшити екологічну ситуацію завдяки скороченню витрат пального на холостому ході. [2].

Актуальність дослідження також зумовлена тим, що у світовій практиці застосовується велика кількість методів оцінювання доцільності впровадження систем регулювання, проте жодна з них не є універсальною. Частина методів забезпечує простоту використання, але дає надто узагальнені результати. Інші методи, навпаки, характеризуються високою точністю, проте потребують значного обсягу вихідних даних або дорогого програмного забезпечення, що ускладнює їх використання у практиці органів місцевого самоврядування [3].

Мета даної роботи полягає у проведенні порівняльного аналізу основних методів розрахунку для введення систем регулювання на перехрестях, виявленні їхніх переваг та недоліків, а також у розробці пропозицій щодо формування гібридного підходу, який поєднує доступність і достатню точність оцінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- розглянути основні методи розрахунків, які застосовуються у практиці транспортного планування;

- визначити їхні обмеження та сфери найбільш ефективного застосування;
- запропонувати підхід, що дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування перехресть, враховуючи сучасні тенденції розвитку інтелектуальних транспортних систем [4].

Таким чином, обґрунтування доцільності впровадження систем регулювання на перехрестях є не лише науковою, а й практичною проблемою, розв'язання якої безпосередньо впливає на якість життя мешканців міст та рівень безпеки дорожнього руху.

Основні методики розрахунків

1. Метод пропускної здатності.

$$Q_{max} = 3600 / t_{cp}, \quad (1)$$

де t_{cp} – середній інтервал між автомобілями, с.

Якщо фактична інтенсивність руху $q > Q_{max}$, то перехрестя перевантажене, і виникає потреба у світлофорному регулюванні. Метод простий і наочний, проте він не враховує динаміку потоків, вплив пішоходів та громадського транспорту [1].

2. Метод коефіцієнтів завантаження.

$$k = q \frac{q}{Q_{max}}, \quad (2)$$

де q – інтенсивність руху на підході,

Q_{max} – його пропускна здатність.

Зазвичай, якщо $k > 0.8$, вважається, що підхід перевантажений. Метод дозволяє швидко ідентифікувати проблемні напрямки, однак він статичний і не враховує зміни протягом часу та різномірність транспортних засобів [2]. Метод коефіцієнтів завантаження дозволяє виявити

перевантажені напрямки, проте не дає можливості прогнозувати ситуацію у часі. Крім того, коефіцієнти не відображають впливу громадського транспорту та маневрових операцій.

3. Метод середніх затримок.

$$d = (C * (1 - g/C)^2) / (2 * (1 - X)), \quad (3)$$

де C – цикл світлофора (с),

g – тривалість зеленої фази (с),

$X = q/(s * g/C)$,

s – насичений потік.

Метод застосовується у міжнародній практиці (Highway Capacity Manual). Він враховує часові втрати транспортних засобів та пішоходів, але вимагає точних вхідних даних і значного часу на розрахунки [3]. Метод середніх затримок відображає якість функціонування перехрестя, однак потребує великої кількості даних та складних розрахунків.

4. Метод транспортного моделювання.

$$q = k * v \quad (4)$$

$$a_i(t) = \alpha * (v_{i-1}(t) - v_i(t)) / (x_{i-1}(t) - x_i(t))^2 \quad (5)$$

Макроскопічні моделі описують рух через середні характеристики потоку, тоді як мікроскопічні враховують рух окремих автомобілів. Методи забезпечують точний прогноз, але є дорогими й вимагають складних інструментів [4]. Методи моделювання враховують широкий спектр факторів, але є надто трудомісткими для масового використання.

5. Метод конфліктних точок.

$$N_c = N_z + N_{зл} + N_{п}, \quad (6)$$

де N_z – зустрічні конфлікти,

$N_{зл}$ – злиття потоків,

$N_{п}$ – перетинання потоків.

Цей метод дозволяє оцінити потенційний рівень небезпеки перехрестя. Недолік полягає в тому, що він не враховує пропускну здатність і часові параметри [5].

Інтегральний показник ефективності можна описати формулою:

$$I = \alpha * (q / Q_{\max}) + \beta * (d / d_{\text{норм}}) + \gamma * (N_c / N_{\text{доп}}), \quad (7)$$

де q – фактична інтенсивність потоку;

$Q_{\max}$ – пропускну здатність;

d – середня затримка;

$d_{\text{норм}}$ – допустима затримка;

N_c – кількість конфліктних точок;

$N_{\text{доп}}$ – їх допустиме значення;

α, β, γ – вагові коефіцієнти.

Коли $I > 1$, необхідне впровадження світлофорного регулювання. Це забезпечує баланс між простотою й точністю, дозволяє зменшити затримки, скоротити кількість конфліктних ситуацій та підвищити безпеку дорожнього руху.

Висновки

Жодна з існуючих методик не є універсальною. Усі ці недоліки зумовлюють необхідність пошуку нового рішення. Застосування гібридного підходу, що поєднує прості та складні методики. Для швидкої оцінки використовуються методи пропускну здатності й коефіцієнтів завантаження, для уточнення – метод середніх затримок із даними ITS, для найбільш критичних ділянок – моделювання, а для підвищення безпеки – метод конфліктних точок.

Література

1. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016. – P. 145–160.
2. Vuchic, V. R. Transportation for Livable Cities. Routledge, 2017. – P. 98–112.
3. TRB. Traffic Signal Timing Manual. Second Edition. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, D.C., 2018. – P. 210–235.
4. Kerner, B. S. Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science. Springer, 2019. – P. 301–320.
5. Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V. Review of road traffic control strategies. Annual Reviews in Control, 2021, Vol. 51. – P. 85–101.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ У СМАРТ-МІСТАХ

Шипов Є. Г.

Лозівська філія Харківського автомобільно-дорожнього фахового коледжу
e.shipo87@gmail.com

Сучасні тенденції урбанізації вимагають пошуку нових підходів до організації міського простору та транспортних систем. Концепція «смарт-міста» (smart city) спрямована на підвищення ефективності управління міською інфраструктурою, зниження екологічного навантаження та покращення якості життя населення за допомогою цифрових технологій. Одним із ключових елементів такої концепції є розвиток транспортної інфраструктури, що поєднує інтелектуальні системи керування, сталу мобільність та екологічні рішення.

Розвиток транспортної інфраструктури у смарт-містах ґрунтується на інтеграції цифрових технологій у всі елементи транспортної системи — від управління дорожнім рухом до планування маршрутів громадського транспорту.

Серед основних напрямів розвитку можна відокремити такі:

- ❖ використання датчиків, відеоаналітики, штучного інтелекту для моніторингу стану доріг, регулювання світлофорів у режимі реального часу, управління потоками транспорту та зменшення заторів;
- ❖ поширення електричних автобусів, тролейбусів, автомобілів і велосипедів сприяє зниженню рівня шкідливих викидів. Розбудова мережі зарядних станцій є стратегічним пріоритетом для сучасних міст;
- ❖ розвиток концепції «Mobility as a Service» (Мобільність як послуга), що дозволяє мешканцям за допомогою єдиного мобільного додатку планувати маршрут із використанням громадського, орендованого, велосипедного та пішохідного транспорту;
- ❖ дороги з вбудованими сенсорами, інтелектуальні паркувальні системи, автоматизоване управління світлофорами, системи пріоритету громадського транспорту — усе це формує інфраструктуру нового покоління;
- ❖ використання систем відеоспостереження, безконтактних платежів, інформаційних табло в реальному часі, адаптивного освітлення покращує досвід користування транспортом і підвищує рівень безпеки.

У найближчі роки очікується активне впровадження автономних транспортних засобів, розвиток систем прогнозування транспортних потоків на основі великих даних (Big Data), а також інтеграція транспортної інфраструктури з енергетичними та комунальними мережами міста.

Особливої уваги заслуговує розвиток «зелених» транспортних коридорів та пішохідно-велосипедної інфраструктури, які є невід’ємною частиною стійкої міської мобільності.

Розвиток транспортної інфраструктури у смарт-містах є одним із ключових чинників формування комфортного, безпечного та екологічного міського середовища. Інтеграція цифрових технологій, екологічних рішень та принципів сталого розвитку дозволяє створити ефективну транспортну систему, орієнтовану на потреби людини.

Успіх реалізації таких проєктів залежить від взаємодії державних органів, місцевого самоврядування, наукових установ та приватного бізнесу.

Література

1. Башинська І.О., Філіппов В.Ю. Розумна система міського пасажирського транспорту як складова Smart City : монографія. Харків : вид-во «Діса плюс», 2018. 220 с.
2. Сардак С. Актуальні питання побудови smart інфраструктури міст України. Smart-інфраструктура у сталому розвитку міст: світовий досвід та перспективи України. Вид. «Заповіт», 2021. С. 367–376.

**АРХІТЕКТУРА АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ІНТЕРМОДАЛЬНИМИ
ХАБАМИ В УМОВАХ РИЗИКУ****Ящук Ю. І.¹, Орда О. М.²**¹*Український державний університет залізничного транспорту,*²*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
anturrium1@gmail.com*

Сучасні міські транспортні системи характеризуються складною структурою та високою динамічністю, що створює низку викликів для ефективного функціонування пересадочних транспортних вузлів. Міські інтермодальні хаби – це складні системи, які інтегрують різні види транспорту (залізницю, метро, автобуси, тролейбуси, трамваї), що дозволяє пасажирам здійснювати швидкі і комфортні пересадки. Ефективне функціонування інтермодальних хабів є критичним для безперервної мобільності в міських агломераціях. Особливо важливою постає задача адаптивного управління такими хабами в умовах невизначеності та ризиків, спричинених як екзогенними (військові конфлікти, природні катастрофи, пандемії), так і ендогенними чинниками (технічні збої, зміни попиту). Сучасні умови функціонування пасажирського транспорту в Україні характеризуються:

- підвищеною непередбачуваністю транспортних потоків, зокрема в наслідок динамічної міграції населення;
- великими ризиками техногенних аварій, блекаутів, повітряних тривог, як наслідок - затримок і скасування рейсів;
- швидкими змінами поведінки та звичок користувачів.

Це зумовлює необхідність переходу від статичних моделей управління до динамічних, пристосованих до поточного стану системи і її змін. Традиційні методи планування та управління транспортом, що базуються переважно на історичних даних і статичних моделях, виявляються недостатніми. Для вирішення цих проблем все більшого значення набуває застосування інтелектуальних технологій, які дозволяють адаптуватися до мінливих умов в реальному часі.

Водночас зростають обсяги краудсорсингових даних, що надходять зі смартфонів, GPS-пристроїв і соціальних мереж користувачів транспортних послуг. Краудсорсингові дані, отримані з різних джерел, дозволяють збирати інформацію про фактичну поведінку користувачів, запити та інциденти в режимі реального часу, що дає змогу створювати більш достовірні моделі прогнозування. Результати обробки таких даних надають можливість оперативно відслідковувати рух пасажирів і змінювати моделі попиту. Поєднання краудсорсингу з методами машинного навчання та математичної оптимізації створює основу для розробки адаптивних систем управління міським транспортом.

Теоретичні основи адаптивного управління та його застосування у транспортній сфері були висвітлені в роботі [1], де проаналізовано еволюцію методів адаптації систем управління організацій. Автори [2] досліджують концепцію адаптивного управління з акцентом на ризики та безпеку. В сучасних транспортних дослідженнях [3] наголошується на значенні мікромобільності і інтеграції різних систем транспорту через прогностичні моделі. В літературі активно досліджуються методи прогнозування попиту на пасажирські перевезення. Традиційні підходи базуються на історичних даних, сезонних трендах, статистичних моделях (ARIMA, Prophet) [4-6]. Однак вони не враховують динамічні зміни, які можуть виникнути у кризових ситуаціях. Новітні дослідження пропонують застосування машинного навчання (LSTM, Random Forest, CatBoost), які здатні враховувати мультифакторні дані, включаючи зовнішні фактори, події та інформацію з краудсорсингових джерел [7]. Краудсорсингові дані в транспорті активно вивчаються в роботах вчених [8], які демонструють переваги даних користувачів у реальному часі при оперативному управлінні процесу перевезень пасажирів та обслуговуванню у міських інтермодальних хабах. Діджиталізація систем управління описані в роботі [9], що підтверджує перспективність додатків адаптивного контролю, базованих на сучасних ІТ-технологіях та створенні «цифрових двійників».

Запропонована в роботі модель засновано на поєднанні методів машинного навчання для обробки краудсорсингових даних, таких як соціальні мережі, мобільні GPS-сигнали, опитування, а також математичних моделей адаптивного управління.

Краудсорсингові дані стали потужним інструментом для моніторингу транспортних систем у реальному часі. Вони дозволяють відслідковувати пасажиропотоки, прогнозувати затримки, аналізувати поведінку користувачів [10]. Результати окремих досліджень показали, що інтеграція GPS-треків та даних із соцмереж дозволяє суттєво підвищити точність моделей прогнозування, особливо в умовах нестабільності [7,8]. Для обробки краудсорсингових даних застосовуються різні алгоритми машинного навчання, зокрема [10- 11]:

- кероване навчання, включаючи логістичну регресію, дерева рішень, метод k-ближчих сусідів (KNN), що дозволяють класифікувати та прогнозувати поведінку користувачів на основі історичних даних.

- Некероване навчання, як-от методи кластеризації (k-середніх), які сегментують великі масиви даних для виявлення схожих патернів у користувачів або їхніх переміщень.

- Напівкероване навчання, що поєднує переваги обох типів машинного навчання і використовується при невеликих обсягах маркованих даних.

- Глибоке навчання, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN) для аналізу просторових і часових характеристик руху та розпізнавання патернів у потоках пасажирів.

Вибір інтермодального транспортного вузла доцільно проводити з урахуванням суміжних модальностей: метро, автобуси, тролейбуси, трамваї. Населений пункт, до якого належатиме обраний транспортний вузол, має мати складну транспортну мережу і одночасно перебувати в зоні військових ризиків. Дослідження базується на комплексній методиці, що об'єднує збір даних, прогнозування, моделювання ризиків, оптимізацію та цифрове моделювання. Принципова архітектура адаптивного управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику наведена на рис. 1 і складається з наступних етапів: збір даних; прогнозування попиту і ризику; оптимізаційна модель; впровадження рішень; моніторинг.

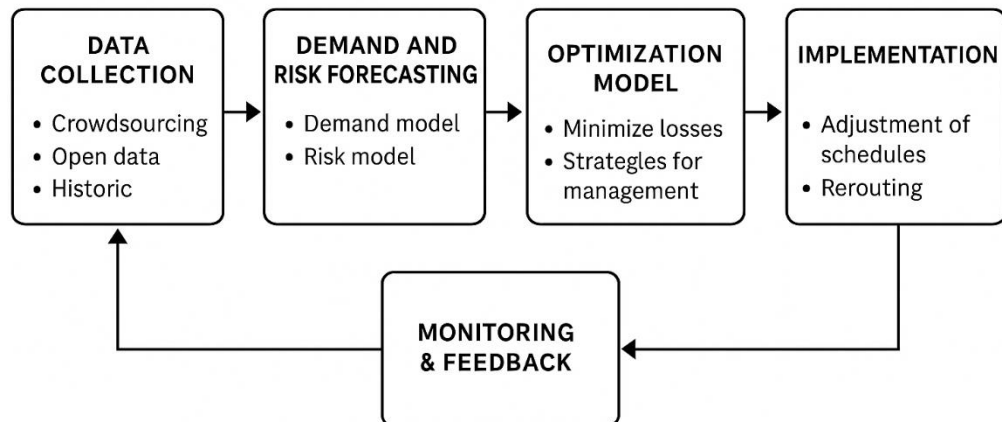


Рисунок 1 – Архітектура адаптивного управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику

Основні джерела даних для проведення етапу збору даних – це краудсорсингові дані (GPS-трекінг, інформація із соціальних мереж та пошукових запитів), що забезпечують отримання динамічних показників пасажиропотоку, що дозволяє оперативно прогнозувати зміни попиту на перевезення. Відкриті дані міського транспорту, до яких належать офіційні розклади руху та історичні записи про затримки, використовуються для моделювання роботи транспортної мережі та подальшого планування її функціонування. Історичні статистичні дані містять інформацію про пасажиропотоки та пересадкові зв'язки між напрямками. Вони дають можливість аналізувати базові довгострокові тренди й використовуються для навчання аналітичних та прогнозних моделей. Дані про ризики, зокрема таймстемпи повітряних тривог, обстрілів та інших небезпечних подій, застосовуються для формування відповідних ризик-факторів у моделях. За допомогою цих даних можливо оцінювати вплив кризових ситуацій на транспортне функціонування та поведінку пасажирів. Такий підхід до структурування джерел

забезпечує комплексний збір інформації для побудови достовірних і адаптивних транспортних моделей.

Для обробки краудсорсингових даних застосовуються різні алгоритми машинного навчання, які забезпечують автоматичне виявлення закономірностей, класифікацію інформації та прогнозування. Це включає методи керованого та некерованого навчання, глибокі нейронні мережі, алгоритми оптичного розпізнавання символів (OCR), комп'ютерний зір, геопросторовий аналіз і Big Data платформи. Також для покращення якості обробки використовують адаптивні техніки, які враховують дисбаланс даних і різний рівень складності задач. Таким чином, застосування краудсорсингових даних у поєднанні з сучасними алгоритмами прогнозування та управління дозволяє створювати ефективні адаптивні системи управління міськими інтермодальними хабами в умовах ризику.

Література

1. Тімінський О.Г. Технології адаптивного управління як механізм забезпечення ефективності організаційно-управлінських систем. *Управління розвитком складних систем*. 2016. №27. С. 37-55.
2. Попов В.М., Чуб І.А., Новожилова М.В. Концепція адаптивного управління програмами розвитку систем техногенної безпеки регіону. *Управління розвитком складних систем*. 2015. №21. С.156-162.
3. Oeschger J. Measuring the integration of micromobility and public transport networks: a spatial accessibility perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2025. Vol. 136. P. 53-67. DOI:10.1016/j.tra.2020.06.001.
4. Masliy, V. V., & Berezka, K. M. Selection and evaluation of ARIMA models for forecasting foreign direct investment. *Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Series: Economics and Management*. 2017. 24(2). С. 115-119.
5. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc. 2015. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12194>.
6. Siami-Namini, N. Tavakoli and A. Siami Namin, "A Comparison of ARIMA and LSTM in Forecasting Time Series," 2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). 2018. Pp. 1394-1401, doi: 10.1109/ICMLA.2018.00227
7. Перцев Ю.О., Коротка Л.І. Порівняльний аналіз традиційних статистичних методів та нейромережевої моделі LSTM. *Системні технології*. 2025. Вип. 1 (156). С. 65-77.
8. Kogan F., Harms L. Crowdsourcing data for real-time public transport demand forecasting. *Journal of Urban Technology*. 2022. Vol. 29, №1. Pp. 1-15.
9. Халіна В. Ю., Колбасинський Ю. В. Теоретичне підґрунтя адаптивного управління підприємством. *Економіка і суспільство*. 2024. Вип. 63. С.94-102.
10. Chao Chen, Zhu Wang, Daqing Zhang Telecom SudPar Sending More With Less: Crowdsourcing Integrated Transportation as a New Form of Citywide Passenger–Package Delivery System. *IT Professional*. 2020. Vol. 22. Issue 1. P. 57-62. DOI: 10.1109/MITP.2018.2887389.
11. Майстренко О.В. Краудсорсинг: сутність, види, принципи та інструменти застосування. *Економіка і суспільство*. 2024. № 5. С. 508-512.
12. Howe Jeff. *Crowdsourcing: Why the power of the crowd is driving the future of business* / Jeff Howe. Crown Business, 2009. 336 p.

ЗМЕНШЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ В МІСТАХ З РАДІАЛЬНИМ ПЛАНУВАННЯМ

Засядько Д. В., Надутий Д. А.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

zdv964235@ukr.net

В містах, які мають радіальну планувальну структуру, ситуація з транспортними заторами ускладнюється тим, що значна частина транспортних кореспонденцій (до 70 %) здійснюється за маршрутами, які проходять через центральну ділову частину міста (ЦДЧМ), навіть якщо центр міста не є метою або відправною точкою поїздки [1]. При цьому з різних причин розширення вулиць та прокладання нових проїздів у центральних частинах міст ускладнено або взагалі неможливо, оскільки, наприклад, потребує знесення будівель, які є пам'ятками архітектури, історії та культури. В таких містах одним зі способів зменшення кількості автомобілів у центрі окрім тотального обмеження в'їзду в центр є переорієнтація транзитних транспортних потоків між периферійними районами з руху через центр на рух в обхід центра по умовно-кільцевим транспортним зв'язкам (УКЗ). Для проектування таких зв'язків необхідно обґрунтувати їхнє розташування, потрібну пропускну спроможність та кількість смуг руху. Для цього треба визначити величини транзитних потоків та їхні напрямки. Це дозволить при будівництві кільцевих зв'язків, наприклад, у вигляді естакад, заощадити кошти за рахунок запобігання будування зайвих смуг руху.

Метою досліджень є зниження транспортного навантаження на ЦДЧМ з радіальною планувальною структурою шляхом відведення транзитних автомобільних потоків із центральної частини на систему умовно-кільцевих зв'язків.

Об'єкт дослідження — це процес руху транспортних потоків через центральні ділові частини великих міст. Предметом дослідження є закономірності формування потоків на ділянках системи УКЗ.

В роботі були поставлені і розв'язані такі задачі:

- 1) Провести аналіз основних транспортних проблем в центральних частинах великих міст;
- 2) Виконати аналіз способів зменшення кількості автомобілів та транспортних заторів у центральних частинах великих міст;
- 3) Розробити таку методику визначення потрібної пропускну спроможності кільцевих ділянок для відведення транзитних потоків та розрахунку інтенсивності потоків на цих ділянках, яка мінімізує трудомісткість отримання вихідних даних та спирається на такі кількісні параметри транспортної системи міста, які можна отримати швидко, точно й достовірно;
- 4) Уточнити вид функції тяжіння між транспортними мегарайонами на підставі проведених натурних спостережень;
- 5) Розробити програмне забезпечення для моделювання транспортних потоків та визначення потрібної пропускну спроможності кільцевих ділянок.

Однією з причин скупчення автомобілів у центрі міста є наявність у ЦДЧМ транзитних транспортних потоків, тобто потоків між периферійними зонами, що підтвердилося відеоспостереженнями, проведеними автором. У переглянутих роботах закордонних авторів [2, 3] за цією проблемою містяться рекомендації щодо обмеження в'їзду в ЦДЧМ, в тому числі у вигляді сплати за в'їзд та паркування у ЦДЧМ. Такі рекомендації застосовані, зокрема, у місті Богота (Колумбія), Лондоні (Великобританія). Автор вважає такі обмеження неприйнятними, оскільки вони обмежують ділову активність населення та заважають функціонуванню тисяч підприємств та організацій, розташованих у ЦДЧМ.

Відомо, що для зменшення транспортного навантаження на ЦДЧМ без обмеження проїзду треба організувати відведення транзитних для ЦДЧМ транспортних потоків за допомогою системи УКЗ, яка складається з окремих ділянок (у вигляді вулиць, проїздів чи шляхопроводів), які перехоплюють транспортні потоки на в'їзді в ЦДЧМ на радіальних

магістральних вулицях. Для створення цієї системи для кожного конкретного міста слід розрахувати потрібну пропускну спроможність майбутніх ділянок УКЗ, а також траєкторії їх проходження та місця перетинання з радіальними магістральними вулицями. Автор пропонує розв'язати ці задачі за допомогою моделювання, визначивши потрібну пропускну спроможність через прогнозовані значення інтенсивності транспортних потоків на майбутніх ділянках та задане значення коефіцієнта завантаження дороги рухом. Крім того, вірогідно, що у певних випадках не буде потрібним створення замкненого кільця.

Слід зауважити, що при побудові моделі транспортної мережі постає проблема складності отримання первинної фактичної інформації про транспортний попит та є сумніви щодо виду функції транспортного тяжіння.

Було розроблено новий підхід до створення моделі транспортної системи міста для розв'язання задачі визначення потрібної пропускну спроможності ділянок мережі. Цей підхід не потребує визначення транспортних ємностей кожного транспортного району, які є апіорі неточними, та передбачає замість цього використання значень інтенсивності вхідних та вихідних потоків лише на точках в'їзду(виїзду) в ЦДЧМ [4].

Згідно з існуючими методиками по моделюванню вулично-дорожніх мереж міст зазвичай територія міста розділяється на велику кількість транспортних районів та транспортних вузлів, причому у кожному районі існує лише один центр транспортного тяжіння. Система вулиць та проїздів представляється у вигляді плоского орієнтованого графа. Незважаючи на велику точність такого описання, де кожне перехрестя чи проїзд або перегін представлені у вигляді відповідно, вершин та пари дуг графа, складність збирання вихідної інформації для створення моделі для конкретного міста є досить значною. Річ у тім, що основною складністю є збирання інформації про транспортний попит (обсяг відправлення та прибуття для кожного транспортного району). Автор висуває припущення, що для даної задачі визначення пропускну спроможності майбутніх кільцевих ділянок такий підхід до моделювання не є раціональним.

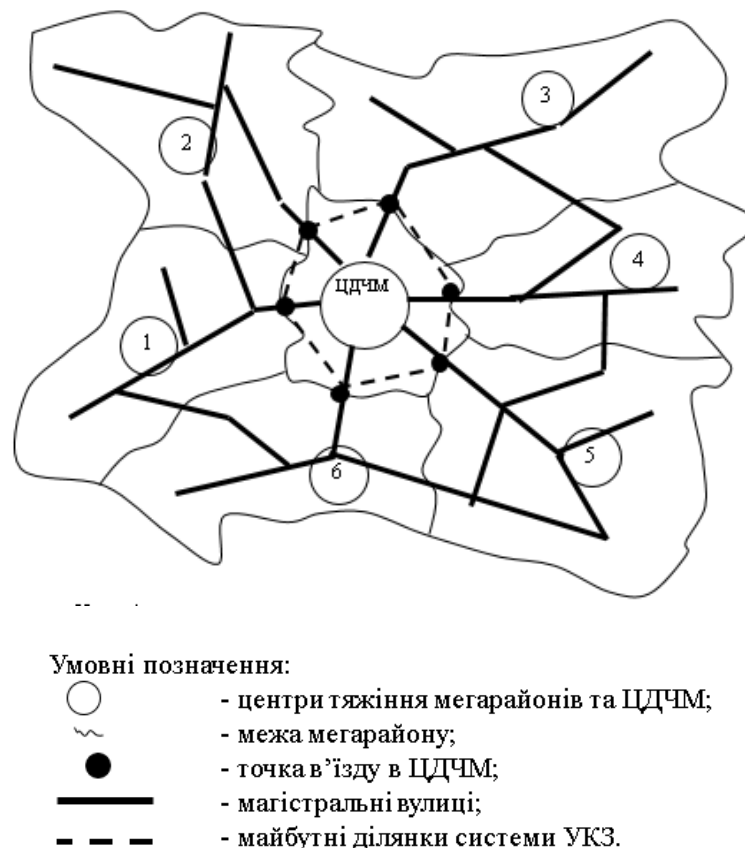


Рисунок 1 – Укрупнена схема транспортного районування

Пропонується макромодельовання транспортної мережі міста у такий спосіб : територію міста умовно розділяємо на ЦДЧМ та периферійні транспортні мегарайони. При

цьому кожен периферійний мегарайон має зв'язок з ЦДЧМ лише у одній точці в'їзду та виїзду в (з) ЦДЧМ. Межами периферійних мегарайонів є межа ЦДЧМ, межа міста (однак, за наявності значних транспортних потоків з безпосередньо розташованих передмість ці передмістя також можна включити до території відповідного мегарайону). Межею ЦДЧМ вважається територія ділового центру міста, де є суттєве зниження фактичної швидкості руху через збільшення щільності потоку.

Автор пропонує розділяти суміжні транспортні мегарайони еквідистантно від суміжних точок в'їзду/виїзду з ЦДЧМ по радіальних магістральних вулицях.

Таким чином, межа пройде по лінії рівної досяжності. Ця лінія складається з точок на території міста, для яких відстань від місць в'їзду в ЦДЧМ відповідних суміжних мегарайонів є однаковою. При цьому ці відстані розраховуються не по прямій, а по вулично-дорожній мережі.

Іншим питанням при мегарайонування є визначення умовного центру тяжіння мегарайону. Річ у тім, що в графі транспортної мережі мегарайон, який займає велику площу та має декілька центрів транспортного тяжіння з різними обсягами прибуття та відправлення, має бути представлений у вигляді однієї вершини. Автор пропонує визначати координату центру тяжіння мегарайону як середньозважені координати окремих центрів тяжіння. Оскільки нас цікавлять транзитні транспортні потоки через ЦДЧМ, які здебільшого утворюються мешканцями міста при виконанні пересувань типу «дім-робота» та «робота-дім», то обсяги відправлення і прибуття для кожного локального центру тяжіння будемо вважати залежними від кількості мешканців у кожному конкретному місці мегарайону, рівня автомобілізації та мобільності населення. Кількість мешканців, очевидно, залежить від площі забудови під житлові будинки та поверховості цих будинків. Якщо вважати рівень автомобілізації та мобільність населення однаковими по всій території мегарайону, то координати умовного центру тяжіння мегарайону можна розрахувати як середньозважені за площею забудови та кількістю поверхів.

Потрібну пропускну спроможність кільцевих ділянок пропонується розраховувати в залежності від майбутньої інтенсивності транспортних потоків та заданого рівня обслуговування учасників дорожнього руху. Значення інтенсивності транспортних потоків на ділянках УКЗ можна отримати після розподілення транспортних кореспонденцій між мегарайонами за відповідними маршрутами. Оскільки вулично-дорожня мережа змодельована у вигляді графа, то для розрахунку маршрутів можна використовувати вже відомі алгоритми, наприклад, алгоритм Дейкстри. При цьому вважається, що реалізація кореспонденцій здійснюється за найкоротшими маршрутами.

Наступною важливою складовою при моделюванні транспортних мереж міст є матриця транспортних кореспонденцій, оскільки вона відображає транспортний попит у транспортній системі. Питанню отримання, уточнення та коригування матриць кореспонденцій присвячена велика кількість робіт. Однак, в задачі визначення інтенсивності та напрямків транзитних транспортних потоків у ЦДЧМ робота з матрицями кореспонденцій має певні особливості. Найскладнішою задачею є саме отримання матриці. На практиці найточнішим та найскладнішим (з організаційної точки зору) способом є пряме анкетне опитування власників автомобілів. Інші способи є простішими, але не досить точними. Матрицю кореспонденцій можна отримати, знаючи обсяги відправлення та прибуття автомобілів у кожному транспортному районі та відстань між районами за допомогою гравітаційної моделі розподілення кореспонденцій.

Транспортні потоки від периферійних мегарайонів у бік ЦДЧМ та у зворотному напрямку мають виражені добові коливання, які відповідають ритму людського життя. Автор робить припущення, що спостерігаючи за транспортними потоками на місцях в'їзду/виїзду з ЦДЧМ впродовж доби, можна визначити обсяги відправлення і прибуття автомобілів у ЦДЧМ та периферійні мегарайони нижчеказаним способом.

На відміну від звичайного порядку розрахунків по гравітаційній моделі об'єми відправлення і прибуття для периферійних районів приймаємо рівними сумі потоків, що входять і, відповідно, виходять з ЦДЧМ. А для ЦДЧМ обсяг відправлення для ранкових періодів вважаємо рівним нулю, а обсяг прибуття рівним різниці між сумою вхідних та

вихідних потоків. Для вечірніх періодів — навпаки: обсяг відправлення розраховуємо як різницю між сумою вихідних та вхідних потоків, а обсяг прибуття приймаємо рівним нулю.

При цьому не враховуються внутрішні кореспонденції мегарайонів та ті кореспонденції, які здійснюються поза межами ЦДЧМ, оскільки вони не створюють транспортного навантаження на ЦДЧМ.

Наступною проблемою є визначення виду функції транспортного тяжіння та врахування факторів, які впливають на транспортне тяжіння.

Різні дослідники пропонують різні види цієї функції [5]. Зокрема, вважається, що транспортне тяжіння зворотно залежить від відстані між транспортними районами або часу на пересування між районами, або грошових витрат на пересування. Крім того, запропоновані різні форми залежності транспортного тяжіння від цих параметрів, зокрема, зворотна залежність, зворотна квадратична та зворотна експоненційна залежність. Відсутність одностайності дослідників щодо виду функції транспортного тяжіння та необхідність процедури калібрування деяких видів цієї функції спонукає до подальших досліджень у цьому напрямку, оскільки вид функції транспортного тяжіння впливає на розрахунок матриці кореспонденцій та врешті, на результати розрахунків потрібної пропускної спроможності умовно-кільцевих ділянок.

Література

1. Гецович Е. М. Определение интенсивностей и направлений транзитных транспортных потоков в центральной деловой части города / Е. М. Гецович, Д. В. Засядько // Коммунальное хозяйство городов. ХНАМГ. Вып. 86. — Киев: «Техника», 2009. — С. 350-357.
2. "Remarks on traffic flow modeling and its applications in Traffic and Mobility, Proc. Traffic and Mobility, Simulation, Economics and Environment Conference (Brilon, Huber, Schreckenberg and Wallentowitz, eds.), pp. 105-115, Aachen, Germany, Springer-Verlag, New York, N.Y., 1999.
3. Hubert Rehborn, Sergey L. Klenov, Jochen Palmer, "An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany". Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Volume 390, Issues 23–24, 1 November 2011, Pages 4466-4485.
4. Гецович Е. М. Задача делимитации центральной деловой части мегаполиса / Е. М. Гецович, М. О. Казакова, О. А. Холодова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр./ М-во образования и науки Украины; ред.кол.: В. А. Богомолов (гл. ред.) и др. — Вып. 45. Харьков: «Издательство ХНАДУ», 2009 - 52-54 с.
5. Leutzbach W. (1972) Einfuhrung in die Theorie des Verkehrsflusses. Karlsruhe, Springer-Verlag 155 p.

ІНТЕГРАЦІЯ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ У ВЕЛИКИХ МІСТАХ

Степанов О. В.¹, Венгер А.С.²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна,

²ВСП Одеський автомобільно-дорожній коледж НУ "Одеська політехніка"

o.stepanov@nubip.edu.ua

У міських агломераціях взаємодія транспортної інфраструктури та транспортних засобів є ключовим чинником забезпечення ефективності, безпеки та екологічності руху. Погіршення пропускної здатності магістралей, нерівномірний розподіл потоків, дефіцит паркувальних місць та нестабільність транспортного попиту призводять до виникнення системних проблем, таких як затори, збільшення часу поїздок, підвищення аварійності та забруднення навколишнього середовища. Традиційні підходи до управління транспортними потоками, які базуються на ізольованому розгляді транспортних засобів або інфраструктури, вже не здатні забезпечити стабільний та передбачуваний рух.

У зв'язку з цим актуальним стає використання інтегрованих підходів, що передбачають комплексне урахування стану інфраструктури, поведінки учасників руху та транспортних потоків у реальному часі. Система інтеграції дозволяє оптимізувати роботу світлофорних об'єктів, регулювати потоки громадського та приватного транспорту, координувати роботу маршрутної мережі та забезпечувати раціональне використання дорожніх ресурсів. Цей підхід відповідає сучасним вимогам до інтелектуальних транспортних систем (ІТС), які є складовою концепції «розумного міста» та спрямовані на забезпечення сталого розвитку урбанізованих територій [1; 2].

Міська транспортна система складається з трьох основних елементів: транспортні засоби, вулично-дорожня мережа та інформаційні системи управління. Взаємодія між цими елементами визначає ефективність руху. Проблеми виникають у ситуаціях, коли існує дисбаланс між пропускною здатністю інфраструктури та інтенсивністю транспортного потоку. Часто зустрічаються такі чинники:

- обмежена пропускна здатність ключових магістралей;
- нерівномірне розташування транспортних вузлів;
- відсутність централізованого управління потоками;
- слабка координація між різними видами транспорту;
- недостатнє використання цифрових технологій для збору даних та їх обробки [3].

Для усунення цих проблем інтеграція інфраструктури та транспортних систем передбачає не лише модернізацію фізичної складової (розширення доріг, реконструкція перехресть, встановлення сенсорних пристроїв), але й побудову інформаційних каналів взаємодії, які дозволяють відслідковувати стан транспортної мережі в реальному часі та оперативно приймати рішення щодо регулювання потоків.

Інтеграція транспортної системи міста може здійснюватися за кількома напрямками:

Інформаційна інтеграція.

Використання датчиків, камер, GPS-трекерів, телематичних та мобільних систем дозволяє формувати єдину інформаційну базу про стан транспортного середовища. Це дає можливість визначати інтенсивність руху, швидкість транспортних засобів, черги на перехрестях та передбачати потенційні критичні ситуації.

Функціональна інтеграція.

Координація роботи різних елементів інфраструктури, включно з світлофорними об'єктами, парковками, громадським транспортом та логістичними маршрутизаторами. Така інтеграція забезпечує збалансований розподіл потоків і зменшує вплив локальних перевантажень.

Прогностична інтеграція.

Використання алгоритмів машинного навчання та моделей прогнозування для оцінки майбутніх станів транспортних потоків і їх взаємодії з інфраструктурою. Це дозволяє

оптимізувати режими роботи світлофорів, планувати маршрути громадського транспорту, регулювати інтенсивність руху у пікові години [4].

Інтеграція громадського та приватного транспорту.

Застосування пріоритезації маршрутних транспортних засобів, створення смуг для громадського транспорту та координація їх руху із загальними потоками дозволяє підвищити ефективність системи в цілому.

Міжнародний досвід свідчить, що інтеграція інфраструктури та транспортних потоків дозволяє значно покращити ефективність міського руху. Наприклад, у містах ЄС впроваджуються адаптивні світлофорні системи, що регулюють інтенсивність сигналів залежно від завантаження доріг, інтегрують дані громадського транспорту та сенсорів дорожнього руху. Це дозволяє скорочувати середній час поїздки на 15–30 %, зменшувати кількість зупинок та черг на перехрестях, а також підвищувати стабільність транспортних потоків [2; 5].

В Україні такі системи знаходяться на стадії впровадження, проте перші результати свідчать про потенціал інтеграції. Зокрема, встановлення датчиків на ключових магістралях та використання адаптивного регулювання дозволило скоротити час очікування на світлофорах до 20 %, а середню швидкість руху в центральній частині міста підвищити на 10–15 %. Аналіз показує, що подальша інтеграція з громадським транспортом, інформаційними сервісами та логістичними платформами здатна підвищити ефективність ще на 10–15 %.

Основні проблеми, що обмежують ефективність інтегрованих систем у міських умовах, включають:

- технічну застарілість окремих елементів інфраструктури;
- відсутність уніфікованих стандартів обміну даними між різними системами;
- недостатній рівень автоматизації та цифровізації;

обмеженість фінансових ресурсів для модернізації та масштабного впровадження.

Перспективи розвитку інтеграції полягають у створенні єдиних міських платформ управління транспортом, які об'єднують дані з усіх джерел, дозволяють застосовувати прогностичні алгоритми, оптимізують рух приватного та громадського транспорту, а також забезпечують взаємодію з користувачами через мобільні додатки та інформаційні сервіси.

Основні проблеми, що обмежують ефективність інтегрованих систем у міських умовах, включають технічну застарілість окремих елементів інфраструктури, відсутність уніфікованих стандартів обміну даними між різними системами, недостатній рівень автоматизації та цифровізації, а також обмеженість фінансових ресурсів для модернізації та масштабного впровадження. Багато міст стикаються з проблемою несумісності існуючих технологій, що ускладнює інтеграцію сенсорних систем, камер відеоспостереження, систем обліку громадського транспорту та інформаційних платформ. Відсутність уніфікованих протоколів обміну даними створює ситуації, коли кожна система працює ізольовано, що значно знижує ефективність адаптивного управління транспортними потоками.

Іншою суттєвою проблемою є недостатній рівень впровадження інтелектуальних алгоритмів прогнозування та обробки даних у реальному часі. Для того щоб системи інтеграції могли ефективно реагувати на зміни транспортної ситуації, необхідне використання сучасних методів аналізу великих масивів даних, алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж. Відсутність таких технологій призводить до того, що адаптивні режими регулювання не враховують динаміку транспортного потоку, що знижує ефективність системи.

Соціально-економічні фактори також впливають на ефективність інтеграції. Недостатня мотивація учасників руху дотримуватися оптимальних маршрутів, відсутність інформаційних сервісів для водіїв і пасажирів, а також обмежена поінформованість щодо пріоритетів громадського транспорту сприяють формуванню дисбалансу між транспортними потоками та можливостями інфраструктури. Крім того, екологічні вимоги і зростаючий обсяг електричного та мікромобільного транспорту ставлять нові виклики для систем управління, які повинні враховувати різні типи транспортних засобів та їхні характеристики.

Перспективи розвитку інтегрованих систем взаємодії інфраструктури та транспорту передбачають комплексне рішення цих проблем. Насамперед, необхідна модернізація фізичної інфраструктури міста, що включає встановлення інтелектуальних світлофорних

контролерів, сенсорів для вимірювання інтенсивності руху, адаптивних смуг для громадського транспорту та створення комплексних інформаційних платформ управління. Впровадження уніфікованих протоколів обміну даними між різними елементами інфраструктури забезпечить їхню взаємодію та синхронізацію.

Крім технічних заходів, важливо впроваджувати цифрові сервіси для користувачів міста. Це включає інтерактивні карти заторів, системи навігації, повідомлення про оптимальні маршрути та пріоритети громадського транспорту. Такий підхід дозволяє не лише збалансувати транспортні потоки, але й підвищити рівень дотримання правил дорожнього руху та оптимізувати використання ресурсів міської інфраструктури.

У перспективі розвиток інтегрованих систем пов'язаний із застосуванням хмарних обчислень і платформних рішень, що дозволяє обробляти великі обсяги даних у реальному часі та приймати рішення з високою швидкістю. Це забезпечить адаптацію транспортної мережі до коливань попиту, прогнозування критичних ситуацій, оптимізацію роботи громадського транспорту та зменшення впливу пікових навантажень на центральні магістралі.

Нарешті, інтеграція повинна враховувати кібербезпеку та захист інформаційних потоків. Системи, що збирають дані від великої кількості сенсорів і користувачів, потенційно вразливі до кібератак. Надійний захист даних та контроль доступу є обов'язковою умовою для стабільної роботи інтегрованих транспортних систем і збереження довіри учасників руху. Таким чином, комплексна модернізація інфраструктури, застосування інтелектуальних технологій, розвиток цифрових сервісів та забезпечення безпеки даних створюють основу для ефективного функціонування інтегрованих систем у сучасних містах.

Інтеграція транспортної інфраструктури та транспортних потоків у міських умовах є ключовим фактором підвищення ефективності, безпеки та екологічності руху. Системний підхід, що поєднує інформаційну, функціональну та прогнозну інтеграцію, дозволяє:

- оптимізувати роботу світлофорних об'єктів;
- скоротити затримки та черги на перехрестях;
- підвищити пропускну здатність транспортних коридорів;
- забезпечити пріоритет громадського транспорту;
- стабілізувати транспортні потоки та зменшити аварійність.

Подальший розвиток таких систем вимагає модернізації фізичної інфраструктури, уніфікації стандартів обміну даними, інтеграції з цифровими сервісами та впровадження алгоритмів прогнозування. Результати досліджень підтверджують, що системна взаємодія інфраструктури та транспорту є необхідною умовою сталого розвитку міських транспортних мереж.

Література

1. European Commission. Intelligent Transport Systems in Urban Areas: Policy Framework and Implementation Guidelines. Brussels, 2022.
2. Gartner N. Adaptive Traffic Control: Principles and Applications. Transportation Research Record, Washington, 2021.
3. Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V. Overview of Traffic Signal Control Methods. Transportation Science, 2020.
4. ITS World Congress. Integration of Urban Transport Infrastructure and Traffic Management Systems. Hamburg, 2021.
5. TRB. Smart Urban Traffic and Infrastructure Interaction: Research and Best Practices. National Academies Press, Washington, 2023.

THE IMPACT OF ROAD INFRASTRUCTURE WEAR ON THE SAFETY AND EFFICIENCY OF FREIGHT TRANSPORTATION

Kobdikova Sh. M.¹, Asylbekova R. K.², Nokhatov M. A.³

*Almaty Academy of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan named after Makan Esbulatov¹,
sh.kobdikova@gmail.com*

1st year doctoral student,

*Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev,
assylbekovaroza1985@gmail.com*

*2nd-year doctoral student at the Kazakh Automobile and Highway Institute named
after L.B. Goncharov, muzer.7aa@gmail.com*

The development of road infrastructure is one of the key factors for the sustainable socio-economic development of a region. In the Almaty region, as one of the largest transport hubs in Kazakhstan through which international transport corridors such as “Western Europe – Western China,” “North – South,” and others pass, the condition of roadways directly affects the efficiency of freight transport operations.

In recent years, there has been an increase in both transit and intra-regional freight traffic, which leads to higher loads on the road network and accelerated pavement deterioration [1]. The growing share of heavy vehicles, along with insufficient compliance of the geometric and structural parameters of roads with modern requirements, creates risks of reduced traffic capacity, increased accident rates, and higher operating costs.

The aim of this article is to investigate the impact of road infrastructure condition and parameters on the organization of freight traffic in the Almaty region, taking into account international experience and domestic regulations.

Analysis of Scientific and Regulatory Sources

The issue of the interrelationship between road infrastructure and freight transport is widely addressed in both international and domestic studies. According to the findings of [2], freight traffic intensity directly affects the durability of pavement and should be taken into account during the design and reconstruction of highways. Similar conclusions are presented in [5], which notes that heavy vehicles are the primary factor in pavement degradation.

Study [3] established that exceeding axle loads by 10–15% accelerates the deterioration of road structures by 3–4 times, which is consistent with the results obtained in [4] based on the transport network of Bosnia and Herzegovina.

Research [5] considers the concept of infrastructure resilience as the ability of a transport network to maintain its functionality under changing operational conditions and increased loads.

Furthermore, publications [6,7] analyze approaches to forming sustainable transport corridors and optimizing routes, taking into account road condition dynamics and CO₂ emissions. These studies confirm the need for adaptive route planning and redistribution of traffic flows to reduce the load on the most vulnerable sections of the road network.

In the domestic regulatory framework, the key documents include the “*Standards for Vehicle Axle Loads*” [8] and sectoral road design standards [9]. These define the permissible parameters of freight transport, requirements for the structural strength of road constructions, and the rules for designing highways of various types.

According to the *National Report on the Condition of Roads in Kazakhstan* [10], approximately 38% of regional roads in the Almaty region are in unsatisfactory condition, which restricts heavy vehicle traffic, increases logistics costs, and reduces the competitiveness of the region’s transport sector.

Methodological Foundations of the Study

An analysis of the condition of highways in the Almaty region showed that approximately 42% of national roads do not meet the requirements of international transit corridors in terms of carriageway width and pavement category [10]. The following sections are particularly problematic:

- The Almaty – Konaev – Taldykorgan road, characterized by a high degree of pavement wear;
- Access roads to the Khorgos border crossing, where roadside infrastructure and service facilities are underdeveloped;
- Certain segments of the Almaty – Bishkek route, which require modernization in terms of safety and load-bearing capacity.

The impact of traffic flows on pavement was assessed using the Equivalent Single Axle Load (ESAL) method based on the modified AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) formula:

$$N = \sum_{i=1}^k (P_i \times ESAL_i) \quad (1)$$

where, N - is the total impact over the design period;

P_i - the number of vehicles of the i -th type;

$ESAL_i$ - the load equivalency factor;

k - the number of vehicle categories.

For the quantitative analysis, the following parameters were used: traffic intensity – 37,500 vehicles/day; share of freight transport – 13%; average axle load of heavy trucks – 11.5 t. The calculation was performed for the Almaty – Konaev route (Category I-b).

Table 1. Calculation of the total impact of the traffic flow over 10 years

Тип транспорта	Share in traffic, %	Axle load, t	ESAL	Daily number of vehicle	Annual impact ($\times 10^3$)
Passenger vehicles	32625	1.0	0.0004	31987	4.6
Buses	0,17	5.5	0.8	638	1 862
Medium-duty trucks	9	8.5	1.8	3375	2 217
Heavy-duty trucks	4	11.5	3.2	1 500	1 752
Total for the year	—	—	—	37500	4 160

Total impact over 10 years, taking into account a 3% annual traffic growth:

$$N_{10} = 4160341 \times 1.34 = 5.5 \text{ million ESAL}$$

The design pavement life for Category I-b roads, at a design load of $N=2.5N = 2.5N=2.5$ million ESAL (Equivalent Single Axle Load), is achieved over 12 years of operation. The actual value $N_{10}=5.5N_{\{10\}} = 5.5N_{10}=5.5$ million ESAL indicates an exceedance of the normative load by approximately 80%, which reduces the pavement service life to 7 years.

Thus, an increase in the share of heavy vehicles and the exceeding of axle loads significantly accelerate pavement deterioration, increase the frequency of maintenance, and create the need for optimization of routes and operational modes of freight transport.

Current State of Road Infrastructure in the Almaty Region

According to the Committee of Highways of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan, the total length of roads in the Almaty region is approximately 9,000 km, of which about 70% have asphalt concrete pavement. A significant part of

the road network was constructed during the Soviet era and was not designed to withstand modern loads of heavy trucks (up to 11.5 t per axle).

Pavement diagnostics indicate that the International Roughness Index (IRI) in several sections exceeds permissible values (3.5–4.0 dm/km), which reduces driving comfort and safety [11]. Roads of secondary importance, connecting agricultural areas with logistics centers and international highways, remain particularly problematic.

According to the report “*Almaty Region: Transport Development Strategy 2030*” [12], there is a need to increase the load-bearing capacity of pavement structures, widen carriageways, and implement intelligent traffic management systems.

The organization of freight transport traffic directly depends on the physical characteristics of vehicles:

- An increase in vehicle dimensions and weight requires lane widening and shoulder reinforcement;
- A high share of heavy vehicles reduces traffic speed and road capacity, leading to congestion and decreased logistics efficiency;
- Non-compliance with regulatory loads necessitates frequent pavement repairs, negatively affecting the stability of transport operations;
- When organizing traffic, it is important to consider the separation of freight and passenger flows and to provide temporary restrictions on heavy vehicle movement in urban areas [12].

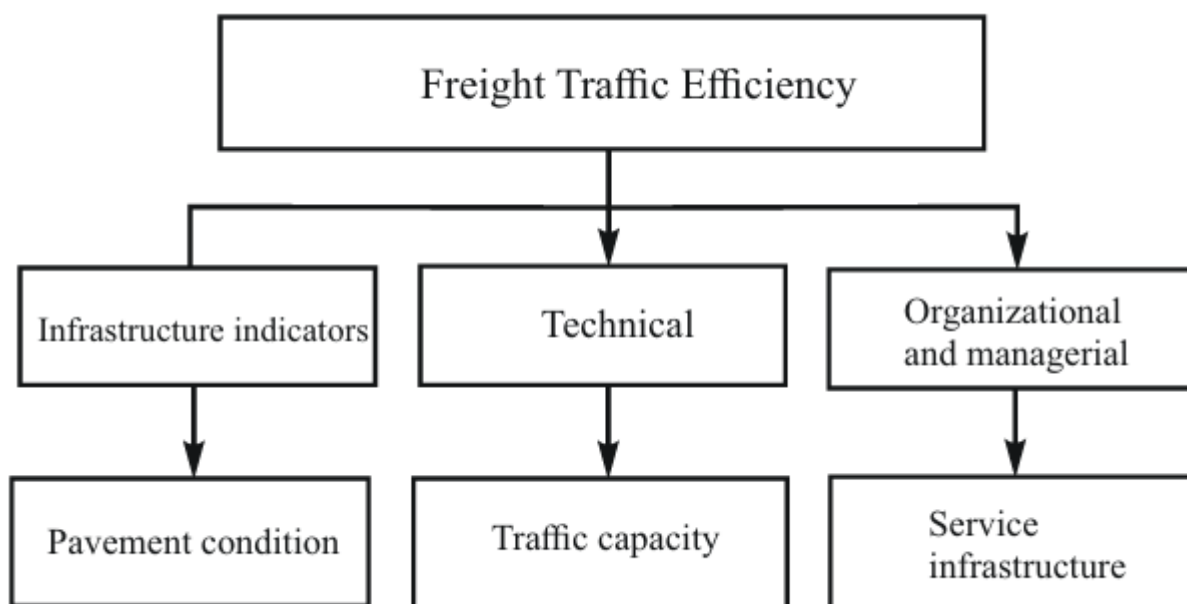


Figure 1. Hierarchical model of the influence of road infrastructure factors on freight traffic efficiency

Research shows that there is a direct relationship between the condition of the road network and the efficiency of freight transport operations. Surface irregularities and pavement defects increase rolling resistance, fuel consumption, and travel time. In addition, poor road conditions reduce the allowable driving speed, increase the risk of traffic accidents, and complicate adherence to delivery schedules.

A lack of traffic capacity leads to congestion at city entrances, necessitating the implementation of traffic distribution schemes and restrictions on heavy vehicle movement during peak hours.

Recent studies recommend optimizing freight vehicle routes based on time of day and road conditions, which helps reduce the load on the most deteriorated sections of the network and decrease CO₂ emissions [9]. The main problems of the transport infrastructure in the Almaty region include the mismatch between pavement strength characteristics and modern traffic loads, a high degree of pavement wear on regional roads, uneven distribution of freight flows, and insufficiently effective control over axle loads of vehicles.

To improve the efficiency of freight traffic management in the region, it is advisable to implement the following measures:

1. Strengthen the weight control system using automated complexes;
2. Implement intelligent traffic management systems at key transport hubs;
3. Develop logistics hubs and bypass routes for optimal traffic distribution;
4. Conduct regular monitoring of pavement conditions using data obtained from connected vehicles;
5. Integrate road planning with ecological and economic sustainability criteria, including reducing CO₂ emissions and optimizing freight vehicle routes.

Applying a comprehensive approach will not only reduce the load on vulnerable road sections but also increase the overall traffic capacity of the network, improve traffic safety, and reduce operational costs.

Conclusion

The condition of the road infrastructure in the Almaty region has a significant impact on the organization of freight transport operations. Insufficient pavement load-bearing capacity, non-compliance of road geometric parameters with modern requirements, and a high level of network deterioration lead to reduced travel speeds, increased operational costs, and a higher risk of accidents.

Analysis of international and domestic studies indicates that effective organization of freight traffic is possible only through a comprehensive approach, which includes:

- Optimizing routes considering network load and time of day;
- Controlling axle loads and vehicle weights;
- Modernizing the road network, widening carriageways, and strengthening pavements;
- Implementing intelligent traffic management systems and road condition monitoring.

The implementation of the Almaty Region Transport Strategy by 2030 will enhance the resilience of transport infrastructure, ensure safe and efficient freight traffic, reduce logistics costs, and minimize negative environmental impacts.

References

1. Committee of Highways of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan. Report on the Condition of the Road Network in the Almaty Region. Astana, 2024.
2. Pérez-Martínez P., Miranda R. Freight Transport Impact on Road Infrastructure Performance. — Transport Research Procedia, 2016.
3. Gorzelańczyk T., Czech P., Olechnowicz P. Impact of Heavy Vehicles on Road Pavement Degradation. — Sustainability, 2023.
4. Petru J., Krivda V. Analysis of Pavement Wear from Overloaded Trucks. — Procedia Engineering, 2021.
5. Injac Z., Drašković D., Amidžić G. The Impact of Freight Vehicle Load on the Condition of Roads in Bosnia and Herzegovina. — Traffic and Transport Theory and Practice, 2024.
6. Orrico Filho R., Hoffmann S., Perim J. Sustainable Freight Corridors: Balancing Load and Infrastructure. — Journal of Transport Geography, 2019.
7. Song R., Qin W., Shi W., Xue X. Optimizing Freight Vehicle Routing in Dynamic Time-Varying Networks with Carbon Dioxide Emission Trajectory Analysis. — Sustainability, 2023.
8. Standards on Vehicle Axle Loads in the Republic of Kazakhstan. Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan, 2024.
9. Standard Norms and Regulations of the Republic of Kazakhstan 3.03-09-2022. Highways. Design Standards. Astana, 2022.
10. National Report on the Condition of the Roads of Kazakhstan. Astana, 2024.
11. Tian Z., Chen F., Ma S., Guo M. Analysis of the Severity of Heavy Truck Traffic Accidents Under Different Road Conditions. — Applied Sciences, 2024.
12. Almaty Region: Transport Development Strategy 2030. Almaty, 2023.

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ПЛАНУВАЛЬНОГО КАРКАСУ СУЧАСНИХ МІСТ

Ширін В. В.¹, Кулик М. М.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²ННЦ "Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса"

shirin.valery@gmail.com

Внутрішнє розосередження населення України, під впливом окремих чинників (природних, соціально-економічних, демографічних), сформувало вже традиційні форми організації проживання на окремих територіях, що утворює населені пункти. Відповідно до законодавства, населеним пунктом називають компактно заселене місце проживання людей, що утворилося внаслідок історичних традицій, господарської та іншої діяльності, має сталий склад населення, власну назву та відокремлену територію із встановленими у передбаченому законом порядку межами [1]. Усі населені пункти, за містобудівними та соціально-економічними характеристиками, поділяються на такі категорії населених пунктів, як: міста, селища, села. Містом вважається населений пункт з переважно компактною забудовою, загальна чисельність жителів якого становить не менш як 10 тисяч. Слід зауважити, що є виключення з такого правила і існують міста зі значно меншим населенням.

Відповідно до наведеного визначення, характерна риса міста – це компактність його забудови і враховуючи, що діяльність міського населення не вимагає суттєвого територіального розосередження, це формує ключову особливість міст, а саме високу концентрацію населення. Зазначена особливість в поєднанні з процесами життєдіяльності людей, що безумовно пов'язані з потребою в переміщеннях як їх самих, так і матеріальних ресурсів, висувають високі вимоги до можливості міської транспортної системи забезпечувати сталий транспортний процес, якість якого, в значній мірі, визначає безпеку і комфорт проживання в місті. При цьому умови формування і управління транспортною системою, а також критерії якості транспортних процесів у містах визначаються архітектурно-просторовою композицією забудови і планувальною структурою міста, що складають його планувальний каркас.

В різні історичні періоди формування і розвиток планувального каркасу міста піддається сукупності різних чинників, більшість яких формується впливом тенденцій розвитку суспільства і його переваг. Останнім часом відбуваються якісні зміни в практиці містобудування, що викликані популяризацією багатоквартирного житла, мінімізацією часу трудових поїздок, деіндустріалізацією економіки, підвищенням технологічності виробничих процесів, змінами екологічних вимог тощо.

Тривалий час основою розвитку міста слугувала його прийнята планувальна структура. Проте останні тенденції містобудівних процесів в містах як України, так і багатьох європейських країн свідчать про відхід від загальновідомих практик функціонального зонування. Окремими характерними містобудівельними прикладами такої тенденції являються: житлова забудова території турбомеханічного заводу у місті Полтава; житлова забудова територій таких промислових підприємств як: «Львівсільмаш», Львівський експериментальний механічний завод, Львівський завод комунального устаткування, Львівський завод будівельних виробів (поруч з Львівським автобусним заводом) у місті Львів; житлова забудова частини території Київського державного заводу «Буревісник» у м. Київ, житлова забудова території, обмеженої вулицями Перемоги, Михайла Грушевського, Покровської (колишній завод) у м. Житомир і інші. Тобто, процес зниження рівня індустріалізації державної економіки супроводжується «розмиванням» меж функціональних зон сучасних міст. Отже, можна припустити, що сучасне містобудування відходить від загальновідомого принципу, основанийому на функціональному зонуванні міст і переходить в стан хаотичної архітектурно-планувальної трансформації, що об'єктивно призводить до несистемного розвитку планувального каркасу міста.

Суттєвий вплив на ефективність транспортного процесу в межах сучасного міста спричиняє розміщення центрів масового тяжіння населення. Цей чинник спричиняє просторову нерівномірність транспортних потоків, оскільки розміщення крупних багатофункціональних центрів, житлових комплексів тощо призводить до зростання попиту на використання вулично-

дорожньої мережі для проїзду і паркування автомобілями в окремих районах міста. Рівень просторової нерівномірності визначається також особливостями планувальної структури міста, наприклад, транзитний рух через центральний транспортний вузол – характерна риса радіальної планувальної структури.

Інша група чинників, що відбивають тенденції розвитку суспільства і популяризацію окремих переваг, формує основу попиту на внутрішні пересування міського населення, вимоги до якого в сучасних практиках називають сталою мобільністю. В офіційний обіг термін «стала мобільність» в Україні введено Розпорядженням Кабінету міністрів «Про внесення змін до Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року», що містить наступне тлумачення: стала мобільність – організація переміщення людей для зниження рівня впливу на навколишнє природне середовище, що передбачає розвиток інтегрованої системи громадського транспорту, мережі пішохідних та велосипедних шляхів [2]. Зміна парадигми міського жителя в контексті здійснення трудової діяльності, культурного життя і громадської активності, проведення дозвілля призводить до інтенсифікації як внутрішніх так і зовнішніх переміщень і, як наслідок, спричиняє зростання транспортного навантаження на планувальний каркас сучасного міста.

Не найкращим чином на процес розвитку планувального каркасу сучасних міст впливає спрощення нормативної бази, що регулює сферу містобудування і зокрема розвитку транспортної системи. Так, наприклад, залишається неоднозначним статус ДБН Б.1-2-95 [3], що був скасований у 2018 році. Окремі положення ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій», які містять вимоги до розробки комплексних схем транспорту, зокрема п. 10.2 зазначеного документу визначає лише загальні вимоги до такого важливого містобудівного документу. Необхідно відзначити, що вимоги до ще одного важливого містобудівного документу – комплексних схем організації дорожнього руху ще більш невизначені і наводяться лише в трьох позиціях п. 10.6 [4].

Значний вплив на ефективність і безпеку транспортного процесу у містах відіграє організація дорожнього руху. Слід відзначити, що організація дорожнього руху – комплексне поняття, що реалізується в двох площинах: 1 – в рамках будівельного процесу і 2- в процесі експлуатаційного утримання вулично-дорожньої мережі. При цьому при експлуатаційному утриманні вулиць і доріг можуть бути реалізовані лише заходи організації дорожнього руху оперативного характеру, такі як закріплення смуг за окремими напрямками руху на перехресті, зміна швидкісного режиму, обмеження паркувального режиму, обмеження маневрування, коригування технологічної частини світлофорних об'єктів тощо. Натомість заходи організації дорожнього руху, віднесені до тактичного і стратегічного рівнів можуть бути реалізовані лише в рамках будівельного процесу, наприклад улаштування паркувального майданчику (без звуження проїзної частини), реконструкція перехрестя збільшення кількості смуг руху, улаштування світлофорного регулювання тощо. Реалізація таких заходів – процес довготривалий і вимагає значних матеріальних і трудових ресурсів, а їх обґрунтованість має бути однією з основних задач, що вимагає формулювання системи показників якості рішень і чітких критеріїв прийняття. Окремо зазначимо, що простежується тенденція застосування організації дорожнього руху як «лікувального засобу», коли нераціональні планувальні рішення щодо забудови міських територій, які спричиняють транспортні проблеми, пов'язані із виникненням заторових ситуацій, недостатнім паркувальним простором тощо, виправляються заходами організаційного характеру, переважно з обмеженнями для учасників руху.

Таким чином, можна стверджувати, що розвиток планувального каркасу сучасних міст України – складний процес, що супроводжується «розмиванням» функціонального зонування, перерозподілом центрів масового тяжіння населення, зміною парадигми міського жителя і лібералізацією нормативного регулювання ключових будівельних процесів.

В зазначених умовах, необхідно наголосити на важливості ролі організації дорожнього руху і необхідності її змістовної імплементації в містобудівні процеси з наданням домінуючого пріоритету, що дасть змогу попереджувати поглиблення транспортних проблем, пов'язаних з постійно зростаючим рівнем автомобілізації і низьким темпом розвитку мережі міських вулиць і доріг.

Література

1. Про порядок вирішення окремих питань адміністративно-територіального устрою України: Закон України від 28.07.2023 № 3285-IX.
2. Про внесення змін до Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету міністрів України від 25 березня 2025 р. № 294-р.
3. ДБН Б.1-2-95. Склад, зміст, порядок розробки, погодження і затвердження комплексних схем транспорту для міст України. Вид. офіц. Київ : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1996. 18 с.
4. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування та забудова територій. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 183 с.

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА ДІЛЯНЦІ МАГІСТРАЛІ РАЙОННОГО ЗНАЧЕННЯ

Набатова М. Є., Левченко О. С.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

maria.nabatova1377@gmail.com, levchenkoelena77@gmail.com

Зростання інтенсивності, зміна структури та швидкісних режимів транспортних потоків висувають дедалі суворіші вимоги до систем управління та організації дорожнього руху, які повинні забезпечити необхідний рівень ефективності та безпеки, при цьому гарантуючи виконання запланованого обсягу перевезень. Найбільші труднощі з організації дорожнього руху виникають на перехрестях вулиць, оскільки вони є «вузькими місцями» на вулично-дорожній мережі (ВДМ) з погляду швидкого обслуговування транспортних та пішохідних потоків. Для керування рухом на перехрестях найчастіше використовують світлофорне регулювання, яке дає змогу підвищити безпеку дорожнього руху, скоротити затримку учасників дорожнього руху, зменшити споживання енергоресурсів та негативний вплив на довкілля, що, своєю чергою, покращує якість життя у містах [1].

В роботі [2] для підвищення безпеки дорожнього руху на прикладі нерегульованого перехрестя вул. Пискунівська – пров. Пискунівський – пров. Лосівський, що розташовується у Холодногірському районі м. Харкова, була доведена доцільність введення світлофорного регулювання. Особливістю цього перехрестя є розташування його в межах Центрального ринку з великою інтенсивністю транспортних і пішохідних потоків, стоянок. На відстані 240 м від центру перехрестя знаходиться регульований пішохідний перехід, а ще через 110 м – складне нерегульоване аварійно-небезпечне перехрестя великою площею: вул. Пискунівська – вул. Різдяна (рис. 1), яке теж потребує заходів спрямованих на підвищення безпеки дорожнього руху.

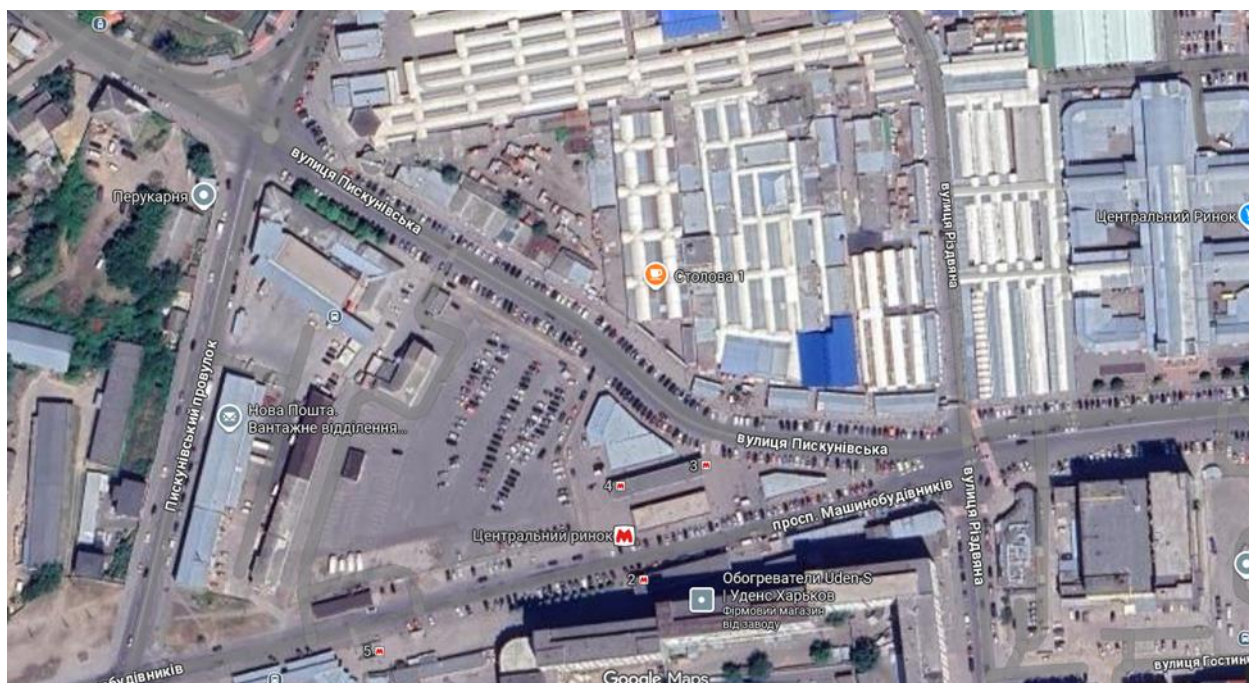


Рисунок 1 – Ділянка, що досліджується

На перехресті вул. Пискунівська – вул. Різдяна пропонується впровадження світлофорного регулювання, звуження проїзної частини за рахунок позначення острівця безпеки, розміщеного на одному рівні з проїзною частиною по вул. Пискунівська.

Цикл світлофорного регулювання буде складатися з трьох фаз і дорівнювати 90 с.

З урахуванням властивостей дорожньо-транспортної мережі та ієрархічного принципу обробки інформації у системах управління, відомі типи управління :

- по окремому напрямку руху ВДМ міста;
- локальний - в межах окремого перехрестя ВДМ;
- магістральний - на сукупності перехресть ВДМ, об'єднаних міської магістраллю;
- районний чи загальноміський - управління рухом у межах окремого району міста або на ВДМ міста в цілому [3].

За кількістю одночасно регульованих перехресть світлофорне регулювання поділяють на автономне і координоване. Під автономним, або ізольованим, керуванням світлофорами розуміють регулювання на одному окремо взятому перехресті без врахування ситуації, яка складається на сусідніх перехрестях. Автономне керування ефективне тоді, коли на нього не впливає світлофорне регулювання на інших перехрестях. Цій умові відповідає відстань між суміжними перехрестями не менше 1000 м [3].

Суть координованого регулювання полягає у взаємопов'язаній роботі групи світлофорів, які забезпечують включення зеленого сигналу до моменту прибуття автомобілів, що рухаються з вирахованою швидкістю. Всі світлофорні об'єкти повинні працювати з однаковою тривалістю циклу регулювання. На окремих пересіченнях допускається тривалість циклу, що кратна основному [3].

Основними перевагами такого регулювання в порівнянні з автономним є:

- підвищення середньої швидкості руху по магістралі;
- зменшення загального часу затримок для транспортних засобів;
- вирівнювання швидкості окремих автомобілів у потоці, що, в свою чергу, сприяє збільшенню пропускну здатності перехресть;
- зниження кількості дорожньо-транспортних пригод (ДТП) на перехрестях.

Для організації координованого управління необхідне виконання наступних умов:

- наявність не менш двох смуг руху в кожному напрямку на магістралі;
- однаковий цикл регулювання на всіх перехрестях, що входять у систему координації;
- відстань між сусідніми перехрестями не повинна перевищувати 1000 м [3].

Перша умова пов'язана з необхідністю організації руху транспортних засобів з розрахунковою швидкістю і своєчасним прибуттям до чергового перехрестя. Їх затримка на перегоні призведе до порушення процесу координованого управління, тому що збільшення часу руху на перегонах сприяє прибуттю автомобіля до перехрестя із запізненням (у період дії сигналу, що забороняє рух). При вузькій проїзній частині імовірність затримки підвищується, тому що об'їзд перешкод на дорозі збільшує час проїзду [3].

Однаковий цикл на всіх перехрестях забезпечує необхідну періодичність зміни сигналів, збереження розрахункового зрушення включення фаз, що дозволяють рух маршрутом координації [3].

Обмеження, що накладається на довжину перегону, пов'язано з процесом групоутворення в транспортному потоці. Група автомобілів утворюється при роз'їзді черги, що зібралася в режимі очікування дозволяючого сигналу світлофора. На початку перегону, безпосередньо за перехрестям, інтенсивність такої групи близька до потоку насичення. У процесі подальшого руху групи автомобілів починається її розпад через різні швидкості транспортних засобів та особливості поведінки водіїв при русі у групі [3].

Аналізуючи умови введення координованого управління і особливості розташування вищезгаданих перехресть, було промодельоване в програмному забезпеченні PTV VISSIM, варіанти організації дорожнього руху на перехрестях вул. Пискунівська – пров. Пискунівський – пров. Лосівський та вул. Пискунівська – вул. Різдяна [4].

Спочатку була розроблена модель ділянки по вул. Пискунівській від вул. Різдяній до пров. Пискунівському з існуючою організацією дорожнього руху (рис. 2).

Потім розроблені моделі окремих перехресть з впровадженням світлофорним регулюванням і планом координації (рис. 3). Світлофорні цикли дорівнюють: на перехресті вул. Пискунівська – пров. Пискунівський – пров. Лосівський 53 с і дві фази регулювання, вул. Пискунівська – вул. Різдяна – 90 с і три фази регулювання.

Третім етапом було розробка координованого управління на ділянці по вул.

Пискунівська від вул. Різдвяній до пров. Пискунівського.

Характерною особливістю цієї ділянки є наявність стоянок вздовж всієї її довжини, що унеможливує введення координованого управління, так як при парковці транспортних засобів замість двох смуг руху залишається одна. А умовою введення координації є наявність не менш двох смуг руху в кожному напрямку. Але в понеділок і починаючи з 16 години в інші дні тижня місця на стоянках лишаються пустими, так як ринок припиняє свою роботу та в цьому місті не має житлової забудови, і знову кількість смуг руху в кожному напрямку становить дві, що дає можливість впровадження координованого руху.

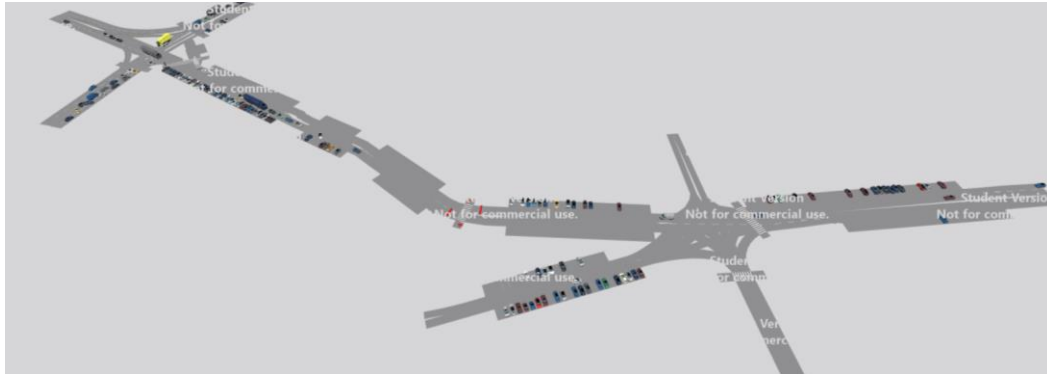


Рисунок 2 – Модель ділянки по вул. Пискунівській від вул. Різдвяній до пров. Пискунівського з існуючою організацією дорожнього руху

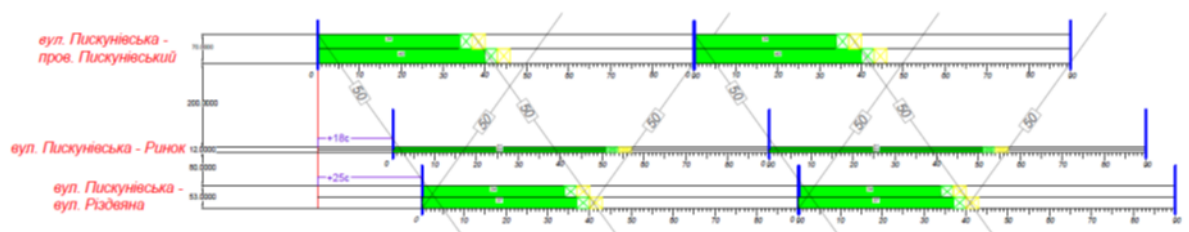


Рисунок 3 – Графік координації на ділянці по вул. Пискунівській від вул. Різдвяній до пров. Пискунівському

Аналізуючи результати моделювання робимо висновок, що з вівторка по неділю з 06.00 до 16.00 світлофорним об'єктам на перехрестях пров. Пискунівський – пров. Лосівський та вул. Пискунівська – вул. Різдвяна доцільно працювати в локальному режимі, а в понеділок і в інші дні тижня з 16.00 до 23.00 - в координованому.

Література

1. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах : монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич ; за заг. ред Є. Ю. Форнальчика. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 236 с.
2. Набатова М. Є., Левченко О. С. Впровадження світлофорного регулювання на перехресті, як один із заходів підвищення безпеки дорожнього руху. Збірка матеріалів 87-ої міжнародної студентської наукової конференції (08-09 квітня 2025 року). Секція «Організація і безпека дорожнього руху». Харків: ХНАДУ, 2025. С.63-67.
3. Абрамова Л.С. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом: Навчальний посібник / Л.С. Абрамова, О.О. Бакуліч. – Х: ХНАДУ, 2014. - 184 с.
4. PTV Vissim 2023 Посібник «Перші кроки». PTV Planung Transport Verkehr GmbH, Karlsruhe, Germany, 2023.

**АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКОВИХ УМОВ
ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ БПЛА В МІСЬКИХ УМОВАХ****Барміна Д. В. здобувачка групи Т-41-22***Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

barminadasha2020@gmail.com

Системи доставки вантажів за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стають одним із найперспективніших рішень у сфері міської та приміської логістики. Зі зростанням попиту на швидкі доставки, особливо для електронної комерції та товарів першої необхідності, БПЛА стають масштабованим, ефективним та сталим рішенням [1]. Основні ймовірні переваги включають той факт, що очікується, що БПЛА значно скоротять час доставки, особливо в перевантажених міських районах, завдяки їхній здатності безпосередньо та швидко з'єднувати два пункти відправлення/призначення, уникаючи наземного руху. Деякі дослідження показали, що доставка товарів за допомогою БПЛА або комбінованого режиму вантажівки та БПЛА може значно зменшити викиди парникових газів (ПГ) та зменшуючи кількість транспортних засобів на маршрутній мережі [2, 3, 4, 5], зокрема з урахуванням таких факторів, як крейсерська швидкість та маса корисного навантаження [6]. Аспекти оптимального маршруту також важливі для досягнення значного скорочення викидів CO₂ [7], хоча таке зменшення залежить від розміру БПЛА та системи підзарядки, особливо стосовно джерел енергії з низьким рівнем викидів [8]. Крім того, БПЛА особливо корисні для досягнення сільських, гірських або постраждалих від стихійних лих районів, де традиційні методи доставки обмежені або дорогі, і можуть забезпечити швидку доставку товарів першої необхідності, таких як медикаменти [9, 10].

Можливості, що пропонуються БПЛА для доставки «останньої милі», не обмежуються скороченням часу доставки, а й поширюються на перетворення повітряного простору на інтелектуальну логістичну інфраструктуру завдяки розвитку нової технології – 3Д мережі. Оптимізоване планування траєкторії в 3D-середовищі може різко зменшити ризик зіткнень, підвищити енергоефективність та забезпечити вищу щільність операцій у міських районах з високим попитом. З операційної точки зору, ці мережі дозволяють створювати «повітряні вузли» та станції обміну на висоті, з яких БПЛА можуть безпечно злітати та приземлятися. Це відкриває нові сценарії для управління доставкою в перевантажених середовищах, дозволяючи децентралізувати розподільчі центри та створювати вертикальні мікросклади, інтегровані з міськими будівлями. Крім того, завдяки використанню алгоритмів управління повітряним рухом на основі штучного інтелекту та зв'язку V2V (транспортний засіб-транспортний засіб) або V2I (транспортний засіб-інфраструктура) [11, 12, 13, 14, 15], можливо координувати рухи багатьох БПЛА у режимі реального часу, зменшуючи ризик заторів та забезпечуючи більшу безпеку.

У багатьох літературних дослідженнях йдеться про очікуваний вплив на навколишнє середовище доставки «останньої милі» за допомогою БПЛА, головним чином шляхом поєднання їх із наземними режимами для оптимізації всього транспортування. Наприклад, вантажівка, обладнана для роботи як мобільний склад, перевозить один або декілька БПЛА, і для виконання доставок використовуються як вантажівка, так і БПЛА [16]. Як виявили деякі дослідження [3,6,17,18], порівняно зі звичайними моделями дорожнього розподілу, системи доставки вантажівками та БПЛА можуть суттєво зменшити викиди парникових газів, особливо на короткі відстані та для невеликої кількості одержувачів, тоді як економічна доцільність сильно залежить від ступеня автоматизації БПЛА. Однак обидві ці системи залежать від оптимізації маршрутів доставки. Що стосується шуму, який є ще одним важливим впливом, пов'язаним з транспортом, деякі результати були отримані завдяки створенню платформи моделювання, яка діє як допоміжний інструмент для аналізу компромісів, що впливають на шум від БПЛА [19]. Дослідження робить висновок, що вищі швидкості та важче корисне навантаження зазвичай призводять до підвищеного рівня шуму в місті.

Час у дорозі, головним чином порівняно з еквівалентними наземними системами, є ще одним важливим елементом при порівнянні моделей доставки на основі БПЛА з наземними. Деякі дослідження показали, що змішані, зокрема синхронізовані, системи вантажівок та БПЛА добре працюють з точки зору часу очікування, залежно від рівня синхронізації та кількості БПЛА, і можуть призвести до значної економії часу та скорочення часу очікування клієнтів [20]. Інші дослідження показали, що оптимальна кількість БПЛА демонструє тенденцію до зменшення зі зростанням граничної ставки, оскільки поріг часу очікування збільшується з 0,3 до 0,7 години, що свідчить про те, що вікна часу доставки є переважаючим фактором, що впливає на визначення необхідного розміру парку БПЛА [20]. Математична модель, яка дозволяє вантажному автомобілю та БПЛА виконувати доставку та забір вантажів в одній місії, оптимізуючи загальний час обслуговування, була розроблена в [21]. За такого підходу БПЛА може перевозити більше посилок, що дозволяє здійснювати більше зупинок за місію, збільшуючи оперативне використання та реагування на очікування клієнтів щодо повернень. Залежно від коефіцієнту повернення та вантажопідйомності БПЛА, числові експерименти показують значну економію часу; зокрема, вони демонструють покращення до 36,2% порівняно з традиційними доставками лише вантажними автомобілями.

Традиційні підходи до маршрутизації транспортних засобів часто мають труднощі з врахуванням реальних складнощів, таких як затори на дорогах, обмеження палива та динамічно мінливі потреби в доставці. У відповідь на ці виклики багатоагентне навчання з підкріпленням є перспективним підходом для покращення спільної логістики вантажівок та БПЛА, пропонуючи децентралізоване прийняття рішень, можливості зміни маршруту в режимі реального часу та інтелектуальний розподіл ресурсів [22]. Фактично, методи моделювання корисні особливо тоді, коли один або декілька елементів розглянутої системи ще не функціонують або все ще перебувають на рівні прототипу, як у випадку більшості БПЛА. З цієї точки зору, «багатоагентні симуляційні моделі» використовувалися в кількох контекстах для моделювання, симуляції та аналізу складних адаптивних систем завдяки їхній здатності представляти розподілені взаємодії, індивідуальну поведінку та динаміку, що розвивається.

Таким чином, можна зауважити, що технологічна система, що лежить в основі логістики постачання за допомогою БПЛА, – що охоплює як літальні апарати, так і допоміжну комунікаційну інфраструктуру, а також нормативно-правові бази та операційні процедури, – залишається в стані розвитку.

Література

1. Drones in last-mile delivery: A systematic review on Efficiency, Accessibility, and Sustainability / V. Garg et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023. Vol. 123. P. 103831. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103831>
2. Figliozzi M. A. Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing air and ground autonomous vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 85. P. 102443. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102443>.
3. Muzylyov D. Medvediev I. Pavlenko O. Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2024, Vol. 1376 (1), 012038.
4. Truck-based drone delivery system: An economic and environmental assessment / A. Baldissieri et al. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 107. P. 103296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103296>.
5. DETERMINING THE OPTIMAL SERVICE AREA OF A LOGISTICS CENTER: A QUANTITATIVE APPROACH / I. TARAN et al. *Transport Problems*. 2025. Vol. 20, no. 3. P. 5–18. URL: <https://doi.org/10.20858/tp.2025.20.3.01>.
6. Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions savings for very small package delivery / T. A. Rodrigues et al. *Patterns*. 2022. P. 100569. URL: <https://doi.org/10.1016/j.patter.2022.100569>.

7. Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization / W.-C. Chiang et al. *Applied Energy*. 2019. Vol. 242. P. 1164–1175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.117>.
8. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery / J. K. Stolaroff et al. *Nature Communications*. 2018. Vol. 9, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02411-5>.
9. Ghelichi Z., Gentili M., Mirchandani P. B. Logistics for a fleet of drones for medical item delivery: A case study for Louisville, KY. *Computers & Operations Research*. 2021. Vol. 135. P. 105443. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105443>.
10. Drone-based medical delivery in the extreme conditions of Himalayan region: a feasibility study / S. Aggarwal et al. *BMJ Public Health*. 2024. Vol. 2, no. 2. P. e000894. URL: <https://doi.org/10.1136/bmjph-2024-000894>.
11. Abboud K., Omar H. A., Zhuang W. Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. Vol. 65, no. 12. P. 9457–9470. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2016.2591558>.
12. Kopytkov D., Pavlenko O. An approach to determine the rational scheme of delivery for the international consolidated shipments. *Комунальне господарство міст*. 2019, № 147 (1), С. 35–41.
13. Pavlenko O., Muzylyov D., Trojanowska J., Ivanov V. Rational Logistics of Engineering Products to the European Union. *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*. Springer. 2023. P. 25–38.
14. Utility maximization data scheduling in drone-assisted vehicular networks / X. Fan et al. *Computer Communications*. 2021. Vol. 175. P. 68–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.04.033>.
15. Нефьодов В.М. Павленко О.В. Побудова моделі системи автомобільних перевезень партійних вантажів в містах. *Комунальне господарство міст*. 2021. 161. С. 187–190.
16. Development of Heuristic Approaches for Last-Mile Delivery TSP with a Truck and Multiple Drones / M. Rinaldi et al. *Drones*. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 407. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7070407>.
17. A review on the truck and drone cooperative delivery problem / R. Zhang et al. *Unmanned Systems*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1142/s2301385024300014>.
18. Koiwanit J. Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system. *Advances in Climate Change Research*. 2018. Vol. 9, no. 3. P. 201–207. URL: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.09.001>.
19. Utility maximization data scheduling in drone-assisted vehicular networks / X. Fan et al. *Computer Communications*. 2021. Vol. 175. P. 68–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.04.033>.
20. Güzey A., Satman M. H. Collaborative Truck/Drone Routing Problem: An Application to Disaster Logistics. *İstatistik ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*. 2024. URL: <https://doi.org/10.52693/jsas.1474515> (date of access: 07.11.2025).
21. Chen H., Hu Z., Solak S. Improved delivery policies for future drone-based delivery systems. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 294, no. 3. P. 1181–1201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.02.039>.
22. Yanpirat N., Silva D. F., Smith A. E. Sustainable last mile parcel delivery and return service using drones. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 124. P. 106631. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106631>.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДНОГО РУХУ В МІСТАХ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ МОБІЛЬНОСТІ

Гусак Є. В., здобувач групи Т-47-22

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
g635953@gmail.com*

Сучасні міста стикаються з низкою транспортних проблем, серед яких – перевантаженість дорожньої мережі, забруднення навколишнього середовища, шум, нестача місць для паркування та низька ефективність пересування в центральних районах. У цих умовах дедалі більшої актуальності набувають альтернативні види транспорту, що поєднують мобільність, екологічність та енергоефективність. Одним із найбільш перспективних рішень є електровелосипед – індивідуальний транспортний засіб, який поєднує переваги традиційного велосипеда та електричного приводу.

Збільшення кількості велосипедів має вирішальне значення для побудови сталих міст. Електричні велосипеди зменшують фізичні зусилля, необхідні для їзди на велосипеді, особливо в горбистих районах та для людей з обмеженими фізичними можливостями, що сприяє зменшенню використання автомобілів та просуванню соціальної рівності [1-4].

Збільшення кількості велосипедів – це ефективна стратегія для підвищення сталості та соціальної стійкості міст. В останні роки електричні велосипеди (електровелосипеди) набули популярності поряд зі звичайними велосипедами (електровелосипедами), особливо в Європі та Північній Америці. Завдяки електричній допомозі, яку забезпечують електровелосипеди, їзда на велосипеді вимагає менших фізичних навантажень, що особливо актуально в горбистих містах, для тривалих поїздок та для людей з меншою фізичною силою, таких як люди похилого віку. Таким чином, електровелосипеди не лише замінюють подорожі на електровелосипедах, але й сприяють загальному зростанню їзди на велосипеді, часто витісняючи інші види транспорту. Тому електровелосипеди докорінно змінюють роль велосипеда як утилітарного виду транспорту, зменшуючи викиди парникових газів, пов'язані з транспортом, сприяючи створенню більш комфортних для життя міст та підтримуючи соціальну рівність.

Електровелосипеди (e-bike) значно розширюють можливості міської мобільності, оскільки дозволяють подолати фізичні обмеження користувачів, збільшити відстань щоденних поїздок та забезпечити швидке пересування без значних енергозатрат. Вони сприяють розвитку сталої транспортної системи, зменшенню рівня автомобілізації, зниженню викидів парникових газів та підвищенню якості життя мешканців міст. У Європі, зокрема у Нідерландах, Німеччині та Данії, електровелосипеди вже становлять значну частку в структурі міських поїздок, демонструючи тенденцію сталого зростання.

У країнах Європейського Союзу електровелосипеди стали одним із найдинамічніше зростаючих видів транспорту. За даними Європейської асоціації виробників велосипедів (CONEBI), у 2023 році в ЄС було продано понад 5,5 мільйона e-bike, що становить близько 30–35 % усього ринку велосипедів. Найвищі показники спостерігаються у Німеччині, Нідерландах, Бельгії, Данії та Франції, де електровелосипеди активно інтегруються в транспортну політику міст.

У цих країнах розвиток e-bike руху підтримується державними програмами субсидування купівлі електровелосипедів, розбудовою мереж безпечних велодоріжок, впровадженням інтелектуальних систем велопрокату та зарядних станцій. Наприклад, у Нідерландах частка електровелосипедів у щоденних поїздках вже перевищує 40%, а в окремих містах – понад половину загального велосипедного трафіку.

У Північній Америці ринок електровелосипедів розвивається більш поступово, однак демонструє стабільне зростання. У США продажі e-bike за останні п'ять років зросли більш ніж утричі, а в Канаді темпи приросту становлять понад 25 % на рік. Міста, такі як Нью-Йорк, Ванкувер, Сан-Франциско та Портленд, впроваджують програми інтеграції електровелосипедів у систему громадського транспорту, розвивають спільні сервіси прокату та створюють спеціальні смуги для безпечного руху. Особливу увагу приділяють

використанню e-bike для доставки товарів і кур'єрських служб, що сприяє зменшенню автомобільного трафіку та викидів CO₂ [5-7].

Попри очевидні переваги, широке впровадження електровелосипедів в українських містах стикається з низкою проблем. До основних бар'єрів належать недостатній розвиток велосипедної інфраструктури, відсутність спеціальних зарядних станцій, небезпека дорожнього руху, правова невизначеність статусу e-bike та низький рівень суспільної обізнаності щодо переваг цього виду транспорту. Більшість міських вулиць досі не пристосована до безпечного руху велосипедистів, що обмежує привабливість електровелосипедів як повноцінного транспортного засобу.

Перспективи розвитку електровелосипедного руху пов'язані насамперед із формуванням інтегрованої міської політики сталої мобільності, яка передбачає збалансований розвиток усіх видів транспорту. Необхідно створити розгалужену мережу веломаршрутів, які забезпечать безпечний, комфортний та безперервний рух e-bike. Важливим напрямом є інтеграція електровелосипедів у систему громадського транспорту, зокрема через організацію пересадкових вузлів, паркінгів та можливість поєднання поїздки на велосипеді з маршрутами метро, трамваїв або електробусів.

Особливу увагу слід приділити розвитку інфраструктури заряджання. Для підтримки зростаючої кількості користувачів e-bike необхідно передбачити доступні зарядні станції у місцях масового відвідування — біля торгових центрів, офісів, зупинок громадського транспорту. Інтелектуальні енергетичні системи (smart grid) можуть забезпечити ефективне управління споживанням енергії та рівномірний розподіл навантажень у мережі.

Важливим фактором розвитку електровелосипедного руху є цифровізація міської мобільності. Інноваційні сервіси, такі як системи спільного користування (e-bike sharing), мобільні додатки для навігації та моніторингу маршруту, розумні парковки й аналітика транспортних потоків, можуть істотно підвищити зручність користування. Використання технологій Інтернету речей (IoT) і штучного інтелекту (AI) відкриває можливості для прогнозування трафіку, підвищення безпеки руху та індивідуалізації транспортних послуг.

Не менш важливою умовою є формування культури безпечного користування. Це потребує систематичного навчання, популяризації велотранспорту, проведення інформаційних кампаній, а також чітких нормативних правил для водіїв електровелосипедів.

Розвиток електровелосипедного руху є одним із ключових напрямів підвищення мобільності в містах і формування сталої транспортної системи. Європейський та північноамериканський досвід доводить, що e-bike можуть стати повноцінною альтернативою приватним автомобілям, якщо забезпечено відповідну інфраструктуру та політичну підтримку.

Для українських міст важливо інтегрувати цей вид транспорту у стратегії розвитку «розумних» і екологічно сталих міст, створивши умови для безпечного, зручного та енергоефективного пересування. Успішна реалізація цього напрямку сприятиме зменшенню заторів, підвищенню якості повітря, економії енергії та покращенню мобільності населення.

Література

1. Arning L., Kathes H. Further, steeper, greener: Implications from an electric bicycle mode choice model. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2025. P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1080/15568318.2025.2533307>.
2. Equity Requirements in US Micromobility Programs Are on the Rise / A. Brown et al. *Findings*. 2024. URL: <https://doi.org/10.32866/001c.124480>.
3. Dash I., Abkowitz M., Philip C. Factors impacting bike crash severity in urban areas. *Journal of Safety Research*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.08.010>.
4. Arning L., Silva C., Kathes H. Review of Current Practice and Research on E-Bikes in Transport Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2023. P. 036119812311688. URL: <https://doi.org/10.1177/03611981231168848>.
5. Bieliński T., Kwapisz A., Ważna A. Electric bike-sharing services mode substitution for driving, public transit, and cycling. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 96. P. 102883. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102883>.

6. The impact of e-cycling on travel behaviour: A scoping review / J. E. Bourne et al. *Journal of Transport & Health*. 2020. Vol. 19. P. 100910. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100910>.
7. Route Choice Decisions of E-bike Users: Analysis of GPS Tracking Data in the Netherlands / G. Dane et al. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Cham, 2019. P. 109–124. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14745-7_7.

ПЕРСПЕКТИВА РОЗВИТКУ БЕЗПЕЧНОЇ ВЕЛОСИПЕДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В МІСТАХ

Сидорчук С. В., здобувачка групи Т-41-22

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
s.valeria.261204@gmail.com*

Велосипед як вид транспорту пропонує як індивідуальні, так і суспільні переваги: їзда на велосипеді позитивно впливає на здоров'я людей; вона майже не створює викидів вуглецю; їзда на велосипеді має нижчі як внутрішні, так і зовнішні витрати, і вона швидша для багатьох міських поїздок, ніж інші види транспорту. Незважаючи на всі ці переваги, частка цього виду транспорту в більшості країн залишається відносно низькою. У Німеччині не більше 11% усіх поїздок здійснюються велосипедом, що мало змінилося за останні десятиліття [1].

На людську поведінку, таку як вибір способу пересування, зазвичай впливають індивідуальні, культурні, соціальні та екологічні фактори. Таким чином, вибір людини щодо використання велосипеда залежить від факторів, які здебільшого дуже важко змінити політичними заходами. Однак, порівняно зі зміною індивідуальних, соціальних чи культурних аспектів, уряди та адміністрації можуть відносно легко змінити забудоване середовище, тобто інфраструктуру. Таким чином, покращення інфраструктури для велосипедистів може бути важливим важелем для збільшення використання велосипедів.

Окрім самої наявності та кількості велосипедної інфраструктури, якість цієї інфраструктури сприяє використанню велосипедів. Однак, як показують Вальєхо-Борда та ін. [2], існуюча література зосереджена переважно на об'єктивно вимірюваних концепціях якості, таких як рівень обслуговування велосипедистів або якість обслуговування. Хоча це дослідження надає дуже релевантні результати для оптимізації велосипедної інфраструктури, об'єктивно вимірювана якість не впливає на використання велосипедів, якщо велосипедисти фактично не відчують цієї якості. Таким чином, індивідуальне сприйняття велосипедної інфраструктури є важливим фактором для рішення людини їздити на велосипеді чи ні.

Сприйняття велосипедистів отримує дедалі більшу увагу в дослідженнях, що призвело до публікації різноманітних досліджень та статей за останні роки [3-6]. У цих дослідженнях для опису сприйняття транспортних процесів в тому числі вплив велосипедистів, використовується велика кількість термінів та категорій. Наприклад, хоча в [3] розрізняють три основні фактори (сенсорна інтерпретація, афективні стани та когнітивна конструкція), в [6] виявили шість кластерів, а саме: психічний комфорт, взаємодія, середовище, зручність використання, фізичний комфорт та пішоходи.

Сприйняття безпеки вважається одним із найважливіших факторів вибору виду транспорту та маршруту [7]. Таким чином, відносно велика кількість досліджень досліджувала сприйняття безпеки велосипедистами.

Було виявлено, що лякаючі інциденти є відносно поширеною подією: «Для звичайних велосипедистів «дуже страшні» інциденти в середньому трапляються щотижня». Автори в [8] також виявили, що велосипедисти оцінюють інциденти з більшими транспортними засобами як більш лякаючі, ніж інциденти без транспортних засобів або з меншими транспортними засобами. Цей висновок узгоджується з іншими дослідженнями, такими як автори в [9]. Автори виявили, що велосипедисти бояться травм, що головним чином зумовлено «страхом бути збитими/переїханими моторизованим транспортом». Це підтверджують в [10], які виявили, що «будь-яка форма фізичного розділення між автомобільною смугою та велосипедною смугою призводить до різкого підвищення суб'єктивної безпеки» [10]. Але велосипедисти також стурбовані інцидентами з іншими учасниками дорожнього руху, такими як конфлікти з пішоходами, і тому схильні уникати пішохідних зон [11]. Однак вони «зважають цей фактор з часом подорожі, орієнтуванням та уникненням руху автомобілів» [12]. Таким чином, як, наприклад, показують автори в [12], уподобання маршрутів та сприйняття безпеки значною мірою взаємопов'язані.

Термін «комфорт» використовується дуже непослідовно в літературі щодо велоспорту. З одного боку, комфорт використовується як загальний атрибут велосипедної інфраструктури. Наприклад, Абаді та Гурвіц в [13] використовують термін «сприйнятий рівень комфорту» для дослідження оцінок учасників різних проектів інфраструктури за шкалою від «дуже незручно» до «дуже комфортно». Таким чином, термін «комфорт» використовується для опису загальної оцінки велосипедної інфраструктури. Апасноре та ін. [14], Фітч та ін. [15] та Шемров та ін. [16] використовують термін «комфорт» подібним чином.

З іншого боку, комфорт також використовується для опису різних специфічних факторів, таких як час очікування, вібрації або безперешкодна їзда. Аячі та ін. [17] описують комфорт як комбінацію ефектів, включаючи компоненти велосипеда, фактори навколишнього середовища, такі як дорожні умови, одяг та погода, а також положення сидіння на велосипеді. Бергхьофер та Фоллрат [18] далі розрізняють психічний та фізичний комфорт, причому перший включає емоції та сприйняття безпеки, а другий включає безперешкодну їзду на велосипеді та гладкість поверхні.

Таким чином, розвиток велосипедного транспорту має значний потенціал для підвищення екологічності та мобільності міського середовища. Ключовим чинником його популяризації є створення якісної та безпечної інфраструктури. Вирішальну роль відіграє не лише технічна якість об'єктів, а й суб'єктивне сприйняття безпеки та комфорту користувачами. Дослідження показують, що фізичне розділення потоків транспорту суттєво підвищує відчуття захищеності велосипедистів. Отже, перспективи розвитку велосипедного руху в містах пов'язані з поєднанням інженерних рішень і врахуванням психологічних аспектів поведінки користувачів.

Література

1. Nobis, C., Kuhnimhof, T., Follmer, R., & Bäumer, M. (2019). Mobilität in Deutschland – MiD: Zeitreihenbericht 2002–2008–2017. URL: <https://elib.dlr.de/133792/>
2. Vallejo-Borda J. A., Rosas-Satizábal D., Rodriguez-Valencia A. Do attitudes and perceptions help to explain cycling infrastructure quality of service?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 87. P. 102539. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102539>.
3. Cycling subjective experience: A conceptual framework and methods review / R. Zhang et al. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2024. Vol. 101. P. 142–159. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.12.021>.
4. Muzylyov D. Medvediev I. Pavlenko O. Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2024, Vol. 1376 (1), 012038.
5. DETERMINING THE OPTIMAL SERVICE AREA OF A LOGISTICS CENTER: A QUANTITATIVE APPROACH / I. TARAN et al. *Transport Problems*. 2025. Vol. 20, no. 3. P. 5–18. URL: <https://doi.org/10.20858/tp.2025.20.3.01>.
6. Can't hold any more! A large survey on cycling subjective experience at the limit of effort / Pérez-Díaz J.-J. et al. *Psychology of Sport and Exercise*. 2026. Vol. 82, 102991.
7. Popp M., Rau H., Mahne-Bieder J. Auf dem Weg zum Fahrradland – Barrieren von Nichttradfahrer*innen identifizieren und überwinden. *Standort*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s00548-023-00903-9>.
8. Aldred R., Crosweller S. Investigating the rates and impacts of near misses and related incidents among UK cyclists. *Journal of Transport & Health*. 2015. Vol. 2, no. 3. P. 379–393. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2015.05.006>.
9. Identifying the determinants and understanding their effect on the perception of safety, security, and comfort by pedestrians and cyclists: A systematic review / M. Campos Ferreira et al. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2022. Vol. 91. P. 136–163. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.10.004>.
10. von Stülpnagel R., Binnig N. How safe do you feel? – A large-scale survey concerning the subjective safety associated with different kinds of cycling lanes. *Accident Analysis & Prevention*. 2022. Vol. 167. P. 106577. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106577>.

11. Winters M., Teschke K. Route Preferences among Adults in the near Market for Bicycling: Findings of the Cycling in Cities Study. *American Journal of Health Promotion*. 2010. Vol. 25, no. 1. P. 40–47. URL: <https://doi.org/10.4278/ajhp.081006-quan-236>.
12. Gkekas F., Bigazzi A., Gill G. Perceived safety and experienced incidents between pedestrians and cyclists in a high-volume non-motorized shared space. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2020. Vol. 4. P. 100094. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100094>.
13. Abadi M. G., Hurwitz D. S. Bicyclist's perceived level of comfort in dense urban environments: How do ambient traffic, engineering treatments, and bicyclist characteristics relate?. *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 40. P. 101–109. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.003>.
14. Apasnore P., Ismail K., Kassim A. Bicycle-vehicle interactions at mid-sections of mixed traffic streets: Examining passing distance and bicycle comfort perception. *Accident Analysis & Prevention*. 2017. Vol. 106. P. 141–148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.003>.
15. Fitch D. T., Carlen J., Handy S. L. What makes bicyclists comfortable? Insights from a visual preference survey of casual and prospective bicyclists. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2022. Vol. 155. P. 434–449. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.008>.
16. Šemrov D., Rijavec R., Lipar P. Dimensioning of Cycle Lanes Based on the Assessment of Comfort for Cyclists. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 16. P. 10172. URL: <https://doi.org/10.3390/su141610172>.
17. Ayachi F. S., Dorey J., Guastavino C. Identifying factors of bicycle comfort: An online survey with enthusiast cyclists. *Applied Ergonomics*. 2015. Vol. 46. P. 124–136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.07.010>.
18. Berghoefer F. L., Vollrath M. Cyclists' perception of cycling infrastructure – A Repertory Grid approach. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2022. Vol. 87. P. 249–263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.04.012>.

ПЕРСПЕКТИВА СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕЮ ЕЛЕКТРОАВТОМОБІЛІВ В МІСТІ

Смєлий В. Ю., здобувач групи Т-44-22

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
smelik13061995@gmail.com*

Електроавтомобілі (ЕА) відіграють дедалі більш важливу роль у сталому розвитку мобільності, проте їхня інтеграція в інфраструктуру розумних міст залишається обмеженою централізованими системами даних, які обмежують масштабованість, загрожують конфіденційності користувачів та підвищують ризики безпеки міста.

Протягом останніх кількох років використання ЕА почало значно зростати у світлі зростання екологічної обізнаності, зменшення запасів викопного палива та потреби в чистих альтернативах у транспорті. Однак швидке зростання мереж електромобілів створює великі проблеми, пов'язані з конфіденційністю даних, безпекою та масштабованістю. Однією з ключових інфраструктур, що підтримує використання електромобілів, є зв'язок між транспортними засобами та зарядними станціями, окрім великої кількості підключених пристроїв. Отже, це містить великі обсяги конфіденційної інформації, пов'язаної з моделями водіння користувачів, споживанням енергії та інформацією про місцезнаходження. Це вимагає надійної, безпечної та ефективної системи для управління даними в поєднанні з безперебійним зв'язком між транспортними засобами, зарядною інфраструктурою, комунальними компаніями та постачальниками послуг.

Ініціативи по розвитку «розумного міста» дедалі більше підкреслюють інтеграцію передових цифрових технологій, управління даними та активного планування для покращення міських послуг та сталого розвитку. ЕА є ключовим компонентом цих систем. Однак вбудовування мереж електроавтомобілів у міста вимагає узгодження зі структурами міського управління, які забезпечують конфіденційність, сумісність та інклюзивність.

Централізований контроль обробки та зберігання даних також становить ще одну серйозну загрозу в сучасних системах для ЕА. Підходи до управління даними, які здебільшого залежать від хмарних серверів або центральних органів влади, стають вразливими до кібератак, а також до єдиної точки відмови та несанкціонованого доступу до даних. Крім того, в цій інтелектуальній транспортній мережі також відсутній децентралізований нагляд, яка схильна до порушень, оскільки вона все ще перебуває на стадії розвитку. Це означає, що в таких мережах підключені пристрої в екосистемі електромобілів постійно створюють та обмінюються даними, не забезпечуючи суворих заходів безпеки. Існує потреба в нових рішеннях, які децентралізуються, водночас враховуючи безпеку та конфіденційність користувачів.

Технологія блокчейн стала однією з перспективних технологій для вирішення цих проблем, що виникають через проблеми конфіденційності та безпеки мереж ЕА. Використовуючи надійні криптографічні протоколи, блокчейни забезпечують цілісність даних та запобігають несанкціонованому доступу, тоді як їхня децентралізована архітектура підвищує стійкість системи, усуваючи єдині точки відмови. Традиційні мережі блокчейнів, такі як Bitcoin та Ethereum, стикаються з труднощами масштабування та енергоефективності. Ці системи менш підходять для контекстів з обмеженими ресурсами, таких як мережі ЕА, яким потрібна висока пропускна здатність транзакцій та низька затримка [1, 2].

Інтеграція блокчейну в електроавтомобілі та автомобілі на паливі створює різні проблеми через відмінності в інфраструктурі та вимогах. Потреби в управлінні даними простіші для традиційних автомобілів на паливі, таких як бензин, дизельне паливо або стиснений природний газ (СПГ). Такі транспортні засоби використовують централізовані системи для управління такими елементами, як відстеження запасів бензину, автентифікація транспортних засобів та платежі, що здійснюються на певних станціях. Хоча блокчейн був протестований з метою підвищення прозорості ланцюга постачання бензину та запобігання шахрайству на заправних станціях, такі транспортні засоби загалом передбачають дуже мало

даних [3]. Як результат, транзакції заправки є одночасно простими та рідкісними, і вже добре керуються існуючими системами, що робить використання блокчейну менш необхідним для транспортних засобів на паливі. Споживання енергії блокчейном плюс усі ці додаткові витрати можуть затьмарити його переваги в цій добре налагодженій екосистемі. Іншою проблемою є той факт, що блокчейн споживає значно більше енергії, що прямо суперечить цілям сталого розвитку як паливних, так і електричних транспортних систем. Однак ця проблема більш очевидна для автомобілів на бензині, які вже завдають великої шкоди навколишньому середовищу.

Навпаки, ЕА вимагають дуже суворого та регулярного обміну даними. Вони постійно перебувають у зв'язку з розумними мережами, тому оптимізують використання енергії, надсилають оновлення щодо зарядки в режимі реального часу, керують маршрутами та виконують операції V2G. Ці величезні вимоги до даних вказують на недоліки традиційних блокчейнів, а також інших платформ для управління даними, які здебільшого стикаються з проблемами, пов'язаними з масштабованістю, високим енергоспоживанням та транзакційними витратами [4]. Хоча блокчейн впроваджує інновації у функціонування мережі електроавтомобілів, його обмеження показують, що існує потреба в спеціалізованих рішеннях, які адекватно відповідають широкій інфраструктурі розумних та сталих міст.

Таким чином, електроавтомобілі є важливим елементом сталого розвитку міського транспорту, однак їх інтеграція у структуру «розумного міста» супроводжується проблемами безпеки, конфіденційності та масштабованості даних. Централізовані системи управління створюють ризики кібератак і втрати даних, тому перспективним напрямом є впровадження децентралізованих технологій. Технологія блокчейн може забезпечити цілісність та захищеність даних, але потребує адаптації до умов високої швидкості обміну інформацією та енергоефективності. Отже, подальший розвиток систем управління мережею електроавтомобілів має бути спрямований на створення безпечних, енергоощадних та масштабованих рішень, здатних ефективно інтегруватися в інфраструктуру «розумних міст».

Література

1. Sable Y. K., Kashyap R. K., Satpute S. Empowering EV Sustainability in Decentralized Energy Environment. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, 2025. P. 234–246. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-032-06665-7_22.
2. T M Swathy. Blockchain Security for IoT Devices in Autonomous Vehicle Networks. *Computer Fraud and Security*. 2024. P. 21–26. URL: <https://doi.org/10.52710/cfs.30>.
3. Enhancing Data Preservation and Security in Industrial Control Systems through Integrated IOTA Implementation / I.-C. Lin et al. *Processes*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 921. URL: <https://doi.org/10.3390/pr12050921>.
4. Vionis P., Kotsilieris T. The Potential of Blockchain Technology and Smart Contracts in the Energy Sector: A Review. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 14, no. 1. P. 253. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010253>.

АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

Капінус С. В., Урденко В. С., Халютін І.Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

e-mail: skapinus13@ukr.net

Ефективність управління транспортними і пішохідними потоками та безпека дорожнього руху значною мірою визначаються якістю організації дорожнього руху, надійністю програмно-технічних засобів систем управління дорожнім рухом. Тому розробка принципів організації дорожнього руху і систем управління транспортними потоками, необхідність використання сучасних технологій зв'язку і управління, розробка принципів управління є вельми актуальною проблемою в даний час [1].

У зв'язку з цим міжнародне співтовариство приділяє значну увагу розробленню та реалізації стратегічних заходів з безпеки дорожнього руху, спрямованих на запобігання дорожньо-транспортному травматизму.

Однією з головних проблем при підвищенні рівня автомобілізації міського населення є зростання затримок ТЗ і, як наслідок, забруднення навколишнього середовища автомобільним транспортом.

Особливу актуальність при вирішенні проблем організації дорожнього руху на перехрестях мають проведення натурних спостережень для отримання об'єктивної інформації про інтенсивність і склад транспортного потоку та моделювання руху ТЗ на перехресті, оскільки їх результати визначають точність рішення більшості завдань в галузі організації дорожнього руху в містах.

Дослідження характеристик дорожнього руху, а також дорожніх умов (геометричні елементи і технічний стан дороги, її обладнання і облаштування) проводять з метою одержання фактичних даних про рух транспортних і пішохідних потоків і перевірки умов забезпечення безпеки дорожнього руху.

Останнім часом для дослідження характеристик дорожнього руху застосовується моделювання руху, що полягає в штучному відтворенні процесу руху фізичними або математичними методами з використанням комп'ютерних технологій.

У даний час моделювання є основним методом досліджень у всіх областях знань і науково обґрунтованим методом оцінок характеристик складних систем, зокрема транспортних.

Проведення експериментальних досліджень на магістралях реальної ВДМ для перевірки схем організації дорожнього руху обмежено по ряду причин, основними з яких є високі витрати на реалізацію експерименту і, що особливо важливо, вимогами забезпечення безпеки ДР [1]. Тому, для дослідження режимів руху АТЗ на магістралях при різних схемах організації дорожнього руху, імітаційне моделювання (ІМ) більш ефективно. Основною перевагою імітаційного моделювання є те, що воно дозволяє досліджувати системи різної складності, в тому числі системи, натурний експеримент для яких не здійснимо з етичних міркувань або пов'язаний з небезпекою для життя або він вимагає значних капіталовкладень.

Для розвитку та вдосконалення вулично-дорожніх мереж міст у світовій практиці має місце застосування транспортного планування та моделювання. З цією метою було проведено аналіз переваг та недоліків програмних продуктів імітаційного моделювання [2-5]:

- Aimsun. Моделювання транспортних потоків;
- AnyLogic. Система AnyLogic підтримує три технології створення імітаційних моделей: процесно-орієнтовані, системно-динамічні та агентні, а також будь-які їх комбінації.
- Arena. Arena – система дискретного моделювання. Сферою основних сфер застосування системи є імітаційне моделювання виробничих технологічних процесів та операцій, складських облік, транспортні завдання;
- PTV Vissim. Програмне рішення, що дозволяє створювати імітаційні транспортні мікро – та мезомоделі. За допомогою таких моделей можна розробляти ефективні рішення для

організації дорожнього та пішохідного руху. Наприклад: перевірка інженерних гіпотез для організації ДР, візуалізація дорожнього та пішохідного руху, проектний супровід та аналіз схем управління ДР, моделювання транспортних потоків для автоматизованих систем управління ДР, оптимізація світлових циклів;

- PTV Visum. PTV Visum – програмне рішення, що дозволяє створювати математичні моделі транспорту макрорівня. За допомогою таких моделей можна оцінити запропоновані рішення щодо розвитку транспортних систем міст, мегаполісів, регіонів, країн;

- PTV Viswalk. PTV Viswalk – програмне рішення, яке призначене для моделювання поведінки пішоходів. Воно дозволяє моделювати масові заходи, планувати евакуаційні дії тощо;

- RITM³. Багатофункціональний програмний продукт, що дозволяє інтегрувати дані про транспортні дані про транспортні потоки в єдиний інформаційний простір, візуалізувати отримані дані в режимі реального часу, аналізувати їх та прогнозувати розвиток транспортної ситуації для підтримки прийнятих рішень в області управління транспортними потоками.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки програмних продуктів імітаційного моделювання

Програмний продукт ІМ	Переваги	Недоліки
1	2	3
Aimsun	Підтримує макро-, мезо та мікромоделювання транспортних потоків, інтегрується з GIS, SUMO, VISSIM, імпортує та експортує дані, моделює поведінку водіїв, затримки, світлофори та ін. фактори.	Висока вартість, вимоги до потужного ПК, необхідність навчання, обмежена підтримка української мови, розрахунки великих мереж можуть бути тривалими.
Arena	Зручний графічний інтерфейс, висока швидкість розрахунків, інтеграція з Excel, Access, SQL, гнучкі налаштування моделей, вбудовані статистичні інструменти.	Обмежена підтримка безперервного та агентного моделювання, слабка 3D-візуалізація, складне навчання, висока вартість ліцензії, не підтримує гібридні моделі.
PTV Vissim	Детальний аналіз поведінки водіїв і пішоходів, оптимізація світлофорного регулювання, оцінка ефективності управлінських рішень, висока точність моделювання, гнучкість налаштувань, якісна візуалізація, інтеграція з іншими транспортними моделями, підтримка автоматизованих систем управління дорожнім рухом.	Висока вартість, великі вимоги до продуктивності, складність у навчанні, обмежена ефективність у макромоделюванні.
AnyLogic	Підтримує три типи моделювання (дискретно-подієве, системно-динамічне, агентне) та інтеграцію з Java, має зручний інтерфейс і хмарну підтримку.	Висока вартість ліцензії, значні вимоги до ресурсів, необхідність знання Java, складність навчання, обмежена 3D-візуалізація

Продовження таблиці 1

1	2	3
PTV Visum	Аналіз транспортних потоків, оцінка впливу інфраструктурних змін, прогнозування майбутніх потреб міста та регіонів, багатофакторний аналіз, інтеграція з іншими програмами, оптимізація маршрутів громадського транспорту та дорожньої інфраструктури.	Висока вартість, складність у використанні, значні вимоги до обчислювальних ресурсів, тривалий час розрахунків для великих моделей.
PTV Viswalk	Аналіз натовпу, планування евакуацій та оптимізації міського простору, відтворює поведінку пішоходів у різних умовах, оптимізація транспортних вузлів, підтримує 3D-візуалізацію, інтегрується з PTV Vissim.	Висока вартість, складність у використанні, значні вимоги до обчислювальних ресурсів, обмежена автономність.
RITM ³	Інтеграція транспортних даних у єдиний інформаційний простір, підтримка автоматизованих системи управління дорожнім рухом, оптимізація транспортних потоків, допомагає зменшити затори та покращити екологічну ситуацію.	Висока вартість, вимагає кваліфікованих спеціалістів для налаштування, залежить від наявності розвиненої інфраструктури датчиків і камер.

На основі результатів аналізу сучасних програмних продуктів імітаційного моделювання руху транспорту на перехрестях обґрунтовано доцільність використання програмного продукту PTV VISSIM, перевагами якого є наочність представлення результатів моделювання, з мінімальними грошовими та часовими витратами.

Література

1. Кашканов А.А., Кужель В.П. Організація дорожнього руху: навчальний посібник. Вінниця, 2016. 125 с.
2. Офіційний сайт компанії PTV AG. URL: <http://www.ptv.de>.
3. Офіційний сайт компанії Aimsun. URL: <http://www.aimsun.com>.
4. Офіційний сайт компанії Rockwell Automation. URL: <http://www.arenasimulation.com>.
5. Офіційний сайт компанії AnyLogic. URL: <http://www.anylogic.com>.

МІКРОХАБИ В МІСЬКІЙ ЛОГІСТИЦІ ОСТАННЬОЇ МИЛІ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ОРГАНІЗАЦІЮ ДОСТАВКИ

Свічинська О. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

svichinskayaolga@gmail.com

Урбанізація та зростання електронної комерції суттєво збільшили навантаження на міські логістичні системи, особливо на етапі «останньої милі» – доставки товарів до кінцевого споживача. Цей етап є найдорожчим, найменш ефективним і найбільш нестабільним у логістичному ланцюзі, оскільки він залежить від транспортної інфраструктури міста, заторів, доступності вулиць, обмежень руху та часових вікон доставки. У таких умовах управління запасами потребує адаптації: традиційні моделі циклу замовлення та рівномірного споживання запасів не завжди працюють ефективно, оскільки змінюється передусім надійність та стабільність строків поповнення запасів, що на пряму впливає на величину страхового запасу та частоту поставок.

Актуальність проблеми полягає в тому, що інфраструктурні обмеження міста теж формують логістичні ризики: затримки доставки, невизначеність транспортних маршрутів, підвищення вартості останньої милі та потребу у нових форм організації складів, наприклад мікроскладів. Як зазначено в [1], ефективність міської логістики значною мірою залежить від того, як компанії адаптують свої стратегії поповнення запасів до просторових і транспортних характеристик міста.

В роботі [1] проведено аналіз джерел датованих після 2010 року, з метою виявлення основних проблем та можливостей для сталості в міських вантажних перевезень. Автор класифікує виклики останньої милі за чотирма проблемними категоріями:

- технологічні проблеми пов'язані зі складністю інтеграції нових транспортних засобів (наприклад, електровелосипеди, дрони), законодавчими бар'єрами та безпекою;
- інфраструктурні, які пов'язані із обмеженим простором для вантажного транспорту, вузькі дороги, проблеми паркування, обмежений доступ до зон доставки;
- системні або управлінські: кількість зацікавлених сторін (перевізники, мери, логістичні компанії) та складність координації між ними;
- витратні (вища вартість доставки, особливо коли моделі не оптимізовані або не враховують невиконані доставки).

Також автор виокремлює можливості для покращення: використання екологічних транспортних засобів, цифрових технологій для оптимізації маршрутизації, співпраці між різними зацікавленими сторонами в ланцюзі поставок (виробниками, постачальниками, владою, кінцевими споживачами), оптимізації інфраструктури через збільшення мобільних складів, пунктів видачі для скорочення відстаней доставки.

В роботі [2] проведено детальний аналіз 17 емпіричних кейсів мікрохабів з Європи та Північної Америки, щоб розробити їх типологію та спільну класифікацію. Автори визначають мікрохаби як вузли останньої милі, розташовані ближче до отримувачів, з обмеженою географічною зоною доставки, що сприяє зменшенню викидів, зниженню заторів і підвищенню сталості вантажних потоків. Вони підкреслюють, що успіх мікрохабів залежить від координації між постачальниками, перевізниками та міською владою. Хоча стаття не фокусується безпосередньо на моделях управління запасами, її висновки доречні для теми останньої милі логістики, оскільки мікрохаби виконують роль проміжних складів, дозволяючи консолідувати товари ближче до кінцевих споживачів, координувати поповнення запасів між різними логістичними учасниками та знижувати екологічне навантаження, що також впливає на стратегічне планування страхових запасів.

У статті [3] узагальнено сучасні інструменти аналітики міської логістики, що дедалі активніше застосовуються на етапі «останньої милі». Автори описують мультиагентні моделі як механізм відтворення логістичної поведінки й оцінювання рішень з позиції витрат, сталості та енергоспоживання, підкреслюють роль цифрових двійників у синхронізації фізичних і

віртуальних потоків, а також розглядають концепцію гіперзв'язаної логістики та системи спільних складів.

Робота [3] задає концептуальну основу для застосування класичних моделей управління запасами, що використовуються при плануванні поповнення запасів та просторовій організації логістичних мереж у міському середовищі, зокрема на рівні міських хабів і мікроскладів. У випадку стохастичного попиту визначення рівня страхового запасу традиційно базується на вибраному сервісному рівні та статистичних характеристиках попиту протягом часу постачання. Такі моделі узгоджуються з логікою, яку автори пропонують реалізувати за допомогою мультиагентних підходів, цифрових двійників та інтелектуальних систем прогнозування попиту.

Дослідники [4] створили агент-орієнтовану симуляційну модель для оцінки впровадження автоматизованих пунктів видачі у системі останньої милі. У моделі агенти (перевізники, клієнти, точки видачі) взаємодіють, і симуляція показує, що використання пунктів видачі зменшує кількість невдалих спроб доставки, вантажні пробіги, а також зовнішні витрати (викиди, шум, затори).

Ще один підхід розглянуто у роботі [5], де автори інтегрували доставку «останньої милі» в агент-орієнтовану модель попиту на поїздки. У моделі агенти представляють пасажирів, споживачів доставки та кур'єрів, що дає змогу одночасно симулювати пасажирський трафік і процес організації доставки.

Такий підхід дозволив оцінити, як поведінка населення впливає на логістичні показники:

- **успіх доставки** – посилка доставляється з першої спроби, якщо кур'єр прибув у момент перебування одержувача вдома;
- **кількість спроб доставки** – модель враховує ймовірність перебування одержувача вдома, визначає число повторних спроб і оцінює їхній вплив на витрати часу та ресурсів;
- **маршрутні рішення** – моделюється порядок відвідування адрес кур'єрами та зміни маршруту у разі повторних спроб доставки;
- **динаміка попиту** – відстежується ймовірність та частота онлайн-замовлень протягом дня, а також поведінкові фактори, що впливають на формування попиту.

В роботі безпосередньо не розглядаються моделі управління запасами, але результати дослідження є релевантними для міської логістики, оскільки агент-орієнтований підхід дозволяє враховувати обмеження міської транспортної інфраструктури та поведінкові фактори, що впливають на планування поповнення запасів у міських хабах та мікроскладах.

У дослідженні [6] також запропоновано агентно-орієнтовану симуляційну модель для оцінювання міських логістичних схем, зокрема політик доступу, консолідації вантажів та регуляторних заходів. Модель описує взаємодію основних учасників процесу – перевізників, відправників і міської влади – та дозволяє оцінити наслідки різних сценаріїв з точки зору витрат, викидів і ефективності міського транспорту. Дана робота показує, як зміни в міській транспортній інфраструктурі та політиці можуть опосередковано впливати на потребу у запасах, частоту поповнення та розташування міських хабів та мікроскладів.

Огляд сучасної літератури демонструє, що проблематика доставки «останньої милі» визначається не лише логістичними витратами, а й обмеженнями міської інфраструктури та системними складнощами. Мікрохаби виступають корисним інструментом підвищення ефективності та сталості міських логістичних процесів, оскільки вони забезпечують консолідацію вантажів, скорочують пробіги важких транспортних засобів і сприяють впровадженню екологічних режимів доставки. Водночас дослідження показують різноманіття типологій мікрохабів, які можуть мати приватне або державне фінансування, різні форми співпраці та відрізнятися за пріоритетами – економічними, екологічними чи соціальними. Використання сучасних цифрових технологій, таких як Інтернет речей, штучний інтелект та цифрові двійники, відкриває нові можливості для моделювання, прогнозування та оптимізації логістики останньої милі. Особливої уваги заслуговують агентно-орієнтовані симуляції, які дозволяють моделювати поведінку учасників міської логістичної системи, враховувати невизначеність, наприклад, повторні спроби доставки, а також змінні політики міської влади та обмеження транспортної інфраструктури. Узагальнено, ці дослідження підкреслюють

важливість інтегрованого підходу, що поєднує фізичні та цифрові елементи логістичної мережі для підвищення ефективності управління запасами та організації доставки в умовах складної міської інфраструктури.

Література

1. Bosona T. Urban freight last mile logistics – challenges and opportunities to improve sustainability: a literature review. *Sustainability* 2020. Vol.12 (21). 20 p.
<https://doi.org/10.3390/su12218769>.
2. Katsela K., Guneş S., Fried T., Goodchild A., Browne M.. Defining urban freight microhubs: a case study analysis. *Sustainability* 2022. Vol.14 (1), 27 p.
<https://doi.org/10.3390/su14010532>.
3. Taniguchi E., Thompson R.G., Qureshi A.G. Recent developments in urban freight analytics for collaborative city logistics. *Transportation research procedia*. Vol. 79. 2024. P. 3-12.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.03.003>.
4. Alves R., Lima R., Custodio D., Holguin-Veras J. Agent-based simulation model for evaluating urban freight policy to e-commerce. *Sustainability* 2019. Vol. 11 (15). 19 p.
<https://doi.org/10.3390/su11154020>.
5. Reiffer A., Kubler J., Briem L., Kagerbauer M., Vortisch P. Integrating urban last-mile package deliveries into an agent-based travel demand model. The 12 th international conference on ambient systems. Networks and technologies (ANT) March 23-26, 2021. Warsaw, Poland. *Procedia computer science*. Vol. 184 (2021). p. 178-185.
6. Heeswijk W.J., Mes M., Schutten M., Zijm H. Evaluating urban logistics schemes using agent-based simulation. *Transportation science*. Vol. 54. 2020. P.651-675.

СЕКЦІЯ 4. ІНТЕГРАЦІЯ СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ НА ДОРОГАХ

УДК 656.1

ІННОВАЦІЙНІ ЗАСОБИ ЗАПОБІГАННЯ ДТП

Бажинов Ан. В.^{1,2}, Сіренко О. С.², Плотников М. О.¹

¹Харківський автомобільно – дорожній фаховий коледж

²Харківський національний автомобільно – дорожній університет

bazhinov62@ukr.net

Важливу роль в процесі розробки ефективного механізму запобігання ДТП відіграють технології штучного інтелекту. Так, наприклад, достатньо відомий у світі ChatGPT дав наступну відповідь на питання «Які інноваційні засоби слід застосовувати для запобігання дорожньо - транспортним пригодам»: «запобігання дорожньо-транспортним пригодам вимагає впровадження інноваційних підходів та технологій. Ось деякі засоби та інновації, які можуть сприяти зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод:

- системи аварійного гальмування (Automatic Emergency Braking — АЕВ): ці системи виявляють можливі загрози зіткнення, в результаті чого автоматично спрацьовують гальма, щоб запобігти або зменшити тяжкість зіткнення;
- системи адаптивного круїз-контролю (Adaptive Cruise Control – ACC): ACC використовує сенсори для підтримання безпечної відстані між автомобілями та автоматичного регулювання швидкості руху;
- системи попередження водіїв про виїзд за межі смуги руху (Lane Departure Warning — LDW і Lane Keeping Assist – LKA): LDW нагадує водіям про виїзд за межі смуги руху, а LKA може надавати допомогу у керуванні для повернення автомобіля на свою смугу;
- системи допомоги у паркуванні (Parking Assistance Systems): ці системи надають допомогу водіям у точному паркуванні та уникненні зіткнень;
- електронні системи допомоги при керуванні (Electronic Stability Control — ESC): ESC виявляє втрату контролю над автомобілем та намагається відновити стабільність шляхом автоматичного керування гальмами на окремих колесах;
- системи моніторингу мертвих зон (Blind Spot Monitoring — BSM): BSM виявляє транспортні засоби у мертвих зонах та надає водіям сповіщення про це;
- системи розпізнавання дорожніх знаків та обмежень швидкості (Traffic Sign Recognition – TSR): TSR автоматично визначає дорожні знаки та обмеження швидкості та повідомляє водіїв;
- використання штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (Machine Learning): ШІ може аналізувати величезний обсяг даних про дорожні пригоди та дорожні умови, щоб ідентифікувати та прогнозувати ризики для запобігання дорожньо-транспортним пригодам;
- впровадження систем «розумних» доріг (Smart Roads): розробка інфраструктури зі вбудованими сенсорами та комунікаційними системами, які можуть надати водіям розширену інформацію про дорожні умови та загрози небезпеки;
- системи допомоги водіям з огляду на втоми (Driver Fatigue Monitoring Systems): системи, що виявляють ознаки втоми водія та надають рекомендації щодо перерв у керуванні.

Перелічені інноваційні засоби спрямовані на поліпшення безпеки дорожнього руху та запобігання аваріям. Однак важливо поєднувати їх з ефективною освітою водіїв та стратегіями дорожньої безпеки для досягнення найкращого результату».

Водночас на питання «Які інноваційні засоби профілактики дорожньо-транспортних пригод можуть зменшити кількість аварій на дорогах» ChatGPT дав наступну відповідь:

«Профілактика дорожньо-транспортних пригод передбачає використання інноваційних засобів та методів для запобігання аваріям та зменшення їх тяжкості. Ось додаткові інноваційні засоби та підходи, спрямовані на профілактику дорожньо-транспортних пригод:

- системи аналізу та прогнозування дорожніх пригод: використання аналітичних даних, штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу історичних даних про дорожньо-транспортні пригод, погодних умов, дорожньої інфраструктури та поведінки водіїв для прогнозування та уникнення дорожньо-транспортних пригод;
- електронні бортові системи для оцінки водійських навичок: системи, що аналізують стиль водіння, реакцію на ситуації на дорозі та загальну уважність водіїв, та надають рекомендації для поліпшення безпеки;
- додатки для мобільних пристроїв (смарт-фонів) для безпеки водіїв: спеціалізовані мобільні додатки, які надають інформацію про дорожні умови, сповіщення про небезпеку та інші корисні поради водіям;
- системи моніторингу водійської уваги та втоми: використання камер та датчиків для виявлення ознак втоми та невідповідності увазі, що може призвести до дорожньо-транспортних пригод;
- системи допомоги водіям під час навчання та тестування: використання віртуальної реальності та симуляторів для навчання водіїв та оцінки їхніх навичок без реального ризику аварій;
- технології сповіщення про небезпеку та екстрені ситуації: використання систем сповіщення, які автоматично передають інформацію водіям та службам безпеки дорожнього руху про потенційно небезпечні ситуації на дорозі;
- використання систем «розумного» транспорту: розвиток інтеркомунікаційних технологій для взаємодії між транспортними засобами, щоб запобігати зіткненням та оптимізувати рух на дорозі;
- поширення використання електромобілів та технології автономного керування: автономні автомобілі можуть сприяти запобіганню аварій, оскільки вони використовують передові системи датчиків та штучного інтелекту для уникнення зіткнень та дотримання правил дорожнього руху;
- електронні бар'єри та інфраструктура для зменшення швидкості: використання технологій для автоматичного обмеження швидкості на небезпечних ділянках доріг та в місцях з високим ризиком дорожньо-транспортних пригод;
- ефективна освіта та інформування громадськості: використання мультимедійних засобів, відеореклами, соціальних мереж та інших каналів для надання водіям та громадськості інформації щодо правил дорожнього руху, безпеки та ризиків, пов'язаних із порушенням Правил дорожнього руху.

Ці інноваційні підходи спрямовані на покращення безпеки дорожнього руху та зниження кількості дорожньо-транспортних пригод. Інтеграція цих засобів у загальну стратегію безпеки на дорогах може значно зменшити травматизм та загибель на дорогах.

Таким чином, ChatGPT надає достатньо слушні поради щодо використання інноваційних засобів профілактики та запобігання ДТП, які потребують відповідної адміністративно-правової регламентації та імплементації в реальну практичну діяльність щодо забезпечення безпеки дорожнього руху.

Сучасні технології дозволяють мінімізувати негативні фактори, які призводять до ДТП, проте їх впровадження в існуючу систему забезпечення безпеки дорожнього руху потребує суттєвих інвестицій та багато часу. До таких технологій слід віднести:

- стаціонарні цифрові камери автоматичної фіксації порушень правил дорожнього руху — їх розміщення на всіх транспортних розв'язках, автомагістралях та вздовж доріг у населених пунктах потребує суттєвих капіталовкладень, проте дозволяє мінімізувати витрати на патрулювання вулиць та усуває корупційні ризики у даній сфері суспільних відносин;

— автоматизовані системи контролю швидкості, напрямку руху, дистанції між автомобілями та іншими перешкодами, а також системи виявлення стану сп'яніння, рівня стресу (втоми) у водія, які встановлюються на сучасних автомобілях — такі системи значно збільшують вартість транспортного засобу, проте їх використання дозволяє значно знизити ризик зіткнення транспортних засобів, а також не допустити помилки водія в оцінці дорожньої обстановки та виборі необхідного маневру;

— транспортні засоби із вбудованим автопілотом, який повністю замінює водія — технологія майбутнього, яка дозволить організувати дорожній рух засобами штучного інтелекту (потребує суттєвих інвестицій та тривалого часу заміни існуючого автопарку та побудови відповідної транспортної інфраструктури);

— «розумну» транспортну інфраструктуру, яка автоматично визначає рівень навантаження на автомагістралі і корегує сигнали світлофорів та інформаційно-вказівних знаків на дорогах, перекидає рух у випадку загрози настання аварійної ситуації тощо (як приклад — це автоматизовані висувні загородження (дорожні блокератори — болларди) на перехрестях, які блокують рух дорогою, коли для водіїв горить червоне світло).

Найбільш перспективним інноваційним засобом профілактики та запобігання ДТП є використання технології «штучного інтелекту», яка все більше проникає в індустрію автомобільного транспорту та дозволяє поступово мінімізувати роль людини в управлінні транспортними засобами.

Перспектива подальшого дослідження даної тематики обумовлена необхідністю внесення змін до чинного адміністративного законодавства щодо правової регламентації застосування інноваційних засобів профілактики та запобігання ДТП.

Література

1. Про схвалення Стратегії підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.10.2020. № 1360-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80#Text>

2. Орлов Ю.Ю., Джужа О.М., Орлова О.Ю. Синергетика та пізнання правових явищ. *Науковий вісник Національної академії внутрішніх справ*. 2014. № 1. С. 75-90.

3. Чеславський Л. Штучний інтелект допомагає Дубаю запобігати ДТП. 22.09.2019. SPILNO. URL: <https://spilno.org/news/shtuchnyi-intelekt-dopomahaye-dubayu-zapobihaty-dtp>

4. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні: розпорядження Кабінету міністрів України від 2 грудня 2020 р. № 1556-р. Дата оновлення: 29.12.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>

ПРОБЛЕМИ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ МІСТ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Градова Є. О.

Криворізький національний університет

evgeniyagradoval93@knu.edu.ua

Анотація. Розглянуто комплекс проблем обумовлених воєнним станом та основні виклики з якими зіштовхуються транспортні системи українських міст. Обґрунтовано доцільність використання цифрових технологій для подання кризових явищ та формування стратегії сталого відновлення

Проблематика. Воєнний стан, введений у зв'язку з повномасштабною агресією Російської Федерації проти України, серйозно вплинув на всі сфери суспільного життя, включно з транспортною системою міст. Масштабні руйнування інфраструктури, зниження мобільності населення та зростання безпекових ризиків вимагають нових підходів до управління міським транспортом.

Основні проблеми транспортної системи в умовах війни:

1. Руйнування транспортної інфраструктури — дороги, мости, залізничні вузли, депо.
2. Перебої у функціонуванні громадського транспорту через дефіцит пального, пошкодження рухомого складу.
3. Порушення логістичних ланцюгів та проблеми з вантажоперевезеннями.
4. Зниження безпеки пересування через ризик обстрілів, мінування територій.
5. Вимушена міграція населення, зміна транспортних потоків.

Основні матеріали дослідження. Одним із шляхів вирішення цих проблем є впровадження цифрових технологій, а саме:

1. **Цифрове картографування та моніторинг стану інфраструктури** . У період воєнного стану особливо важливо оперативно отримувати точну інформацію про стан транспортної інфраструктури. Для цього використовуються супутникові знімки, аерофотозйомка з дронів, а також геоінформаційні системи (ГІС), які дозволяють формувати інтерактивні мапи пошкоджень. Такі інструменти дають змогу швидко виявити критично зруйновані ділянки, пріоритезувати їхнє відновлення та ефективно координувати ремонтні роботи. Крім того, цифровий моніторинг дозволяє стежити за прогресом відновлення у реальному часі, що забезпечує прозорість та контроль з боку громадськості й міжнародних партнерів.

Розумне планування маршрутів — використання аналітичних платформ, що працюють з великими масивами даних (Big Data), дозволяє оптимізувати транспортні потоки навіть у кризових умовах. Військові загрози, блокпости, аварії чи зруйновані ділянки можуть оперативно враховуватись при прокладенні нових маршрутів. Це забезпечує більш ефективне пересування цивільного населення, гуманітарних вантажів та критичних ресурсів. Системи можуть інтегруватися з GPS-навігацією та мобільними додатками, інформуючи громадян про безпечні шляхи.

2. **Мобільні додатки для громадян** — створення цифрових сервісів для інформування населення про безпечні маршрути, графіки руху, наявність транспорту.

Автоматизація логістики — в умовах війни логістика має бути максимально гнучкою та координованою. Використання цифрових логістичних платформ дозволяє відстежувати переміщення вантажів у режимі реального часу, узгоджувати постачання гуманітарної допомоги, пального, медикаментів. Інтеграція з військовими та цивільними структурами забезпечує безпечне і своєчасне транспортування. Крім того, автоматизація допомагає уникнути дублювання маршрутів, втрати ресурсів і хаосу в розподілі допомоги.

3. **Інтеграція електронних квитків і безконтактної оплати** — зменшення черг, фізичного контакту, підвищення зручності користування транспортом.

Висновки: інтеграція цифрових технологій у транспортну систему міст України в умовах війни дозволяє не лише частково подолати наявні труднощі, а й закласти основу для її сталого розвитку в майбутньому. Необхідно підтримувати ініціативи з цифровізації, залучати міжнародний досвід та інвесторів для модернізації транспортної інфраструктури.

Література

1. Бондаренко Е. Л. Веб-картографування / Е. Л. Бондаренко. – К., 2021. – 82
2. Лященко А. А., Форосенко А. В. Методичні засади створення інтерактивних електронних карт у форматі SVG / А. А. Лященко, А. В. Форосенко // Вісник геодезії та картографії. – 2007. - № 1. – С 39–46.
5. Black M. A. Web cartography & Web-enabled geographic information systems (GIS). / М. А. Black, W. E. Cartwright // New possibilities, new challenges. The 22nd International Cartographic Conference, A Coruna, Spain, 9–16 July 2005. <http://bit.ly/2JAaAKQ>

INTEGRATION OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AND SOCIO-TECHNICAL MODERATORS INTO THE PROCESS OF AUTOMATED DATA COLLECTION FOR ROAD SAFETY AUDIT

Kashkanova A. A.

Vinnitsia National Technical University,

kashkanov9a@gmail.com

In the context of the increasing complexity of transport systems and urban challenges, traditional methods of road safety audit (RSA) are losing their effectiveness due to limited scalability, delays in data processing, and the subjectivity of assessments [1].

The purpose of the study is to develop approaches for improving road safety audit, taking into account the digitalisation of transport systems, the growing volume of data from sensors, video analytics, and connected infrastructure.

The object of the study is the process of functioning of the urban transport system.

The subject of the study is the assessment of the possibility of ensuring the continuity, transparency, and reproducibility of RSA processes through the automated collection of data in the urban transport system.

According to analytical reviews [2, 3], cyber-physical systems (CPS) – as a combination of sensor infrastructure, computational units, and network protocols – have become the foundation for automated real-time data collection and processing.

Artificial intelligence (AI), in particular deep learning and Bayesian networks, is increasingly being used to detect conflict situations, predict risks, and classify behavioural patterns of road users [4]. However, as shown in interdisciplinary benchmarks [5], AI controllers do not always outperform classical algorithms, particularly under conditions of high uncertainty or limited training data. This justifies the need for hybrid systems that dynamically switch between AI and traditional rules depending on the context.

The integration of the Human-in-the-Loop (HITL) approach [6] and socio-technical moderators [7] – such as transparency policies, decision-explanation interfaces, and role-based consensus protocols – is a key condition for the acceptability of automated audit systems. According to the results of a systematic review [4], the inclusion of socio-technical aspects in the life cycle of cyber-physical systems makes it possible to avoid «black boxes» in decision-making, ensure traceability of actions, and enable adaptation to local regulatory requirements.

Based on the analysis of research results conducted within the chosen topic, a three-level architecture for RSA is proposed (Fig. 1).

As shown in Fig. 1, the proposed hybrid model for improving RSA comprises the following levels:

1. Sensor and Perception Level (CPS):
 - Sources: intersection video feeds, speed detectors, LIDAR/radar installed on vehicles and public transport, V2X communications, and mobile trajectory data.
 - Functions: spatio-temporal synchronisation, calibration, integrity checking.
 - Socio-technical moderator: data minimisation policy, de-identification in perception, access control.
2. Analytical Level (AI Models):
 - Modules:
 - event detection for surrogate safety (*DRAC*, *PET*, *TTC*);
 - anomaly detection (conflicts, hazardous manoeuvres);
 - risk prediction based on scenarios (RL/dynamic Bayesian networks).
 - Hybridisation: switching between AI and rules/classical controllers depending on the level of confidence and output uncertainty.
 - HITL: an expert approves or rejects «critical» markers, thereby training the models (active learning).

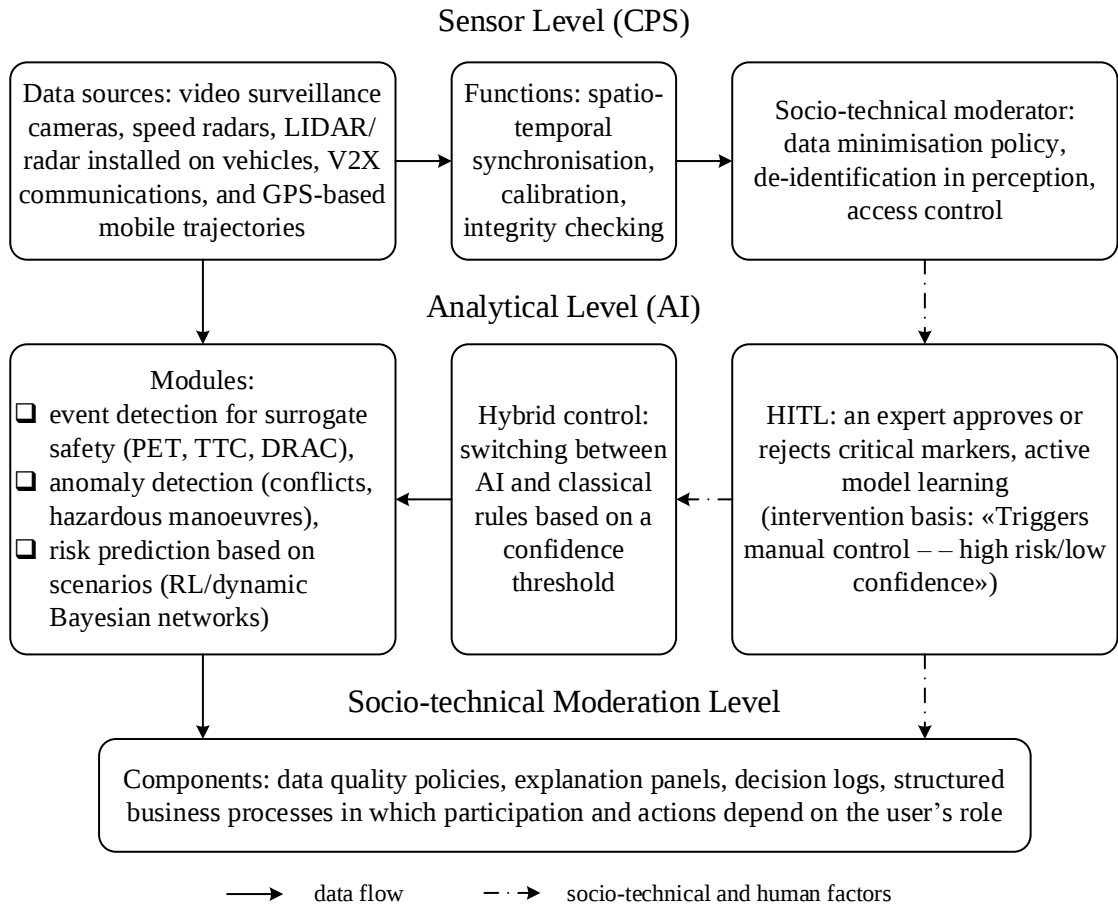


Figure 1 –The hybrid model for improving road safety audit

3. Socio-technical Moderation and Management Level:

- Components: data quality policies, explanation panels, decision logs, and role-based approval workflows.
- Human involvement: triggers for «manual control» in cases of high risk/low confidence.
- Methodologies: interface and process design with consideration of socio-technical aspects of HITL.

The normalised value of the integrated conflict risk indicator can be determined from the expression

$$R_c = \frac{w_1}{s_1} \cdot \sigma(\tau - TTC) + \frac{w_2}{s_2} \cdot \sigma(\tau' - PET) + \frac{w_3}{s_3} \cdot \sigma(v - v^*) + \frac{w_4}{s_4} \cdot \sigma(DRAC - a^*), \quad (1)$$

where $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ – the logistic function; τ, τ', v^*, a^* – thresholds; w_1, w_2, w_3, w_4 –

weights (HITL correction: the auditor may locally adjust $w_i \rightarrow w_i + \Delta w_i$ in known «anomalous» locations (school, market, hospital), with such changes recorded in the decision log); s_1, s_2, s_3, s_4 – scales for data normalisation; TTC – time to a possible collision between two objects, assuming their speed and direction of movement remain unchanged; PET – the time interval between the moments when two moving objects pass through the same «conflict» point on the road; $DRAC$ – the required deceleration to avoid a collision; v – traffic flow speed.

Surrogate safety events ($DRAC, TTC, PET$) – are indirect indicators of potential conflicts between road users, which calculate temporal or spatial margins before a hazardous encounter. They do not record actual collisions but allow the risk to be assessed on the basis of kinematic data (Table 1).

Table 1 – A comparison of *TTC*, *PET* and *DRAC*

Metric	Description	Typical thresholds	Advantages
<i>TTC</i>	Time to a potential collision at constant speed	1,5-3,0 s	Early warning
<i>PET</i>	Difference in the time of passing through the trajectory intersection point	0,5-1,5 s	Takes actual trajectories into account
<i>DRAC</i>	Required deceleration to avoid a collision	$> -4,5 \text{ m/s}^2$ (M1 category vehicle) $> -3 \dots -3,5 \text{ m/s}^2$ (M2, M3 and N category vehicles)	Takes braking dynamics into account and allows the physical feasibility of conflict avoidance to be assessed

Accordingly, the integration of CPS, AI and socio-technical moderators allows the transition from periodic audits to continuous risk monitoring in road traffic. This approach provides:

- scalability of data collection;
- adaptability to changes in road user behaviour;
- transparency and confidence in automated decision-making;
- compliance with ethical and regulatory standards.

Thus, the proposed hybrid model is not only a technical solution but also a socio-technical transformation of the road safety audit process. The integration of cyber-physical systems, artificial intelligence and socio-technical moderators enables the road safety audit to be continuous, transparent and reproducible through automated data collection, adaptive decision-making models, and the «Human-in-the-Loop» approach as a guarantor of ethical and regulatory compliance.

References

1. Kashkanova A. Methods for assessing the risk of accidents in the driver-vehicle-road-environment system. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji, 2025. vol. 109, no 3, 41-61. <https://doi.org/10.14669/AM/207102>.
2. Montalvo A., Camacho O., Chavez D. Cyber-Physical Systems for Smart Farming: A Systematic Review. Sustainability. 2025, 17, 6393. <https://doi.org/10.3390/su17146393>.
3. Houda Harkat, Luis M. Camarinha-Matos, João Goes, Hasmath F.T. Ahmed. Cyber-physical systems security: A systematic review. Computers & Industrial Engineering. 2024, Vol. 188, 109891. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109891>.
4. Javed A.R., Ahmed W., Pandya S., Maddikunta P.K.R., Alazab M., Gadekallu T.R. A Survey of Explainable Artificial Intelligence for Smart Cities. Electronics. 2023, 12, 1020. <https://doi.org/10.3390/electronics12041020>.
5. Ghassemi M., Oakden-Rayner L., Beam A.L. The false hope of current approaches to explainable artificial intelligence in health care. The Lancet Digital Health. 2021, Vol. 3, No. 11. P. e745–e750. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(21\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(21)00208-9).
6. Clemmensen T., Tourchi Moghaddam M., Nørbjerg J. Cyber-physical Systems with Human-in-the-Loop: A Systematic Review of Socio-technical Perspectives. Journal of Systems and Software. 2025, 226, Article 112348. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112348>.
7. Kashkanova A. A. Sociotechnical Approach as a Way to Improve the Safety Space in the City's Transport System. Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute. 2025, No. 4. P. 170-178. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-181-4-170-178>.

КОНЦЕПЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І КОНТРОЛЮ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ АВТОБУСНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Чуйко С. П.¹, Кравченко О. П.^{2,3}, Прохорчук М. В.¹.

¹ *Державний університет «Житомирська політехніка»,*

expertauto@ukr.net

² *University of Žilina,*

oleksandr.kravchenko@fstroj.uniza.sk

³ *Вінницький національний технічний університет*

ap_kravchenko @vntu.ua

З економічним зростанням та територіальним розвитком міст зростає навантаження і на транспорт. З часом дорожня мережа і транспортна інфраструктура, що склалася, перестають задовольняти потребам жителів, стихійне зростання числа автотранспортних засобів створює затори, труднощі в пересуванні як самих автомобілів, так і пішоходів, зростають показники аварійності, зменшується пропускна здатність на дорогах. Таким чином, завдання системного розвитку та оптимізації сфери міських пасажирських перевезень актуальні для всіх міст, що розвиваються. Сьогодні потрібні глибокі зміни у підході до управління, структурна модернізація та впровадження інноваційних технологічних рішень у систему пасажирських перевезень в частині підвищення безпеки транспортного процесу.

Перевезення пасажирів автобусами на міських маршрутах це складний і трудомісткий процес, який потребує особливої уваги від перевізників, диспетчерів і водіїв. Безпека є одним з головних аспектів автобусних пасажирських перевезень.

Цифри, що детально описують дорожньо-транспортні пригоди в Україні [1] показують значно високу кількість та рівень тяжкості. Хоча загальноприйнято визнати, що дорожньо-транспортні пригоди є результатом трьох різних факторів, а саме: людського фактора, фактора транспортного засобу та зовнішніх факторів (включаючи дорожні умови). Людський фактор має найсильніший вплив, і цифри у світовому масштабі підтверджують це твердження.

Підвищення точності позиціонування транспортного засобу на маршруті у години підвищеної пасажирської активності і транспортного завантаження дорожньої мережі потребує додаткового контрольного режиму руху в реальному часі. Такий процес може успішно досягатись при наявності диспетчерської служби і обладнання з модулем приймання сигналів від рухомого складу на маршрутах. А швидке поширення цифрових технологій у повсякденному житті створює можливості для спостереження і за транспортними засобами при виконанні транспортного процесу.

Досягнення в системах глобального позиціонування (GPS) та постійно зростаюче проникнення на ринок пристроїв, оснащених GPS (наприклад, смартфонів), дозволили генерувати масивні просторово-часові дані про траєкторії, які фіксують моделі мобільності людей. Наявність великомасштабних даних про траєкторії мотивувала транспортні підприємства використовувати таку інформацію для вимірювання ефективності транспортної мережі та підтримки прийняття рішень [2].

Одним із інструментів управління перевезеннями пасажирів на міських маршрутах стала Інтелектуальна транспортна система (ІТС) на всіх транспортних засобах, що обслуговують міські маршрути. Це значно полегшує контроль над перевезеннями. ІТС – це передовий застосунок, метою якого є надання послуг, пов'язаних з різними [видами транспорту](#) та [управлінням дорожнім рухом](#), а також забезпечення кращої інформованості користувачів та забезпечення безпечнішого, більш скоординованого та «розумнішого» використання транспортних мереж [3]. Деякі з цих технологій включають виклик служб екстреної допомоги у разі аварії, використання камер для забезпечення дотримання правил дорожнього руху або знаків, що позначають зміни обмеження швидкості залежно від умов.

Хоча ІТС може стосуватися всіх видів транспорту, [директива Європейського Союзу 2010/40/ЄС](#), прийнята 7 липня 2010 року, визначила ІТС як системи, в якій [інформаційно-комунікаційні технології](#) застосовуються в галузі [автомобільного транспорту](#), включаючи

інфраструктуру, транспортні засоби та користувачів, а також в управлінні дорожнім рухом та мобільністю [4]. Технологія ІТС впроваджується в усьому світі для збільшення пропускної здатності доріг із завантаженим рухом, скорочення часу подорожі та забезпечення можливості збору інформації навіть про нічого не підозрюючи учасників дорожнього руху.

Велика увага ІТС приділяється раціоналізації перевезень та відстеженню пасажирів з метою ефективності, безпеки та комерційного маркетингу особливо для громадського транспорту, системи глобального позиціонування (GPS) та системи «смарт-карт» можуть використовуватися для відстеження точного місцезнаходження та ідентифікації кожної людини на різних видах транспорту.

Поведінка водіїв автобусів за кермом пов'язана з безпекою всіх пасажирів та регулюванням міського руху. Для аналізу відповідних характеристик швидкості та прискорення точні траєкторії та схеми руху автобусів є важливими для аналізу поведінки водіїв та розробки ефективного інтелектуального громадського транспорту.

Використовуючи відстеження транспортних засобів у режимі реального часу доцільно розробити платформу з терміналами, встановленими на транспортних засобах, з використанням модулів диференціальної глобальної навігаційної супутникової системи для аналізу поведінки водіїв, так як це має вирішальне значення для забезпечення надійних та безпечних поїздок.

Використовуючи відстеження транспортного засобу в режимі реального часу розроблено платформу з терміналами, встановленими на транспортному засобі, з використанням модулів диференціальної глобальної навігаційної супутникової системи (DGNSS-Китай) для аналізу поведінки водія. GNSS-треки — це запис маршруту руху, який створюється за допомогою GNSS-приймача. Це може бути лінія на карті, що показує шлях, пройдений об'єктом (наприклад, людиною, автомобілем, дроном), фіксуючи його координати в часі. Цей запис є результатом обробки сигналів від супутників глобальних навігаційних систем (таких як GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) приймачем, який постійно визначає своє положення [5].

Траєкторії DGNSS використовуються для отримання інформації руху транспортних засобів, які потім пов'язуються з дорожньою інформацією для створення матриць швидкості та прискорення. Комплексні польові випробування проводилися на кількох автобусних маршрутах у міському середовищі м. Житомир. Просторово-часові результати показують, що платформа може автоматично та точно витягувати характеристики поведінки водія. Крім того, візуальна функція платформи може бути використана для ефективного моніторингу ризиків водіння, таких як перевищення швидкості та різке прискорення, на кількох автобусних маршрутах.

Для оцінки поведінки водія автобуса можуть бути використані різні елементи, наприклад, перевищення швидкості, час затримки та неправильна зупинка. Моніторинг та прогнозування дорожнього руху на основі відео мають переваги з точки зору гнучкості та візуалізації людиною. В системі передбачена внутрішня камера, яка фіксує обличчя водія та зовнішня камера, яка відображає рух на шляху слідування. Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) є найбільш перспективною технікою позиціонування і відстеження, включаючи диференціальну GNSS, точне позиціонування точки GNSS і кінематичну GNSS в реальному часі [6]. Завдяки безперервному відстеженню положення та інформації про дорогу, оцінка швидкості транспортного засобу, ідентифікація навколишнього середовища та прогнозування трафіку надають орієнтири для вивчення безпеки водіння для міських автобусів.

Система диспетчерського моніторингу пасажирських перевезень Longse використовує GPS/BD-позиціонування, бездротовий зв'язок, ГІС-карти та технології обробки відео. Завдяки єдиній платформі можна здійснювати моніторинг у режимі реального часу, планування, зв'язок та відеомоніторинг динамічного положення пасажирських транспортних засобів, формуючи комплексне управління моніторингом [7]. На рисунку 1 представлена структура системи запропонованого методу відстеження автобусів та аналізу їхнього руху за напрямом безпеки.



Рисунок 1 – Принципова схема структури запропонованого методу відстеження роботи автобусів на маршруті

Ефективне управління транспортних процесів на маршруті за допомогою технічних засобів, таких як GPS -позиціонування, контроль швидкісних режимів, дотримання графіка руху, реагування на екстрені події, дії пасажирів і водія в цілому забезпечує безпеку транспортного процесу. Таким чином, розробка єдиної системи автоматизації управління процесами пасажирських перевезень має спиратися на принципи уніфікації та стандартизації технологій та систем, гнучкості та масштабованості системи, а також безпеки та надійності. Ці принципи дозволять створити ефективну, стійку та зручну для користувачів систему, яка сприятиме розвитку транспортної інфраструктури та покращення якості транспортних послуг.

Можливості для подальшого дослідження можуть містити вивчення впливу інтеграції різних видів наземного міського транспорту (автобуси, трамваї) на ефективність системи, її вплив на безпеку руху, розробку методів підвищення доступності транспортних послуг для людей з обмеженими можливостями, а також аналіз впливу системи на економічні показники транспортних підприємств та регіонів.

Література

1. Статистика ДТП в Україні. URL : <http://patrol.police.gov.ua/statystyka/>.
2. Баранов В.В., Кравченко О.П. Прийняття ефективних рішень в системах автомобільного транспорту / Логістика промислових регіонів: Матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції (Донецьк-Святогірськ, 6 – 9 квітня 2011р.): Збірник наукових праць. Донецьк: ЛАНДОН – XXI, 2011, с. 229 - 233
3. Mahmood, Adnan; Siddiqui, Sarah Ali; Sheng, Quan Z.; Zhang, Wei Emma; Suzuki, Hajime; Ni, Wei (June 2022). "Trust on wheels: Towards secure and resource efficient IoV networks". Computing. 104 (6): 1337–1358. doi:10.1007/s00607-021-01040-7. ISSN 0010 485X. S2CID 246434811.
4. Директива № 2010/40/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 7 липня 2010 року про рамки для розгортання інтелектуальних транспортних систем у сфері автомобільного транспорту та для інтерфейсів з іншими видами транспорту. Режим звернення: <https://surl.li/ukuofv>
5. Yang, Yuan, et al. "Driving behavior analysis of city buses based on real-time GNSS traces and road information." *Sensors* 21.3 (2021): 687. Режим звернення: <https://surl.li/ugwxfh>
6. Differential GNSS (DGNSS)О. Режим звернення: <https://surl.li/lxbnmf>
7. Smart Passenger Transport. Режим звернення: <https://surl.li/dffdpe>

ІНТЕГРАЦІЯ СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

Степанов О. В.¹, Наглюк І. С.²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна,

e-mail: o.stepanov@nubip.edu.ua

Забезпечення безпеки дорожнього руху є одним із центральних завдань сучасної транспортної політики, особливо в контексті міської мобільності, де щільність транспортних потоків високих і ризик аварій зростає. У міських агломераціях традиційні підходи до контролю безпеки — обмежуючі знаки, стаціонарні патрулі, періодичні перевірки — виявляються недостатньо ефективними для запобігання інцидентам в умовах динамічних змін трафіку. Водночас розвиток смарт-технологій, таких як інтелектуальні транспортні системи (ІТС), сенсорні мережі, штучний інтелект, Internet of Things (IoT), V2I/V2V-зв'язок (Vehicle-to-Infrastructure, Vehicle-to-Vehicle) відкривають нові можливості для побудови проактивних систем безпеки.

Інтеграція смарт-технологій у систему управління дорожнім рухом дозволяє здійснювати постійний моніторинг транспортної мережі, виявляти потенційно небезпечні ситуації, прогнозувати їх розвиток і своєчасно інформувати учасників руху або відповідні служби. Такий підхід створює передумови для зменшення кількості дорожньо-транспортних пригод, скорочення часу реагування екстрених служб, оптимізації маршрутів та адаптації керування дорожньою інфраструктурою до поточного контексту. У країнах із сформованими ІТС-стратегіями подібні рішення вже демонструють зниження аварійності й підвищення ефективності руху.

Для України, яка має намір розвивати безпечні й екологічні транспортні системи, інтеграція смарт-технологій у дорожню безпеку є складовою майбутньої національної стратегії. Програми Міністерства інфраструктури передбачають розвиток ІТС як інструменту підвищення безпеки руху та зниження наслідків ДТП. З іншого боку, наукові дослідження українських науковців фокусуються на механізмах поєднання IoT, штучного інтелекту та кібербезпеки в ІТС, що забезпечує не лише функціональність, а й надійність таких систем [5; 6].

Смарт-технології в транспортній сфері охоплюють різноманітні рішення: датчики, відеокамери, телематика, комунікаційні модулі V2I/V2V, платформи обробки даних, штучний інтелект та IoT-пристрої. Їх інтеграція відкриває такі можливості:

Реальний моніторинг дорожнього середовища. Сенсори й відеоаналітика забезпечують безперервний збір даних про потоки транспорту, швидкість, стан дорожнього полотна, погодні умови та поведінку учасників руху. На основі цих даних система ІТС може виявляти аномальні ситуації — несподіване гальмування, перевищення швидкості, виявлення пішоходів у зоні ризику.

Прогнозування критичних подій. Алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту аналізують історичні й поточні дані, формуючи прогнози ймовірного розвитку небезпечних сценаріїв. Це дає змогу автоматично генерувати попереджувальні повідомлення або рекомендації щодо зміни маршрутів, коригування світлофорного регулювання, залучення екстрених служб.

Комунікація транспортних засобів та інфраструктури (V2I/V2V). Через технології V2I автомобілі можуть отримувати повідомлення від інфраструктури про стан світлофорів, дорожні умови, аварійні зони. V2V-зв'язок дозволяє обмінюватися даними між автомобілями — про швидкість, гальмування, близькість до інших учасників руху. Це сприяє більш швидкому реагуванню та уникненню зіткнень.

Цифрові сервіси для учасників руху. Мобільні додатки й інформаційні платформи можуть надавати водіям та пішоходам актуальні повідомлення про ризики, аварії, дорожні

роботи й інші небезпечні події. Такі сервіси підвищують обізнаність учасників руху й дають їм інструменти для коригування своєї поведінки.

Кібербезпека систем. Інтеграція IoT і штучного інтелекту викликає ризики кіберзлому. Тому ключовим компонентом є захист інформаційних каналів, автентифікація комунікацій, надійні архітектури для обробки даних. Дослідження українських науковців демонструють ефективність впровадження IoT + AI з урахуванням безпеки даних [5].

У Києві впровадження інтелектуальної транспортної системи (ІТС) має на меті зекономити до 30 % часу учасників руху, завдяки аналізу даних у режимі онлайн та ухваленню математично обґрунтованих рішень щодо оптимального регулювання трафіку [4].

Науково-педагогічні праці містять дані, що інтелектуальні транспортні системи справді сприяють зниженню аварійності та підвищенню контролю над дорожніми ризиками [15].

У дослідженнях щодо управління транспортними потоками в Україні підкреслюється, що ІТС можуть працювати не просто як система регулювання, а як інструмент інтеграції інфраструктури та учасників руху, що зміцнює безпеку [6].

Проблеми та перспективи розвитку

Фінансові бар'єри та ресурси. Смарт-системи потребують значних інвестицій у сенсори, комунікаційні модулі, обчислювальну інфраструктуру. Для багатьох українських міст це складне завдання, особливо з урахуванням бюджетних обмежень та конкуренції за фінансування.

Технічна застарілість інфраструктури. Не всі ділянки дорожньої мережі у містах готові до встановлення IoT-пристроїв чи комунікаційних вузлів. Деякі сегменти мають недостатнє покриття електроживлення, телекомунікацій або стабільного інтернет-зв'язку. Це обмежує можливості впровадження смарт-рішень у повному обсязі.

Недостатній стандарт обміну даними. Відсутність єдиних протоколів комунікації між різними ІТС-платформами, транспортними засобами та державними системами ускладнює їхню інтеграцію. Це створює фрагментовані рішення, які не взаємодіють як єдина екосистема.

Кібербезпека та конфіденційність. Інтернет-пристрої, V2I/V2V-зв'язок та великі потоки даних піддаються загрозам кібератак. Комунікаційні вузли можуть бути вразливими, якщо не забезпечено належного рівня захисту. Наукові доповіді вже вказують на необхідність комплексного підходу до безпеки інформації в ІТС [13].

Соціальні та організаційні бар'єри. Недостатня поінформованість водіїв, пасажирів і пішоходів про можливості смарт-систем, а також скептицизм щодо нових технологій можуть стримувати їх впровадження. Крім того, нестача навичок у місцевих адміністраціях для управління даними, налаштування алгоритмів та експлуатації інтелектуальних платформ створює організаційні перешкоди.

Платформи хмарних обчислень і централізована аналітика. Використання хмарних рішень для збору, обробки та аналізу даних від сенсорів, транспорту та інфраструктури дозволить значно підвищити масштабованість систем і знизити витрати на локальне обладнання.

Розвиток V2I/V2V комунікацій. Активне впровадження зв'язку транспортних засобів з інфраструктурою та між собою може дати істотний приріст безпеки: автомобілі будуть отримувати інформацію на льоту про потенційні небезпеки, а інфраструктура матиме змогу коригувати роботу світлофорів, попереджувати водіїв і знижувати ризики.

Інтеграція IoT + AI + кібербезпеки. Наукові дослідження в Україні вже демонструють ефективні моделі, в яких IoT-пристрої та алгоритми штучного інтелекту працюють разом із захищеними комунікаціями. Такі платформи можуть стати базовим шаром для майбутніх смарт-систем безпеки [5].

Цифрові сервіси для користувачів. Мобільні додатки, веб-платформи та системи попереджень можуть активно залучати водіїв та пішоходів до процесу безпеки: повідомлення про аварійні ділянки, поради щодо безпечного маршруту, динамічні карти ризику.

Підтримка державної політики. Нові стратегії безпеки дорожнього руху, зокрема за підтримки Міжнародного транспортного форуму, відкривають перспективи для інтеграції ІТС у національні системи безпеки. Проекти, які підтримуються державними програмами, можуть

залучати міжнародні інвестиції, сприяти стандартизації та стимулювати масштабне впровадження [10].

Навчання та кадровий розвиток. Потрібно створення навчальних програм для інженерів, аналітиків та урбаністів щодо проектування, впровадження та експлуатації смарт-технологій безпеки. Це забезпечить сталий розвиток систем та їхнє ефективне функціонування.

Інтеграція смарт-технологій у системи безпеки дорожнього руху є ключовим напрямом розвитку сучасних інтелектуальних транспортних систем. Поєднання сенсорних мереж, алгоритмів штучного інтелекту, IoT-пристроїв та зв'язку V2I/V2V створює передумови для побудови проактивних систем, здатних прогнозувати небезпечні ситуації, попереджати учасників руху та забезпечувати швидке реагування служб.

Хоча існують значні виклики — фінансові, технічні, кібербезпекові та організаційні — перспективи впровадження таких рішень в українських містах є реальними та обнадійливими. Ключовими факторами успіху стануть масштабні платформи хмарної аналітики, стандарти взаємодії систем, державна підтримка, розвиток кадрів та інформування громадськості.

Смарт-технології в безпеці дорожнього руху не лише підвищують рівень захисту учасників руху, але й сприяють сталому розвитку міської мобільності, зменшенню аварійності, покращенню екологічних показників та ефективному використанню транспортної інфраструктури. Інвестиції у безпеку через цифровізацію — це вклад у майбутнє міст, де транспорт буде не лише швидким, але й безпечним.

Література

1. Довженко Н., Мазур Н., Костюк Ю., Рзаєва С. Інтеграція IoT та штучного інтелекту в інтелектуальні транспортні системи. Кібербезпека: освіта, наука, техніка, 2024, № 2(26), с. 430–444.
2. Чередніченко О., Валацкене А. Інтелектуальні транспортні системи як інструменти управління транспортними потоками (на прикладі м. Києва). Містобудування та територіальне планування, 2022.
3. Програми з підвищення рівня безпеки на транспорті. Міністерство інфраструктури України.
4. Бабайлов В., Деділова Т. Від звичайних інтелектуальних транспортних систем до транспортних систем зі штучним інтелектом. Проблеми і перспективи розвитку підприємництва, 2025.
5. Мигаль Г., Чумак М. Розробка елементів інтелектуальних транспортних систем для регулювання руху автомобіля. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, 2018, № 80.
6. Гайков А., Євсєєва О., Баранов О., Баранов В. Інтелектуальні транспортні системи в Україні. Вісник НТУ «ХП», 2014, № 9, с. 106–112.
7. Київська міська рада. Нова інтелектуальна транспортна система допоможе заощадити час кожному учаснику дорожнього руху.
8. Mind.ua. Україна отримає нову стратегію з безпеки дорожнього руху за підтримки ІТФ.
9. SCI-Conf (Київ). Ризики кібербезпеки в ІТС — вразливості інформаційних систем при впровадженні інтелектуального транспорту.
10. Наукові праці ДонНТУ: Інтелектуальні системи керування дорожнім рухом з пріоритезацією транспорту за видами (швидка, пішоходи) під час поганих погодних умов.

МЕТОДИКА ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДІЯЛЬНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Войтович О. А., Луб'яний П. В., Кузьменко І. О.

Херсонський національний технічний університет

olgavoytovich@ukr.net, lubpavel@ukr.net, igor.kuuzmenko@gmail.com

В умовах ринкової економіки керівнику підприємства або власнику фірми частіше за все необхідний оперативний аналіз основних напрямків діяльності довіреного або належного йому об'єкта.

Найбільше значення мають такі напрямки експрес-діагностичного аналізу діяльності автотранспортного підприємства (АТП):

- аналіз фінансового стану підприємства.
- аналіз витрат на виробництво.
- аналіз організаційно-технічного рівня розвитку АТП.
- аналіз обсягу та якості перевезень.

Послідовність експрес-аналізу наведена на рис. 1.

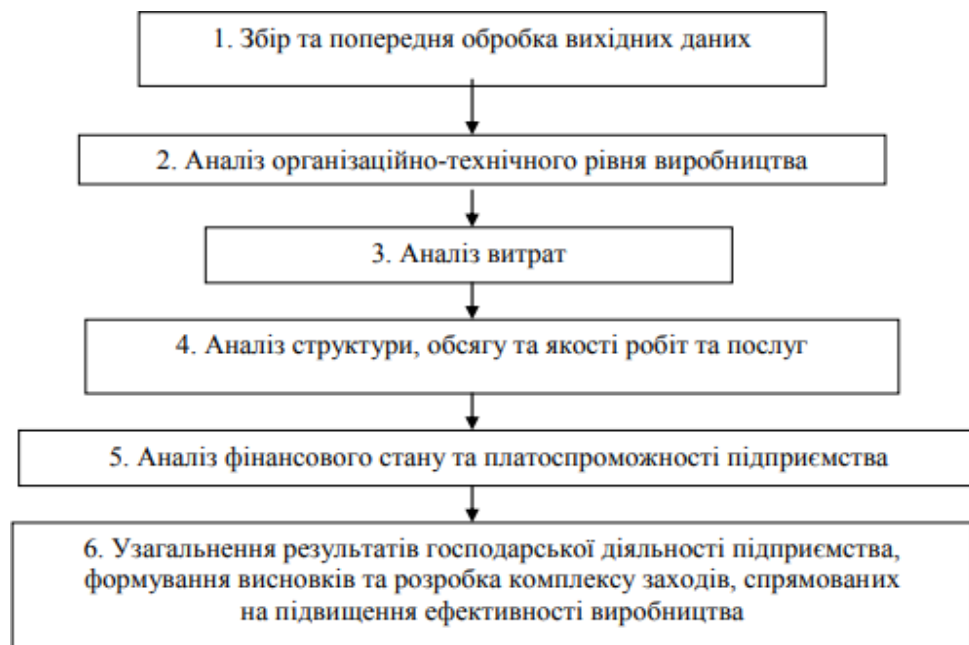


Рисунок 1. Послідовність проведення експрес-аналізу

В першу чергу для успішного функціонування підприємств в умовах ринку необхідна постановка правильних цілей та орієнтація діяльності на безпосереднє їх досягнення з найменшими збитками та помилками. Реалізація наведеного вище потребує постійного контролю за ходом виконання цілей.

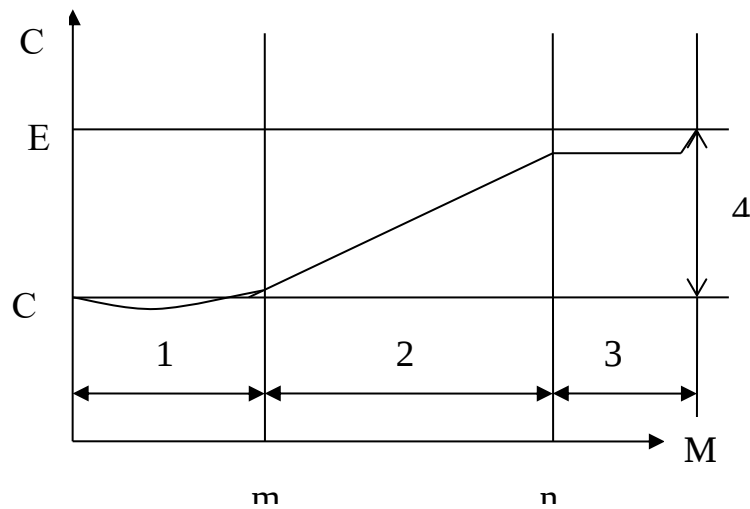
Залежність попиту на послуги підприємства в цільовому сегменті ринку від його маркетингових зусиль може бути відображена графічно (рис. 2).

Наведена на рисунку залежність характеризує взаємозв'язок між маркетинговими зусиллями та попитом, яка встановлена на підставі багаторічного вивчення діяльності різних підприємств на різних ринках, а також аналізу життєвих циклів окремих товарів та послуг.

Категорією, що характеризує здатність підприємства встановлювати правильні цілі відповідно до ситуації, яка склалася всередині нього та на зовнішньому ринку, та досягати їх з мінімально можливими витратами, є багатокритеріальна величина – економічна результативність (ЕР).

Завданням аналізу ЕР діяльності та прийняття коректив з її забезпечення є одночасно початком та кінцем циклу робіт, які забезпечують успішне функціонування підприємства в динамічному ринковому середовищі. Основою для аналізу ЕР можна обрати матричний метод

та систему показників, співвідношення яких створює поле ЕР, що повносистемно охоплює вивчене явище. Для отримання об'єктивних висновків поле ЕР за допомогою методів математичної статистики розбивається на окремі групи показників, які характеризують певну якісну сторону процесу досягнення економічних цілей, – блоки прибутковості, продуктивності, витрат та виробничого потенціалу.



Умовні позначення: M – інтенсивність маркетингових зусиль підприємств; C – попит; E – ємність ринку; C_0 – мінімальний гарантований попит; m – мінімальна необхідна інтенсивність маркетингу; n – гранична ефективна інтенсивність маркетингу; 1- область нечутливості попиту; 2 – область ефективного маркетингу; 3 – область насичення; 4 – можлива ефективність маркетингу

Рисунок 2. Залежність попиту на послуги підприємства в цільовому сегменті ринку від його маркетингових зусиль

Оцінку кожного з отриманих блоків доцільно здійснювати методом середньої геометричної. Виходячи з того, що блоки продуктивності, витрат та виробничого потенціалу характеризують саме одну величину (економічність) з різних точок зору, оцінка ЕР являє собою добуток їх кількісних оцінок.

Під визначенням рівня виконання поставлених цілей мається на увазі оцінка міри відповідності фактичного співвідношення темпів зміни показників до запланованого. Отже, узагальнююча оцінка дійсності функціонування підприємства має враховувати пріоритетність груп показників в рамках обраної стратегії розвитку, а саме не допускати компенсації малих значень найважливіших показників великими значеннями менш значущих.

Найбільш поширені методи згортання показників до узагальнюючого:

- 1). Метод добутку.
- 2). Арифметичної середньої.

Але ці методи нейтралізують пріоритетність показників відносно один одного. Для усунення цього недоліку побудова узагальнюючого показника набуває сенс лексикографічної задачі, суть якої в досягненні домогтися хоча б малого приросту найважливіших критеріїв за рахунок збитків за іншими менш важливими. В даному контексті найбільш розповсюдженими є показники виду

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot K_i; \\ J_{\Pi} &= \prod_{i=1}^m K_i^{\alpha_i}. \end{aligned} \quad (1)$$

де α_i – коефіцієнт важливості i -го критерію;

K_i – i -тий критерій складної величини;

m – кількість критеріїв.

Коли формування складної величини здійснюється під впливом ряду суттєвих факторів, кожний з яких, вмикаючись, ніби або посилює, або послаблює дію інших, то сукупним підсумком їх дії буде добуток окремих отриманих ефектів. Таким чином, виходячи з того, що діяльність функціонування АТП формується під впливом ряду взаємопов'язаних суттєвих факторів – прибутковість (Кп), продуктивність (Кпр) та економічність (Ке) – узагальнену оцінку необхідно здійснювати на основі добутку найвпливовіших параметрів за формулою

$$K_a = \dot{I}_{i=1}^C \prod_{i=1}^m K_i^{\alpha_i} . \quad (2)$$

Для визначення числових коефіцієнтів значущості можна використовувати формулу

$$\alpha_3 = (l_n \cdot W + 1)^{m-1} , \quad (3)$$

де W – відношення максимальної зміни критеріїв до їх мінімальної зміни.

Приклад блоків поля економічної результативності (ЕР) АТП наведено на рис. 3.

	Прибуток, П	Балансовий прибуток, БП	Обсяг перевезень, О	Власний капітал, ВК	Собівартість робіт, С	Вартість матеріалів, М	Основні виробничі фонди, ОВФ	Обігові кошти, ОК	Позиковий капітал, ПК	Витрати на оплату праці, ВОП
Прибуток	П	X								
Балансовий прибуток	БП		X							
Обсяг перевезень	О			X						
Власний капітал	ВК				X					
Собівартість робіт	С					X				
Вартість матеріалів	М						X			
Основні виробничі фонди	ОВФ							X		
Обігові кошти	ОК								X	
Позиковий капітал	ПК									X
Витрати на оплату праці	ВОП									
Чисельність	Ч									

Блок прибутковості
Блок продуктивності
Блок прибутковості
Блок витрат
Блок виробничого потенціалу

Рисунок 3. Блоки поля економічної результативності АТП

Висновки

Можливі й інші підходи до аналізу діяльності автотранспортного підприємства. Кожне підприємство може розробити набір критеріїв, за якими буде проводитися оцінка та аналіз видів перевезень або груп послуг, які надає АТП. Наприклад АТП може використовувати такі критерії:

1. За видами перевезень – частка ринку (за обсягом перевезень), співвідношення темпів росту ринку в цілому та частки підприємства, кількість споживачів, які обслуговуються даним АТП та їх відсоток від загальної кількості споживачів на ринку, рівень доходів та тенденції його руху і т. ін.

2. За групами послуг – асортимент послуг в порівнянні з конкурентами, ступінь задоволення потреб споживачів в автотранспортних послугах, витрати на виконання різних послуг, рівень доходів, якість послуг і т. ін.

Результатом проведеного аналізу є остаточне визначення спеціалізації АТП.

Література

6. Нагорний Є.В., Шраменко Н.Ю. Комерційна робота на автомобільному транспорті. – Підручник. – Харків, ХНАДУ, 2010. – 324 с.
7. Аналіз вигід і витрат: практ. посіб. / Секретаріат Ради Скарбниці Канади; пер. з англ. С. Соколик; наук. ред. пер. О. Кілієвич. – К: Основи, 1999. – 175 с.
8. Войтович О.А., Кузьменко І.О., Луб'яний П.В. Проектний аналіз транспортного підприємства Навчальний посібник. Херсон: Книжкове вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 280 с. ISBN 978-617-8187-08-8 (електронне видання) – 280 с.
9. Янчева Л.М., Лисак Г.Г., О.А. Круглова. Теоретико-методичні аспекти управління комерційною діяльністю: монографія. Х. Вид-во В.С. Іванченко 2016. 210 с.

СЕКЦІЯ 5. ЕКСТРЕНІ СИТУАЦІЇ НА МЕРЕЖІ ТА ДОРОЖНІЙ РУХ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ

УДК 656.13

АНАЛІЗ ДТП НА ТЕРИТОРІЇ ПОЛТАВСЬКІЙ ОБЛАСТІ, ЩО ВІДБУЛИСЯ В 2022 – 2024 РОКАХ

Кулай П. Л.^{1,2}, Маклаков Я. С.³

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

²Полтавський фаховий коледж транспортного будівництва,

³Державна служба України з безпеки на транспорті

pkulayychik@gmail.com

Під час спостережень за трафіком на вулично-дорожній мережі Полтавської області було помічено, що за роки повномасштабних бойових дій (2022-2024 роки) зростає кількість дорожньо-транспортних пригод (далі - ДТП). Для підтвердження, або спростування припущень було направлено запит в управління патрульної поліції Полтавської області на який було надано відповідь.

Проаналізувавши та систематизувавши отримані вихідні данні було зроблені наступні висновки.

Таблиця 1 - Динаміка дорожньо-транспортних пригод та їх наслідків

Рік	ДТП	ДТП з потерпілими	Загинуло	Травмовано
2022	3433	793	97	994
2023	3940	978	127	1254
2024	3967	975	97	1234

Розподіл дорожньо-транспортних пригод за місяцями показав, що протягом 2024 року найбільше автопригод зареєстровано у липні (питома вага становить 10% від усіх ДТП у 2024 році).

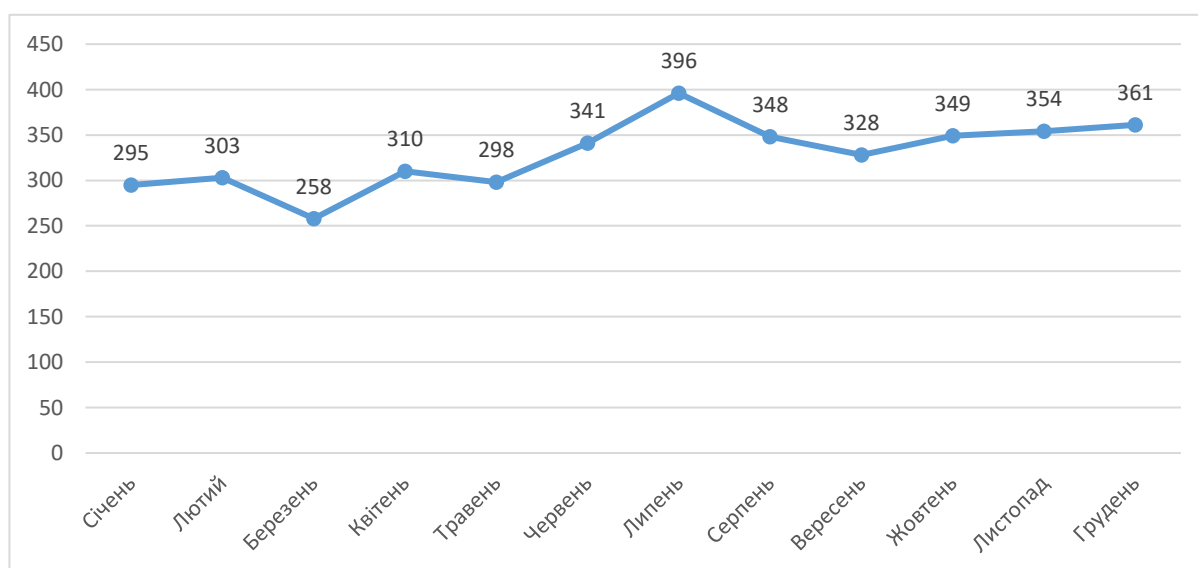


Рисунок 1 - Розподіл дорожньо-транспортних пригод за місяцями 2024 р.

В 2023 році найбільше ДТП зареєстровано у листопаді (питома вага становить 10,4% від усіх ДТП у 2023 році).

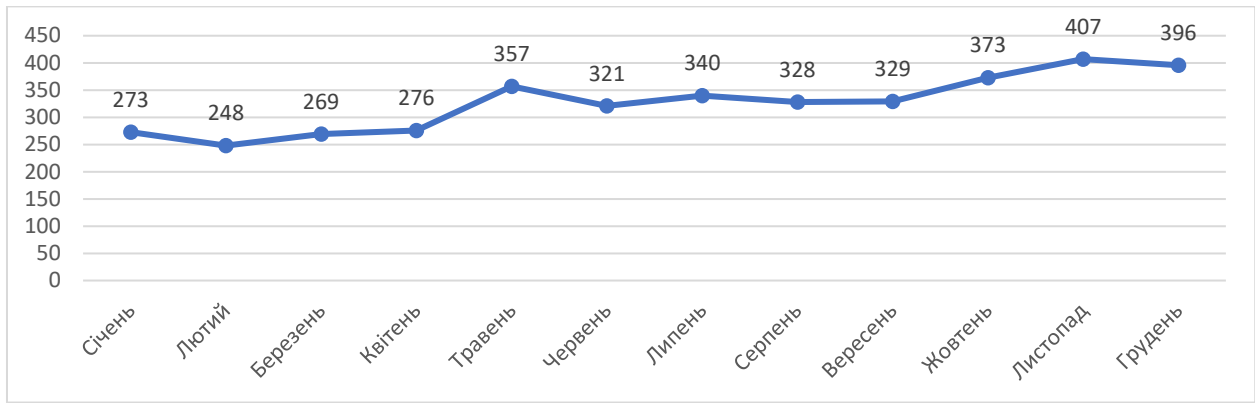


Рисунок 2 - Розподіл дорожньо-транспортних пригод за місяцями 2023 р.

Протягом 2022 року найбільше ДТП зареєстровано у грудні (питома вага становить 11,8% від усіх ДТП у 2022 році).

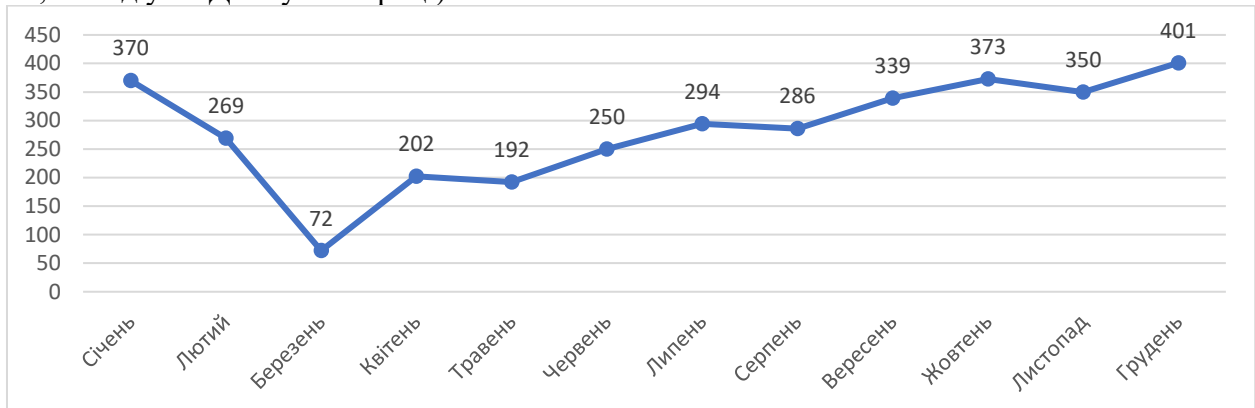


Рисунок 3 - Розподіл дорожньо-транспортних пригод за місяцями 2022 р.

Дорожньо-транспортні пригоди за участю дітей становлять значну частку від загальної кількості ДТП. За січень-грудень 2024 року, відповідно до ІКС ШНП на території обслуговування УПП в Полтавській області ДПП зареєстровано 210 ДТП за участю дітей, з них - 169 ДТП з постраждалими, в яких 4 дитини загинуло та 191 дітей травмовано. За вказаний період спостерігається ріст кількості ДТП з постраждалими за участю дітей на 3% (із 164 до 169).

За січень-грудень 2023 року відповідно до ІТС ПНП на території обслуговування УПП в Полтавській області ДПП зареєстровано 199 ДТП за участю дітей, з них - 163 ДТП з постраждалими, в яких 11 дітей загинуло та 185 дитини травмовано. За вказаний період спостерігається збільшення кількості ДТП з постраждалими за участю дітей на 28% (із 127 до 163).

За січень-грудень 2022 року відповідно до ІТС ПНП на території обслуговування УПП в Полтавській області ДПП зареєстровано 147 ДТП за участю дітей, з них - 127 ДТП з постраждалими, в яких 5 дітей загинуло та 142 дітей травмовано. За вказаний період спостерігається зменшення кількості ДТП з постраждалими за участю дітей на 15% (із 149 до 127).

Таблиця 2 – Кількість ДТП з постраждалими

Кількість ДТП	ДТП з постраждалими												
	Усього			Діти пішоходи		Діти велосипедисти		Діти пасажери		Діти водії		інші	
	ДТП	загинуло	травми	загинуло	травми	загинуло	травми	загинуло	травми	загинуло	травми	загинуло	травми
210	169	4	191	1	42	0	20	1	88	2	40	0	1
199	163	11	185	1	48	0	13	8	91	2	33	0	0
147	127	5	142	2	33	1	16	0	72	2	20	0	1

Дорожньо-транспортні пригоди з причин керування транспортним засобом у нетверезому стані є найрозповсюдженими у Полтаві.

В 2024 році на території обслуговування УПП в Полтавській області ДПП зареєстровано 212 ДТП саме через перебування водіїв у нетверезому стані. При цьому 51 таке ДТП з постраждалими, в яких 2 особи загинуло та 63 особи травмовано.

В 2023 році на території обслуговування УПП в Полтавській області ДПП зареєстровано 172 ДТП саме через перебування водіїв у нетверезому стані. При цьому 49 таких ДТП з постраждалими, в яких 1 особа загинула та 65 осіб травмовано.

В 2022 році на території обслуговування УПП в Полтавській області ДПП зареєстровано 146 ДТП саме через перебування водіїв у нетверезому стані. При цьому 35 таких ДТП з постраждалими, в яких 1 особа загинула та 47 осіб травмовані.

В 2024 році зіткнення (50,5%), наїзд на перешкоду (18,3%), наїзд на транспортний засіб, що стоїть (16,2%), що складає майже 85% від усіх ДТП.

Таблиця 3 - Найпоширеніші види ДТП в 2024 р.

Вид автопригоди	Усього ДТП	ДТП з постраждалими	Загинуло осіб	Травмовано осіб
Зіткнення	2002	406	33	614
Наїзд на перешкоду	727	125	13	158
Наїзд на ТЗ, що стоїть	641	18	1	23
Наїзд на пішохода	236	217	25	215
Перекидання ТЗ	180	102	13	125
Наїзд на велосипедиста	100	84	11	77
Наїзд на тварин	53	1	0	1
Падіння пасажирів	24	22	1	21
Падіння вантажів	4	0	0	0
ЗАГАЛОМ	3967	975	97	1234

В 2023 році зіткнення (52%), наїзд на перешкоду (19,1%), наїзд на транспортний засіб, що стоїть (15,4%>), що складає майже 87% від усіх ДТП.

Таблиця 4 - Найпоширеніші види ДТП в 2023 р.

Вид автопригоди	Усього ДТП	ДТП з постраждалими	Загинуло осіб	Травмовано осіб
Зіткнення	2046	408	44	658
Наїзд на перешкоду	753	138	10	168
Наїзд на ТЗ, що стоїть	606	17	9	21
Наїзд на пішохода	244	232	30	218
Перекидання ТЗ	139	91	17	105
Наїзд на велосипедиста	80	69	15	60
Наїзд на тварин	44	3	0	3
Падіння пасажирів	17	13	0	14
Падіння вантажів	7	1	0	1
ЗАГАЛОМ	3936	972	125	1248

В 2022 році зіткнення (54,7%), наїзд на перешкоду (19%), наїзд на транспортний засіб, що стоїть (13,9%), що складає майже 90% від усіх ДТП.

Таблиця 5 - Найпоширеніші види ДТП в 2022 р.

Вид автопригоди	Усього ДТП	ДТП з постраждалими	Загинуло осіб	Травмовано осіб
Зіткнення	1874	332	32	502
Наїзд на перешкоду	650	100	13	124
Наїзд на ТЗ, що стоїть	475	18	1	21
Наїзд на пішохода	201	195	33	178
Перекидання ТЗ	113	63	7	84
Наїзд на велосипедиста	76	71	9	63
Наїзд на тварин	23	0	0	0
Падіння пасажирів	11	10	0	10
Падіння вантажів	5	0	0	0
ЗАГАЛОМ	3428	789	95	982

Література

- 1 Лист до управління патрульної поліції Полтавської області №124/01.1-21 від 26.02.2025р..
- 2 Лист департаменту патрульної поліції, управління патрульної поліції в Полтавській області №2783/41/26/01-2025 від 28.02.2025р..

ВИМОГИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОГО ТА ЕФЕКТИВНОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОМПОНЕНТІВ ВІТРОВИХ ТУРБІН

Марченко В. В.¹, Птиця Г. Г.¹, Самойлов А. Б.², Арушанов А.К.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Navitas Renewables A/S

gennadij.ptitsa@gmail.com

Вітрова енергетика є одним із найдинамічніше зростаючих секторів світової енергетики (рисунок 1). Станом на 2024 рік загальна встановлена потужність вітрових електростанцій перевищила 1 ТВт (1 000 ГВт), причому найбільші ринки — Китай, США, Німеччина, Індія та Бразилія. У Європі спостерігається тенденція до збільшення частки офшорних вітрових електростанцій, зокрема у Північному морі та Балтійському регіоні.



Рисунок 1 - Тенденція зростання вітрової генерації у світі

Україна також нарощує потужності відновлюваної енергетики (рисунок 2), хоча темпи розвитку дещо сповільнилися після початку повномасштабного вторгнення у 2022 року. Найбільшими діючими проєктами є Приморська ВЕС, Орлівська ВЕС, а також Тилігульська ВЕС, яка після завершення другого етапу матиме потужність 500+ МВт і стане найбільшою вітровою електростанцією країни. Це дозволить виробляти «зелену» електроенергію, еквівалентну споживанню сотень тисяч домогосподарств, і сприятиме зменшенню залежності від викопного палива.



Рисунок 2 - Розміщення ВЕС в Україні

Розвиток відновлюваної енергетики в Україні потребує впровадження ефективних логістичних рішень для доставки великогабаритних компонентів вітрових турбін — лопатей, баштових секцій, гондол та роторів. Їх транспортування супроводжується підвищеними вимогами до технічного стану інфраструктури, дотримання норм безпеки та управління ризиками.

Ефективна організація таких перевезень забезпечується завдяки системному підходу, що поєднує технічне моделювання маршрутів, оцінку ризиків, стандарти безпеки ISO та AASHTO, а також досвід провідних світових компаній – Vestas, DTEK Renewables і Navitas Renewables A/S [1,2,15].

Транспортування елементів вітрових турбін належить до категорії великовагових і негабаритних перевезень, що регламентуються національними та міжнародними нормами [4,5,11]. Типові параметри комплектуючих:

- лопаті довжиною 60–85 м транспортуються телескопічними трейлерами типу BladeMAX або Goldhofer FTV із можливістю підйому під кутом 60°;
- баштові секції (діаметр до 5 м, маса 40–70 т) перевозяться на низькорамних платформах з вантажопідйомністю понад 80 т;
- гондоли (70–100 т) вимагають використання багатовісних транспортерів SPMT (Self-Propelled Modular Transporter).
- Це потребує застосування низькорамних платформ, телескопічних чи модульних трейлерів (SPMT — Self-Propelled Modular Transporters) і спеціальних дозволів на рух.
- Основні технічні вимоги:
- дотримання осьових навантажень відповідно до Постанови КМУ № 879 від 27.06.2007 р. [5];
- перевірка несучої здатності покриття та мостів згідно з ДСТУ 8824:2019 [4];
- контроль радіусів кривих траєкторії автопоїзда (мінімум 80 м для лопатей 74 м довжиною) [3];
- попереднє узгодження маршрутів з Укравтодором, поліцією, операторами ЛЕП та комунальними службами [8].

Міжнародні рекомендації GWEC (2023) [6] та AASHTO (2018) [11] визначають пріоритет безпеки перевезень, мінімізації впливу на інфраструктуру й скорочення логістичних витрат за рахунок попереднього моделювання маршрутів і цифрової координації.

Стан дорожнього покриття (таблиця 1) для навантажень понад 120 т обов’язково виконується інженерний розрахунок несучої здатності дорожнього одягу відповідно до методики ДСТУ 8824:2019 [4]. Це дозволяє визначити можливість проходження важковагових автопоїздів без ризику передчасних руйнувань дорожньої конструкції.

Таблиця 1 - Складові, які мають бути дотримані, якщо планується навантаження понад 120 т

Вимога	Що має бути виконано
Тип дорожнього покриття	жорсткий дорожній одяг (цементобетон або інша технологія з високою міцністю)
Основа дороги	укріплена, з достатньою несучою здатністю, добре дренажена, з прокладками, якщо ґрунти слабкі; пружність основи має бути прорахована
Товщина покриття	з урахуванням осьових навантажень: товщина бетонних або асфальтобетонних шарів має бути значною, щоб не виникало пластичних деформацій
Контроль якості матеріалів і укладки	використання перевантажувачів, контроль температури і ущільнення асфальтобетонних сумішей, високі стандарти з електропровідності, щільності, температури та вологості у бетоні
Міжремонтні строки / технічний контроль	регулярні огляди, перевірки колійності, стійкість поверхні (коефіцієнт зчеплення), виправлення деформацій, тріщин, просідань; нормативи міжремонтного обслуговування мають бути коротші на таких дорогах
Дозвільні процедури і контроль за вагою на осях	необхідні спеціальні дозволи, маршрутні обмеження, забезпечення дотримання вагових норм та навантажень на вісь

Для оцінки ефективності та стійкості системи транспортування великогабаритних вантажів застосовується SVAT-аналіз (Strengths, Vulnerabilities, Adaptation, Threats), який дає змогу системно розглянути переваги, ризики, можливості адаптації та загрози логістичних процесів [9].

S (Strengths) – сильні сторони: наявність міжнародного досвіду компаній Vestas і Siemens Gamesa, перевірених схем перевезення, можливість використання мультимодальних маршрутів (морський → автомобільний транспорт), а також застосування інноваційних трейлерів типу BladeMAX [3; 12].

V (Vulnerabilities) – вразливості: обмежена пропускна здатність українських доріг, недостатня вантажопідйомність мостів > 100 т, нестача спеціалізованого транспорту, бюрократичні труднощі при оформленні дозволів [9].

A (Adaptation) – адаптаційні можливості: використання модульних транспортерів SPMT, попереднє цифрове моделювання (CAD/GIS), тимчасове посилення доріг і мостів металевими плитами, а також координація з місцевими владними органами [6; 10].

T (Threats) – загрози: несприятливі погодні умови (шторм, ожеледиця), воєнні ризики, зростання цін на паливо та руйнування інфраструктури в південних регіонах [9].

Застосування SVAT-методики дозволяє визначити стратегічні напрями підвищення стійкості транспортних операцій і мінімізації ризиків під час реалізації енергетичних проєктів.

Оптимізація маршрутів транспортування базується на поєднанні цифрового моделювання та інженерного обстеження. Застосовуються GIS-технології, AutoTURN і BIM-платформи, які дозволяють моделювати проходження автопоїздів, оцінювати off-tracking, профіль дороги, ухили та мінімальні радіуси поворотів [3; 7].

Планування маршрутів для перевезення лопатей довжиною > 70 м потребує:

- визначення точок критичних радіусів і вузьких ділянок дороги;
- перевірки вертикальних габаритів (ЛЕП, естакади, тунелі);
- врахування місць для розвороту та стоянки конвою;
- розробки альтернативних маршрутів [8; 9].

Прикладом ефективного логістичного рішення є доставка лопатей і баштових секцій для Тилігульської ВЕС, де компанії DTEK [2] та Vestas [1] застосували комбінований підхід: цифрове планування в CAD/GIS та «dry run»-тестування маршруту порожніми трейлерами. Результатом стало скорочення часу та уникнення простоїв.

Управління ризиками здійснюється відповідно до ISO 31000:2018 [13] та включає процедури оцінки, моніторингу й контролю під час транспортування. Основні заходи:

- попередня оцінка інфраструктурних ризиків (мости, газопроводи, ЛЕП) [9];
- створення резервних маршрутів на випадок аварій чи форс-мажору [10];
- постійна координація з дорожніми службами та операторами комунікацій [5];
- навчання водіїв та екіпажів спецтехніки згідно з вимогами безпеки AASHTO та FHWA [8; 11].

Транспортування лопатей довжиною 74 м і масою 23 т здійснювалось від порту Констанца (Румунія) до Тилігульської ВЕС у Миколаївській області. Маршрут включав понад 600 км автомобільних доріг і проходив через 7 ділянок із недостатнім радіусом повороту та 2 мостові переходи, що потребували підсилення.

Для перевезення використовувались телескопічні трейлери Faumonville BladeMAX 1000, які забезпечують підйом лопаті під кутом до 60°. Було виконано 64 рейси з середньою швидкістю 40 км/год, переважно в нічний час, із супроводом поліції та ескорту. Завдяки використанню цифрових систем трекингу та супроводу можна оперативно реагувати на зміни дорожніх умов і запобігати інцидентам. При перевезенні компонентів для Тилігульської ВЕС було досягнуто зменшення логістичних витрат на $\approx 15\%$ при повній відсутності інцидентів [2].

Navitas Renewables A/S (Данія) є прикладом передового підходу до управління безпечними перевезеннями у вітроенергетиці. Заснована у 2019 р. як Navitas Wind A/S, компанія має більш як 35 років сукупного досвіду в монтажі та логістиці турбін і працює з провідними європейськими енергетичними операторами [15].

Основні принципи діяльності:

- daily planning – оперативне планування та контроль етапів транспортування;
- infrastructure planning – інженерна оцінка доріг, мостів, майданчиків до початку робіт;
- training plans – системна підготовка персоналу щодо безпечного завантаження та монтажу елементів.

Компанія активно працює в Україні, підтримуючи проєкти з розвитку відновлюваної енергетики та відновлення інфраструктури [15]. Її досвід є показовим прикладом інтеграції SVAT-підходу в реальні логістичні процеси.

Організація безпечного та ефективного перевезення великогабаритних компонентів вітрових турбін є ключовим елементом у реалізації сучасних проєктів відновлюваної енергетики. Цей процес потребує поєднання інженерних розрахунків, нормативного регулювання, цифрового планування та ефективного управління ризиками. Дотримання міжнародних стандартів AASHTO, ISO 31000:2018 та національних норм ДСТУ гарантує технічну надійність і безпечність усіх етапів транспортування.

Використання інструментів GIS-моделювання, SVAT-аналізу та систем моніторингу забезпечує можливість глибокої оцінки маршрутів, виявлення вразливостей та підвищення стійкості логістичної системи до зовнішніх впливів. Практика компаній Vestas, DTEK і Navitas Renewables показує, що цифровізація, комплексне планування та підготовка персоналу є визначальними факторами успішного транспортування великогабаритних елементів турбін.

Загалом, ефективна система перевезень у галузі вітроенергетики має базуватися на принципах безпеки, адаптивності, координації та сталого розвитку. Її впровадження сприятиме підвищенню надійності енергетичних проєктів, скороченню витрат і зміцненню позицій України у сфері відновлюваної енергетики.

Література

1. Vestas Official Website. Annual Report 2023. URL: <https://www.vestas.com>.
2. DTEK. Офіційний сайт компанії. URL: <https://dtek.com>.
3. U.S. Department of Energy (DOE). Wind Energy Technologies Office Reports. URL: <https://energy.gov/eere/wind>.
4. ДСТУ 8824:2019. Автомобільні дороги. Методи визначення несучої здатності дорожнього одягу. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83173.
5. Постанова КМУ № 879 від 27.06.2007. Про заходи щодо збереження автомобільних доріг. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/879-200>.
6. GWEC (2023). Global Wind Report. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>.
7. NCHRP (2021). National Cooperative Highway Research Program. URL: <https://www.trb.org/NCHRP/NCHRP.aspx>.
8. FHWA (2016). Oversize/Overweight Load Transportation Guidelines. URL: <https://www.fhwa.dot.gov>.
9. Vision Zero Ukraine (2021). Аналітичний звіт. URL: <https://visionzero.org.ua>.
10. Sea Of Gravity (2022). Logistics Case Studies. URL: <https://seaofgravity.com>.
11. AASHTO (2018). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. URL: <https://store.transportation.org>.
12. WindEurope (2021). Logistics of Wind Turbine Components Report. URL: <https://windeurope.org>.
13. ISO 31000:2018. Risk Management – Guidelines. URL: <https://www.iso.org/standard/65694.html>.
14. Постанова КМУ № 30 від 18.01.2001 (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/30-2001-п>.
15. Navitas Renewables A/S. Official Website & Corporate Profile. URL: <https://navitasrenewables.com>

АНАЛІЗ ЗМІНИ СТАТИСТИКИ ДТП В ПЕРІОД ВОЄННОГО СТАНУ**Наглюк І. С.¹, Рябушенко О. В.¹, Кравченко О. П.², Тугайбей Т. О.¹**¹*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*²*Жилінський університет (Словаччина)*

isnagluk@ukr.net

Вже протягом трьох років наслідки військової агресії накладають важкий відбиток на всі аспекти життя України. Масштабні і багатоаспектні втрати, що торкнулися різних сфер життя країни, також вплинули на функціонування транспортної інфраструктури, та умови дорожнього руху (Batyrgareieva V., 2022). Зокрема, можна відзначити появу додаткових факторів, які пов'язані з умовами воєнного стану та призвели до додаткового навантаження на вулично-дорожню мережу, ускладнення умов руху, збільшення ризиків для безпеки дорожнього руху (Рябушенко О., Попадинець Д., Воронцов Я., 2024). Таким чином, незадовільний стан безпеки дорожнього руху в Україні продовжує залишатися головним фактором ризику для сектору цивільної безпеки навіть в сучасних умовах воєнного стану.

Побудова графіків розподілу ДТП за різними часовими періодами є важливим інструментом, що широко використовується для аналізу впливу різних факторів аварійності та причин виникнення небезпечних ситуацій під час дорожнього руху. Відомо, що характеристики розподілення ДТП в часі можуть відрізнятися в залежності від специфіки регіону дослідження, факторів кліматичних, дорожніх умови, культурних аспектів поведінки учасників руху тощо. Актуальним об'єктом для аналізу зміни показників аварійності є Харківська область, оскільки вона, з одного боку, є безпосередньою зоною активних бойових дій, з іншого – з жовтня 2022 року окупованою залишається лише невелика кількість регіону.

На рис. 1 наведені графіки розподілу кількості ДТП, кількості загиблих та поранених за останні 5 років. Аналізуючи наведені статистичні дані можна виділити два характерних періоди. До початку бойових дій щорічна кількість ДТП в регіоні залишається на відносно високому рівні, що призводило до значної кількості загиблих та поранених внаслідок ДТП. Період 2022 р. став для Харківської області критичним з точки зору інтенсивності та тяжкості бойових дій. Майже одразу після їх початку і до осені значна частина регіону перебувала під окупацією, відбулася евакуація значної кількості населення, особливо з обласного центру. Це призвело до значного зниження показників аварійності та смертності в ДТП за підсумками 2022 р. В період 2023 - 2024 рр. господарство та транспортна система регіону продовжували функціонувати в умовах воєнного стану. При цьому відбулося зменшення загальної кількості ДТП на 44,5 % порівняно з періодом 2021 – 2022 рр. Кількості ДТП з потерпілими також знизилися, але не так відчутно всього на 15,3 %. Ще менш значним у відносному вираженні в період 2023 – 2024 рр. було зменшення кількості загиблих, яке склало лише 10 % порівняно з двома довоєнними роками, а кількість поранених внаслідок ДТП за цей період взагалі не змінилась відносно довоєнних показників. Таким чином, за 2023 – 2024 рр. при значно менших показниках кількості ДТП по Харківській області, сумарна кількість загиблих та травмованих майже досягла довоєнних значень. Таке порівняння говорить про збільшення відносної тяжкості ДТП в умовах воєнного стану.

Відомо, що ризик загибелі або травмування людини внаслідок ДТП залежить від великої кількості факторів як технічного так і соціальної природи. Зокрема значний вклад вносять якість та рівень організації дорожнього руху, а також ефективність роботи аварійних служб, надання допомоги потерпілим. Встановити можливий вплив останнього фактору можна шляхом порівняння розподілів загиблих в ДТП за місцем настання фатального наслідку для двох періодів часу. Так, за даними інформаційно-телекомунікаційної системи «Інформаційний портал Національної поліції України», в 2021 р. в Харківській області безпосередньо на місці ДТП загинула 151 особа, по дорозі в лікарню загинуло 12 осіб та у 48 осіб загинуло в лікарні протягом 30 діб. Аналогічні ждані за 2024 р. показують, що 152 особи загинуло на місці ДТП, 11 осіб по дорозі в лікарню та 32 особи – в лікарні протягом 30 діб.

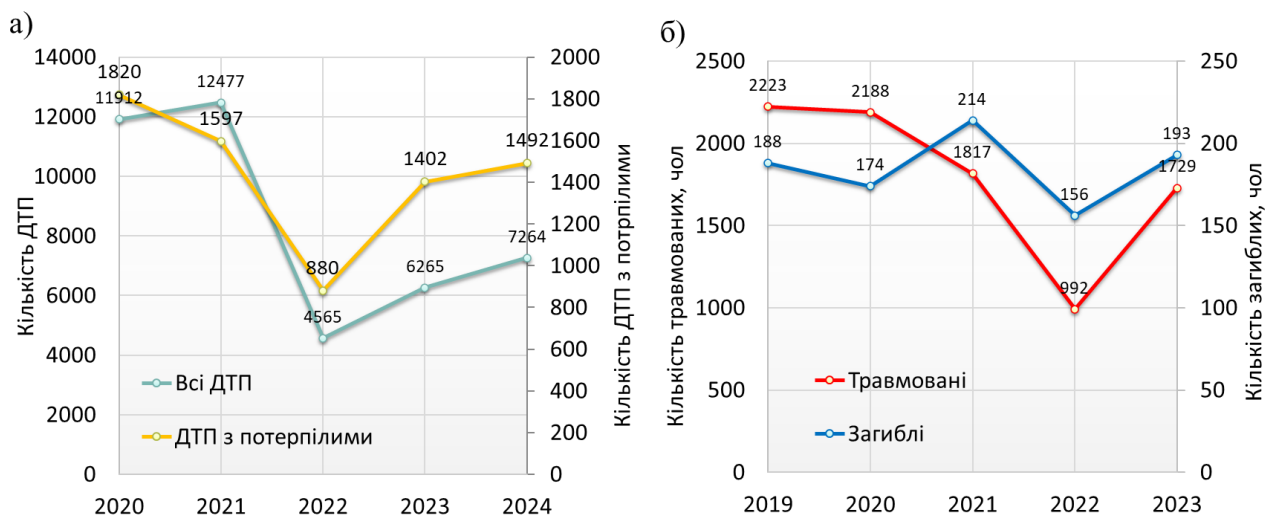


Рисунок 1 – Розподіл статистики ДТП по Харківській області по роках: а – кількісних показників ДТП; б – числа загиблих та травмованих

Результати відносного розподілу цих даних у відсотках наведено на рис. 2. Можна побачити, що в 2024 р. відбулося збільшення на 7 % відносної кількості загиблих безпосередньо на місці ДТП, при пропорційному зменшенні кількості померлих в лікарні. Відносна кількість померлих на шляху до лікарні залишилась на такому ж рівні. Виходячи з наведених результатів аналізу, є підстави вважати, що в умовах воєнного стану якість надання потерпілим в ДТП першої допомоги та їх подальшого лікування принаймні на знизилася.

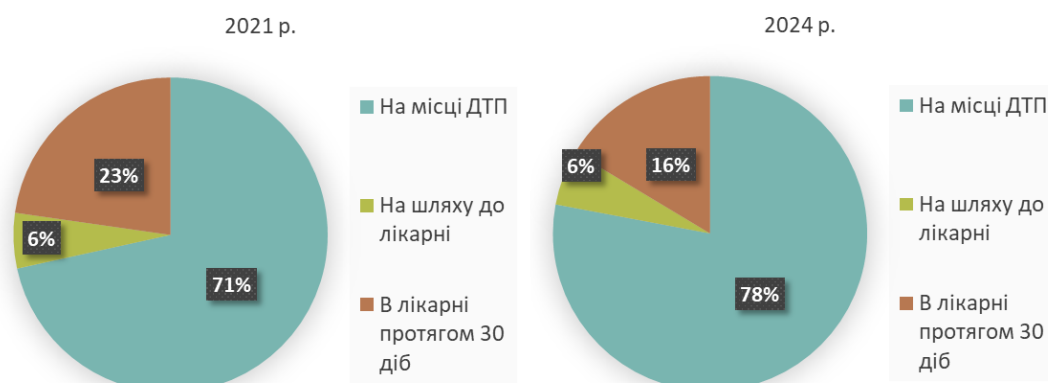


Рисунок 2 – Розподіл кількості загиблих внаслідок ДТП за місцем настання фатального наслідку

Таким чином, причини збільшення відносної тяжкості ДТП в період військового стану треба шукати серед факторів, які впливають на ймовірність травмування або загибелі людини безпосередньо під час події. Такий аналіз має бути предметом подальшого, більш широкого дослідження, яке, крім іншого, вимагатиме наявності більш розширених статистичних даних.

Література

1. Batyrgareieva, V., Kolodyazhny, M., & Netesa, N. (2023). WAR AS A CHALLENGE TO ROAD SAFETY: DAMAGE TO SOCIETY AND THE ECONOMY OF UKRAINE. *Baltic Journal of Economic Studies*, 9(5), 48-56. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2023-9-5-48-56>
2. Рябушенко, О., Попадинець, Д., & Воронцов, Я. (2024). Аналіз безпеки руху на дорогах Харківської області в період воєнного стану. *Автомобільний транспорт*, (54), 32–41. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.54.0.04>

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ПЕРЕДАВАРІЙНИХ ШВИДКОСТЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Рябушенко О. В.¹, Кашканов В. А.², Краснов Ю. О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Вінницький національний технічний університет

riabushenko79@ukr.net

Актуальність дослідження зумовлена збереженням високого рівня аварійності у великих містах, незважаючи на впровадження інтелектуальних систем управління дорожнім рухом та розвиток інфраструктури. Швидкість руху транспортного засобу є ключовим фактором, що впливає як на ймовірність дорожньо-транспортної пригоди (ДТП), так і на тяжкість її наслідків, тому вивчення реальних швидкостей автомобілів в момент ДТП має практичне значення для вдосконалення політики регулювання дорожнього руху. У той час як існуючі дослідження [1-3], включаючи класичну модель Power Model, показують експоненціальну залежність між швидкістю та ризиком, вони не приділяють уваги детальному аналізу форми розподілу швидкості транспортних засобів, які брали безпосередню участь у аварії. Крім того, переважна більшість досліджень проведено в розвинених країнах, де високий рівень інфраструктури і засобів контролю швидкості значно знижують ступінь ризику. Тому такий аналіз особливо важливий у контексті країн, що розвиваються, де, заходи щодо зниження загального обмеження швидкості можуть не мати очікуваного ефекту через специфіку місцевого контексту, включаючи рівень організації дорожнього руху та методи контролю [4].

Метою дослідження було вивчення особливостей розподілу швидкостей автомобілів, що потрапили в ДТП на вулично-дорожній мережі (ВДМ) міста Харкова (Україна). Дослідження ґрунтується на даних поліцейських розслідувань 294 випадків ДТП з потерпілими. Вихідні дані для аналізу з архівних матеріалів експертиз, проведених по кримінальних справах про ДТП, були перенесені в електронну таблицю (рис. 1), після чого, за допомогою програмного забезпечення Statistica (StatSoft, США), проводився статистичний аналіз, включаючи перевірку гіпотези про нормальність розподілу.

	A	B	C	D	E	F
1	Accident statistics of the Khariv SECC					
2				Accident type code	Part of Art. 286 CCU	Vehicle speed, km/h
3	No	Date	Place of commission			
127	124	07.08.2018	м. Харків, вул. Клочківська	1	2	59
128	125	10.08.2018	м. Харків, вул. Сумська 64	4	1	30
129	126	10.08.2018	м. Харків, вул. Клочківська	5	1	50
130	127	11.08.2018	м. Харків, вул. Олексіївська	1	2	35
131	128	12.08.2018	м. Харків, вул. Полтавський	1	1	25
132	129	14.08.2018	м. Харків, вул. Челюскінців	1	2	45
133	130	14.08.2018	м. Харків, вул. Первомайська	5	1	8
134	131	16.08.2018	м. Харків, вул. Гвардійська	1	1	64
135	132	19.08.2018	м. Харків, вул. Челюскінців	1	2	51
136	133	22.08.2018	м. Харків, вул. Малогомиса	4	2	124
137	134	28.08.2018	м. Харків, вул. Плеханівська	4	1	40
138	135	28.08.2018	м. Харків, пр. Ювілейний	5	1	70

Рисунок 1 – Фрагмент таблиці з вихідними даними

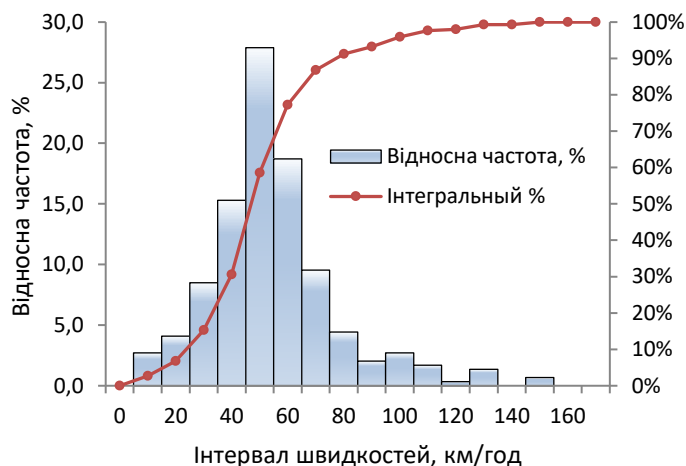


Рисунок 2 – Гістограма розподілу передаварійних швидкостей для загальної вибірки

Структура вибірки показала, що найбільша кількість випадків ДТП становлять наїзд на пішохода (42 %) та зіткнення транспортних засобів (37 %), що в цілому є характерним для міст з інтенсивним трафіком і недостатньо розвинутою пішохідною інфраструктурою. Аналіз форми розподілу швидкостей автомобілів, що потрапили в ДТП (рис. 2), показав виражену правосторонню асиметрію, коли гістограма розподілу має різкий пік в зоні низької і середньої швидкості і довгий «хвіст» в зоні високої швидкості. Найбільш щільним є інтервал від 50 до 60 км/год, на який припадає близько 31% від усіх випадків. При цьому середня швидкість

становить 53 км/год, а медіана та мода - 50 км/год. Статистичний аналіз підтвердив, що у 61% випадків ДТП сталися при перевищенні встановленого у місті обмеження швидкості у 50 км/год, у 13% випадків швидкість перевищувала 70 км/год, а в 4% – 100 км/год. Показники варіативності розподілу (стандартне відхилення – 23 км/год, коефіцієнт варіації – 43%, асиметрія – 1,08, ексцес – 2,68) свідчать про його високу неоднорідність та вказує на значний зсув розподілу в бік більш низьких швидкостей і наявність довгого «правого хвоста», який формується окремими випадками руху з дуже великою швидкістю. Перевірка гіпотези нормальності підтвердила, що розподіл статистично не є нормальним (емпіричні квантілі помітно відхиляються від нормальної лінії відповідності, а значення критеріїв нормальності мають рівень значущості $p < 0,01$).

Порівняльний аналіз розподілів для двох основних типів ДТП показав, що якісна закономірність загального розподілу зберігається (рис. 3). Медіанне значення для обох розподілів залишилося на рівні 50 км/год, та пікова щільність – в інтервалі 50-60 км/год. Для наїзду на пішохода спостерігається більш висока концентрація даних навколо модального значення і виражена правобічна асиметрія, у той час як для зіткнення транспортних засобів швидкості більш рівномірно розподілені і мають меншу пікову щільність.

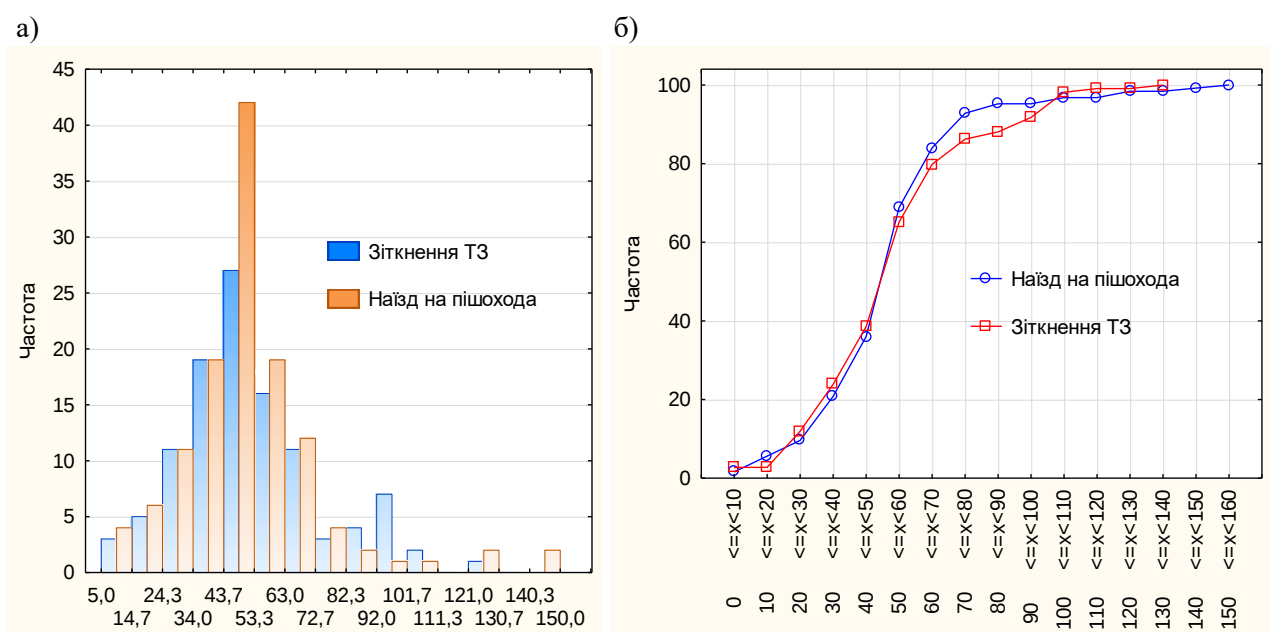


Рисунок 3 – Співставлення розподілів передаварійних швидкостей для двох видів ДТП:
а – гістограми розподілу; б – інтегральні графіки розподілів

Результати дослідження свідчать про те, що проблема безпеки на міських дорогах України має двояку природу. З одного боку, є «небезпечний хвіст» розподілу – водії, які допускають екстремальне перевищення швидкості, що вимагає підвищеного контролю та впровадження інтелектуальних систем обмеження швидкості. З іншого боку, найбільша кількість ДТП відбувається в швидкісному діапазоні, який формально відповідає встановленим обмеженням, але виявляється небезпечним через складні умови руху на певній ділянці ВДМ. Тому проблема полягає не тільки в перевищенні швидкості, але і в виборі водіями неадекватної для конкретної дорожньої ситуації швидкості, що вимагає впровадження сукупності заходів для радикального підвищення безпеки у великих містах України та подібних регіонах. Поряд з боротьбою з грубим перевищенням швидкості, активно впроваджувати концепцію зональних обмежень, змушуючи водіїв обирати швидкість, яка адекватна реальним дорожнім умовам.

Результати дослідження також можуть бути розширені для країн зі схожими особливостями міської транспортної інфраструктури. Вони демонструють, що боротьба з перевищенням швидкості повинна бути спрямована не тільки на придушення крайніх порушень, а й на оптимізацію самого ліміту з урахуванням особливостей міського середовища і поведінки водіїв. Дослідження розширює розуміння закономірностей розподілу швидкостей при ДТП і може слугувати основою для побудови імовірнісних моделей ризику. Надалі

планується порівняти розподіл швидкостей автомобілів, що потрапили в ДТП, з реальними швидкостями транспортного потоку на різних ділянках міської мережі. Таке порівняння дозволить кількісно оцінити вплив швидкості на ймовірність ДТП і розробити більш точні рекомендації по управлінню швидкістю.

Література

1. Elvik, R., Høy, A., Vaa, T., & Sørensen, M. (2019). Updated estimates of the relationship between speed and road safety at the aggregate and individual levels. *Accident Analysis & Prevention*.
2. Azin, B., Ewing, R., Yang, W., et al. (2025). Urban Arterial Lane Width Versus Speed and Crash Rates: A Comprehensive Study of Road Safety. *Sustainability*.
3. Buesuházy, K., Zúvala, R., Doecke, S., & Ambros, J. (2018). Investigation of pre-crash vehicle speed. *ResearchGate*.
- Ryabushenko, A., Naglyuk, I., Danets, S., & Biketov, Y. (2019). Effect of speed limit reduction from 60 to 50 km/h on road safety for a large Ukrainian city. *AIP Conference Proceedings*

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ РЕГУЛЬОВАНИХ І НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ

Холодова О. О., Бугайова М. О., Холодов О. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

olgakholodova280781@gmail.com

Перехрестя належать до найбільш небезпечних елементів вулично-дорожньої мережі (ВДМ), адже саме на них зосереджується значна кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Це зумовлює потребу у науково обґрунтованій оцінці рівня безпеки їх функціонування. Серед відомих підходів поширеним є метод аналізу конфліктних точок, який дозволяє кількісно охарактеризувати ступінь небезпеки як для регульованих, так і для нерегульованих перехресть.

Ступінь складності перехрестя значною мірою визначається його планувальними характеристиками. Зокрема, на складність впливають: кількість смуг руху (перехрестя з великою кількістю смуг є більш вимогливими для водіїв, оскільки потребують своєчасного вибору правильної смуги відповідно до запланованого напрямку); наявність світлофорного регулювання (світлофори знижують когнітивне навантаження на водіїв, регулюючи черговість проїзду та зменшуючи кількість рішень, які необхідно приймати самостійно); тип геометрії перехрестя (деякі конфігурації, як-от кільцеві або турбокільцеві перехрестя, вимагають дотримання специфічних правил руху та певного рівня навичок, що підвищує загальну складність); інтенсивність транспортних потоків (ТП) (більший обсяг транспорту призводить до зростання конфліктних ситуацій і ускладнює процес перетинання); інфраструктура для пішоходів і велосипедистів (наявність пішохідних переходів, велосипедних смуг та інших засобів забезпечення безпеки може як спростити, так і ускладнити організацію руху залежно від їхньої ефективності); географічні та кліматичні умови (такі чинники, як ухили, стан дорожнього покриття, обмежена видимість або несприятливі погодні умови, також впливають на загальну складність ділянки); особливості організації руху та чинні ПДР (специфічні правила (пріоритет, обгони тощо) можуть підвищити складність орієнтування на перехресті). Узагальнюючи, складність перехрестя є результатом взаємодії цих чинників і може сприйматися суб'єктивно, залежно від досвіду та навичок водіїв.

Оцінювання складності здійснюється шляхом визначення кількості конфліктних точок різних типів, що виникають на даному перехресті. Рівень складності визначається за п'ятибальною шкалою [1], заснованою на розрахунку показника складності m , що обчислюється за формулою

$$m = 1 \cdot N_1 + 3 \cdot N_2 + 5 \cdot N_3, \quad (1)$$

де N_1 — кількість конфліктних точок розділення (оцінюються в 1 бал), N_2 — точок злиття (оцінюються в 3 бали), N_3 — точок перетинання (оцінюються в 5 балів).

Інтерпретація показника складності: $m < 40$ - перехрестя вважається нескладним, $40 \leq m < 80$ - середній рівень складності, $80 \leq m < 150$ - складне перехрестя, $m \geq 150$ - дуже складне перехрестя.

Варто зауважити, що в поданій методиці оцінювання складності перехрестя, яка базується на підрахунку кількості конфліктних точок трьох типів — розділення, злиття та перетинання — не враховано конфлікти за участю пішоходів. Необхідно відзначити, що попри очевидну актуальність проблеми, фактично відсутня не лише кількісна оцінка конфліктів між транспортними засобами (ТЗ) та пішоходами, а й велосипедистами чи трамваями. Разом з тим, при детальному аналізі конкретного перехрестя та побудові схем організації руху такі конфліктні точки мають бути обов'язково відображені [1]. Дослідження взаємодії автомобілів із пішоходами певною мірою розвинуті в межах вивчення конфліктних ситуацій, який базується на натурному спостереженні за «передаварійними» подіями, коли учасники руху змушені здійснювати екстрені дії для уникнення зіткнення. Таких випадків значно більше, ніж

реальних ДТП, що дозволяє швидше виявляти небезпечні місця. Метод дає змогу враховувати конфлікти «автомобіль–пішохід», застосовувати відеофіксацію та проводити аналіз за схемою «до і після». Водночас він потребує значних ресурсів, підготовлених спостерігачів і не забезпечує єдиної інтегральної оцінки складності перехрестя, а лише порівняльну характеристику рівня безпеки. Да і для велосипедного руху та трамвайного транспорту цей напрям залишається недостатньо опрацьованим.

Формула (1) передбачає лише взаємодію ТП, що створює обмежене уявлення про реальний рівень складності, особливо у випадках інтенсивного ПР. Такий підхід не дозволяє об'єктивно оцінити потенційні небезпеки, що виникають при перетині траєкторій пішоходів та ТЗ, хоча в умовах міських вулиць такі конфлікти часто є критичними з точки зору безпеки. Отже, для повнішої оцінки складності перехрестя доцільно доповнити методику врахуванням пішохідних конфліктних точок із відповідними ваговими коефіцієнтами.

Для об'єктивнішої оцінки складності перехрестя з урахуванням усіх учасників дорожнього руху, зокрема пішоходів, до традиційної методики розрахунку показника складності було внесено уточнення. До трьох основних типів конфліктних точок (розділення, злиття та перетинання ТП) додано четвертий тип — конфліктні точки взаємодії ТЗ із пішоходами. Враховуючи вразливість пішоходів та потенційні наслідки таких конфліктів, їм було призначено ваговий коефіцієнт 4 (траєкторія його руху зазвичай передбачувана; ризик серйозних наслідків вищий, ніж при конфліктах ТЗ–ТЗ, але з нижчою імовірністю події, ніж у перетинаючих потоках ТЗ.). У зв'язку з цим формула для розрахунку складності набуває вигляду

$$m = 1 \cdot N_1 + 3 \cdot N_2 + 5 \cdot N_3 + 4 \cdot N_4, \quad (2)$$

де N_4 — кількість конфліктних точок ТЗ з пішоходами (оцінюються в 4 бали).

Такий підхід дозволяє точніше відображати реальний рівень складності та безпеки перехрестя в умовах інтенсивного пішохідного руху.

Сучасні методики оцінки безпеки перехресть, як нерегульованих, так і регульованих, здебільшого базуються на аналізі ТП і конфліктних точок між ТЗ. Однак вони мають суттєві обмеження: при оцінці нерегульованих перехресть часто не враховуються конфліктні взаємодії між пішоходами і транспортом, а також майже повністю ігноруються велосипедисти та інші нестандартні учасники руху. У випадку регульованих перехресть методики зазвичай концентруються на конфліктних точках між ТЗ, навіть ТЗ з трамваями, але не включають взаємодії транспорт–велосипедист або пішохід–велосипедист. Відсутність цих компонентів у класичних методиках може пояснюватися історичними обмеженнями даних та практичною орієнтацією на масові потоки автомобілів у середині ХХ столітті, коли велосипедний та громадський рух були менш чисельними або статистично недоступними. Для сучасних умов міського руху, де зростає частка велосипедного та змішаного руху, а також інтенсивність пішохідного потоку, це питання набуває особливої наукової та практичної актуальності: інтеграція всіх типів учасників руху дозволяє більш точно прогнозувати безпеку, конфліктність і потребу у регулюванні на перехрестях.

З аналізу методики визначення ступеня небезпеки перетинання [2] видно, що розрахунок ґрунтується виключно на оцінці конфліктних точок між ТЗ. У формулі визначення ступеня небезпеки кожної точки враховуються коефіцієнти нерівномірності руху та типи конфлікту, але не передбачається участь пішоходів у конфліктній ситуації. Такий підхід є суттєвим обмеженням, адже в умовах міського середовища пішоходи виступають повноцінними учасниками дорожнього руху, і їхня взаємодія з транспортом часто створює небезпечні ситуації, особливо на нерегульованих перетинаннях. Можлива причина відсутності врахування пішоходів у методиці — її розробка на основі статистичних даних аварійності, де пішохідні конфлікти або не були враховані окремо, або оцінювались як менш частотні, порівняно з транспортними. Однак з точки зору сучасних принципів безпеки руху (наприклад, Vision Zero), пішоходи мають бути включені до оцінки ступеня небезпеки, адже навіть одна конфліктна точка з пішоходом може мати серйозні наслідки.

У наукових та нормативних джерелах таблиці відносної аварійності конфліктних точок (як для регульованих, так і для нерегульованих перехресть) фактично відображають лише взаємодії ТП між собою. У деяких випадках додатково враховується конфлікт «автомобіль–трамвай», проте зовсім не розглядаються інші критично важливі взаємодії, зокрема: ТЗ – пішохід (на переходах і при правоповоротних чи лівоповоротних маневрах); ТЗ – велосипедист (особливо в умовах організації велосмуг та велосипедних перехресть); велосипедист – пішохід (на змішаних ділянках і в зонах спільного руху); трамвай – велосипедист / пішохід (характерні для центральних вулиць та трамвайних коридорів). Наявність таких конфліктів давно підтверджена статистикою ДТП, однак методики їх не інтегрують у розрахункову базу. Це суттєво занижує реальний рівень оцінки небезпеки перехресть, особливо в умовах міського середовища, де пішохідні та велосипедні потоки є масовими й постійно зростають. Крім того, сучасні тенденції розвитку міського транспорту в Україні та ЄС передбачають активне впровадження веломаршрутів і концепцій сталої мобільності. Це породжує нові виклики та ризики для ВДМ, адже традиційні схеми організації руху проектувались здебільшого для автомобілів. Ігнорування велосипедних та пішохідних конфліктів у розрахунках означає відсутність належної превентивної оцінки потенційної аварійності.

На думку авторів, вирішення проблеми полягає у:

1. Розширенні класифікації конфліктних точок за рахунок додаткових категорій «транспорт–пішохід», «транспорт–велосипедист», «велосипедист–пішохід», «транспорт–трамвай–велосипедист»;
2. Введенні коригуючих вагових коефіцієнтів для цих типів взаємодій із урахуванням їхньої критичності (високий ризик травматизму навіть при меншій частоті подій);
3. Запровадженні емпіричних досліджень на основі відеоспостереження та аналізу «передаварійних ситуацій», що дозволить накопичити статистичну базу для майбутньої інтеграції в методики.
4. Адаптації підходів до європейських стандартів (Vision Zero, SUMP), де безпека вразливих учасників руху є пріоритетною.

Таким чином, подальший розвиток методик оцінки безпеки перехресть повинен бути спрямований на комплексне врахування всіх учасників дорожнього руху, що відповідає як сучасним науковим викликам, так і практичним потребам українських міст.

Найбільш складним завданням при вирішенні проблеми є друге, для якого слід розробити алгоритм визначення коригуючих вагових коефіцієнтів:

1. Визначення типів конфліктних взаємодій. Тут слід скласти перелік можливих типів взаємодій між учасниками руху (автомобіль–автомобіль, автомобіль–пішохід, автомобіль–велосипедист тощо).
2. Збір даних. Для кожного типу взаємодії зібрати інформацію про кількість зареєстрованих ДТП, тяжкість їх наслідків (травмовані, загиблі, матеріальні збитки), інтенсивність руху відповідних учасників (щоб врахувати, наскільки часто такі ситуації виникають).
3. Оцінка ризику. Для кожного типу взаємодії визначити, наскільки він небезпечний у порівнянні з іншими. Наприклад, навіть якщо кількість ДТП «автомобіль–пішохід» менше, їх наслідки зазвичай серйозніші, ніж у конфліктів «автомобіль–автомобіль».
4. Визначення відносної небезпеки. На основі даних і експертних оцінок встановити «вагу» для кожного типу взаємодії. Це може бути шкала (наприклад, від 1 до 5), де 1 — найменш критичні взаємодії, 5 — найбільш критичні (з високим ризиком травматизму).
5. Присвоєння вагових коефіцієнтів. Для кожного типу взаємодії призначити коефіцієнт відповідно до його небезпеки.
6. Використання коефіцієнтів у розрахунках. При подальшій оцінці перехрестя враховувати не тільки кількість конфліктних точок, а й їхню «вагу» — тобто критичність. Таким чином, взаємодії з високим ризиком будуть мати більший вплив на загальний показник складності.

Запропонований спрощений алгоритм визначення коригуючих вагових коефіцієнтів може бути корисним для фахівців з організації та безпеки дорожнього руху, проєктувальників

транспортної інфраструктури, а також науковців, які займаються питаннями оцінки ефективності функціонування ВДМ. Використання такої методики дозволяє комплексніше враховувати ризики для всіх учасників дорожнього руху, особливо пішоходів і велосипедистів, що є надзвичайно важливим в умовах сучасних міст. У подальших наукових працях авторами буде представлено більш деталізовану методику з обґрунтуванням принципів визначення вагових коефіцієнтів на основі статистики ДТП, експертних оцінок та аналізу реальних транспортних ситуацій.

Література

1. Кашканов А.А., Кужель В.П. Організація дорожнього руху: навчальний посібник. Вінниця, 2016. 125 с.
2. Організація та безпека дорожнього руху: Підручник / О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін.: за заг. ред. В. П. Поліщука. К., Знання України, 2016. 467 с.

ОЦІНКА РОЛІ ДОРОЖНІХ ЗНАКІВ У ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЕРЕХРЕСТЬ

Холодова О. О., Бугайова М. О., Малінський В. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

olgaholodova280781@gmail.com

В сучасних умовах зростання інтенсивності дорожнього руху та збільшення кількості транспортних засобів (ТЗ) проблема безпеки на дорогах набуває особливої ваги. Однією з основних причин дорожньо-транспортних пригод (ДТП) є незадовільна організація дорожнього руху (ОДР), яка охоплює комплекс заходів щодо регулювання, управління та контролю транспортних потоків (ТП). Важливу роль у забезпеченні належного рівня безпеки та ефективності руху відіграє дорожня сигналізація, зокрема дорожні знаки. Їх правильне доцільне розташування, відповідність чинним нормам та належний технічний стан є важливими факторами, що сприяють зниженню аварійності та покращенню умов пересування.

Аналізуючи причини ДТП, можна виокремити такі аспекти, як недостатня видимість знаків, їх невідповідність нормативним вимогам, надмірна або недостатня кількість інформації для водіїв, що призводить до помилкових рішень та порушень правил дорожнього руху (ПДР). У зв'язку з цим виникає необхідність детального дослідження впливу якісного облаштування дорожніх знаків на ефективність функціонування перехресть, оскільки саме на цих ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ) спостерігається висока концентрація ТП та потенційно небезпечних ситуацій.

Аналіз наукових досліджень щодо впливу дорожніх знаків на безпеку руху дозволяє виокремити кілька основних напрямів [1-18]. Перший – це дослідження впливу знаків на поведінку водіїв та їхнє дотримання ПДР, включаючи питання видимості, розташування та зрозумілості знаків. Другий – це вивчення ефективності різних інженерних рішень, таких як використання підсвічених або активних знаків для підвищення безпеки. Третій напрям охоплює аналіз впливу дорожніх знаків на кількість та тяжкість ДТП у різних умовах, включаючи урбанізовані території та ділянки з обмеженою видимістю.

У той час як значна частина досліджень зосереджена на нерегульованих перехрестях або місцях без світлофорного регулювання, наша робота спрямована на оцінку впливу дорожніх знаків саме на регульованих перетинах. Ми розглянемо, як неправильне розміщення, відсутність або недостатня ефективність знаків впливають на затримки руху, поведінку водіїв та загальний рівень безпеки на регульованих перетинах. Це дозволить запропонувати обґрунтовані рішення для оптимізації дорожнього середовища та підвищення ефективності транспортної інфраструктури.

До входних параметрів для моделювання дорожнього руху на регульованому перехресті відносяться: геометричні характеристики перехрестя (кількість підходів, ширина смуг руху, наявність окремих смуг для поворотів, довжина накопичувальних смуг); тип і режими роботи світлофорного регулювання (тривалість фаз, цикл регулювання, тип управління - фіксований цикл або адаптивне управління); інтенсивність ТП (обсяги руху в годинах пік та міжпіковий період, розподіл ТЗ за напрямками); характеристики ТП (склад ТП, розподіл швидкостей ТЗ, частка ТЗ, що здійснюють поворотні маневри); поведінкові параметри водіїв (середній час реакції, схильність до ризикованої поведінки, дотримання правил пріоритету); розташування та вплив дорожніх знаків (їхня видимість, відстань до прийняття рішення водієм, відповідність знаків до реальних умов руху); дорожні умови (коефіцієнт зчеплення покриття, наявність нерівностей, погодні умови, рівень освітлення).

Серед усіх входних параметрів особливу увагу в даному дослідженні приділено дорожнім знакам, оскільки саме вони є основним фактором впливу на поведінку водіїв і ОДР на перехрестях. Дорожні знаки відіграють ключову роль у формуванні траєкторій руху ТЗ і поведінки водіїв на перехрестях. Їхній вплив можна розглядати за такими аспектами:

1. Регулювання ТП (заборонні та попереджувальні знаки сприяють зниженню аварійності, змушуючи водіїв змінювати швидкість чи обирати безпечні траєкторії).

2. Оптимізація швидкісного режиму (обмеження швидкості дозволяють уникати критичних точок конфлікту, зменшуючи ризик зіткнень).

3. Підвищення рівня прогнозованості маневрів (інформаційні та вказівні знаки допомагають водіям завчасно готуватися до зміни напрямку руху, знижуючи кількість різких гальмувань і змін смуг).

4. Вплив на увагу водія (наявність знаків безпеки змушує водія підвищувати концентрацію перед потенційно небезпечними ділянками).

5. Зменшення затримок (правильне розташування знаків дозволяє знизити рівень нерішучості водіїв і збільшити пропускну здатність перехрестя).

Перераховані аспекти впливу дорожніх знаків є надзвичайно важливими для нашого дослідження, оскільки вони безпосередньо пов'язані з оцінкою безпеки та ефективності функціонування регульованого перехрестя. Зокрема, регулювання ТП та оптимізація швидкісного режиму сприяють мінімізації конфліктних ситуацій, зменшенню кількості небезпечних маневрів і потенційних місць аварій. Завдяки цьому можна оцінити, наскільки ефективно дорожні знаки виконують свою функцію в забезпеченні безпеки руху. Підвищення рівня прогнозованості маневрів та вплив на увагу водія безпосередньо впливають на поведінку учасників руху, що є ключовим фактором у попередженні ДТП. Якщо водії заздалегідь отримують чітку інформацію про майбутні маневри та небезпеки, це суттєво знижує ризик екстрених ситуацій на перехресті. Крім того, зменшення затримок та підвищення пропускну здатності перехрестя безпосередньо впливають на його ефективність. Раціональне розташування та відповідність дорожніх знаків реальним умовам дозволяє зменшити нерішучість водіїв, що сприяє плавності руху та скороченню часу очікування. Таким чином, аналіз цих аспектів дає можливість оцінити не лише якість ОДР, а й запропонувати конкретні заходи для підвищення рівня безпеки та оптимізації трафіку на регульованих перехрестях.

Найпоширеніші проблеми, пов'язані з дорожніми знаками на перехрестях є:

1. Недостатня видимість знаків – через рослинність, неправильно встановлені рекламні конструкції або недостатнє освітлення в нічний час.

2. Незрозуміле або суперечливе розташування знаків – коли одночасно встановлені знаки можуть створювати неоднозначність для водіїв (наприклад, обмеження швидкості та знак пріоритету, що суперечать один одному).

3. Зношеність або відсутність знаків – призводить до хаотичного руху, особливо на нерегульованих перехрестях.

4. Невідповідність реальним дорожнім умовам – наприклад, коли знаки обмежень швидкості або пріоритету руху не відповідають фактичному трафіку або конфігурації дороги. Одним із яскравих прикладів є ситуація із застосуванням знаку 4.6 "Рух праворуч або ліворуч" на Т-подібному перехресті, де другорядна дорога має односторонній рух у дві смуги. Прикладом цього є перехрестя вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харкова в м. Харків (див. рис. 1).

У подібних випадках в годину пік трапляється значний дисбаланс потоків: близько 70% водіїв повертають ліворуч (оскільки рух в цьому напрямку здійснюється в бік центру міста), тоді як лише 30% обирають напрямок праворуч. Таким чином на лівій смузі спостерігається достатньо велика кількість ТЗ, а тоді як сусідня права смуга є вільною. Згідно з ПДР, водії, які повертають ліворуч, мають право займати будь-яку смугу на головній дорозі після повороту. Унаслідок цього ті водії, які повертають ліворуч, часто займають праву смугу перед поворотом, оскільки це дозволяє їм швидше завершити маневр і продовжити рух у необхідному напрямку. Це, у свою

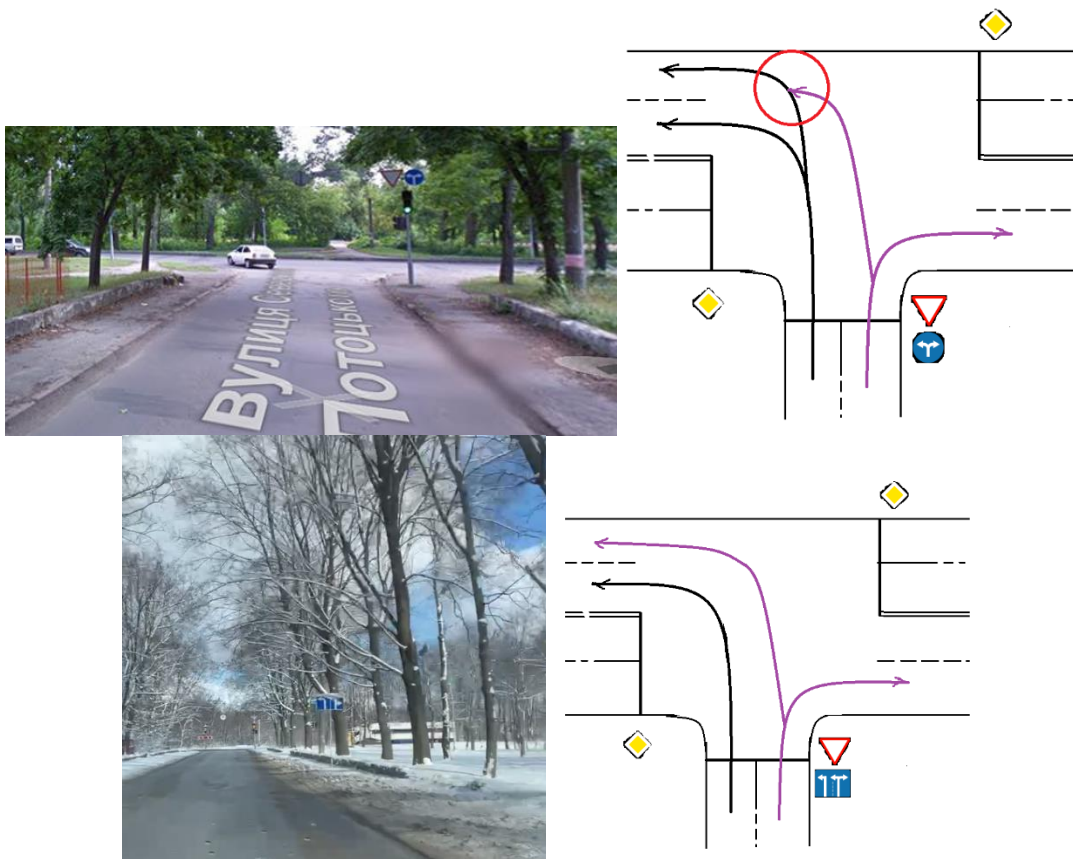


Рисунок 1 - ОДР та конфліктні взаємодії на перехресті вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харков

чергу, створює конфліктну ситуацію: водії, які повертають ліворуч із правої смуги, можуть несподівано зіткнутися з тими, хто повертає з лівої смуги та має право займати будь-яку смугу на головній дорозі. Особливо небезпечним міг би бути випадок, коли частина ТЗ із лівої смуги намагалась би також повернути праворуч, що однозначно ускладнювало би рух і підвищувало ризик ДТП. Виникає ситуація, коли водії, орієнтуючись на інтуїцію та власний досвід, приймають рішення, які можуть суперечити очікуваному сценарію руху інших учасників.

Для мінімізації подібних конфліктів необхідно розглядати комплексні рішення:

1. Використання додаткової розмітки – чітке нанесення стрілок на проїзну частину, що вказували б допустимі напрямки руху по смугах, зменшить кількість ситуацій неправильного вибору смуги перед поворотом.

2. Заміна знаку 4.6 "Рух праворуч або ліворуч" на знак 5.16 "Рух по смугах" – у цьому випадку можна регламентувати, що з правої смуги дозволяється як правий, так і лівий поворот, але з обов'язковим виїздом у відповідну смугу на головній дорозі. Таким чином, з лівої смуги водії зможуть повертати лише в ліву смугу головної дороги, що усуне перетин траєкторій і значно знизить ризик ДТП.

3. Встановлення світлофорного регулювання – запровадження окремих фаз світлофора для різних напрямків руху дозволить уникнути одночасного маневрування автомобілів у зонах конфлікту.

4. Адаптивні системи управління трафіком – використання технологій розпізнавання ТП для динамічного коригування фаз світлофорів або зміни схем організації руху в години пікового навантаження.

Ефективне використання дорожніх знаків на перехрестях залежить від типу перехрестя та умов його експлуатації. На нерегульованих ділянках їхня роль є визначальною, тоді як на регульованих вони виконують допоміжну функцію. Врахування конфігурації перехрестя дозволяє правильно розмістити знаки, що сприяє безпеці та покращенню ОДР. До речі, в лютому 2025 року на перехресті вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харкова було нарешті замінено знак 4.6 на 5.16, тому нами прийнято рішення продемонструвати, як змінюються показники ефективності дорожнього руху при цьому. Нами здійснено

моделювання дорожнього руху в студентській версії PTV VISION VISSIM 2025 року при різних схемах ОДР (варіант 1 – попередня схема з використанням дорожнього знаку 4.6; варіант 2 – існуюча схема з застосуванням знаку 5.16.). У результаті моделювання ТП на перехрестях вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харкова отримано низку показників, які дозволяють оцінити ефективність та екологічність функціонування перехрестя за різних варіантів ОДР. Вони зведені в підсумкові таблиці 1, в якій розрахунок показників безпеки проводиться вручну за відомою методикою в [19].

Таблиця 1 – Оціночні показники (перехрестя вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харкова)

Показник	Варіант схеми ОДР	
	1	2
Середня затримка руху ТЗ на перехресті, с	22,76	8,62
Затримки руху пішоходів, с	5,17	5,18
Викиди шкідливих речовин, г :		
CO	274,527	183,53
NO _x	53,413	35,708
Летючі органічні сполуки	63,624	42,535
Складність перехрестя, m	5 - просте	1 - просте
Коефіцієнт відносної аварійності перехрестя, K_a та ступінь небезпеки	2,04 - безпечне	2,04 - безпечне

Для обґрунтування впливу дорожніх знаків в програмному забезпеченні PTV VISION VISSIM нами побудовані теплові карти щільності, які відображають, наскільки заповненим є певний відрізок дороги ТЗ в заданий момент часу або в середньому за симуляцію. На рисунку 2 можна побачити колірну шкалу: темно-червоні зони – високий рівень щільності (затори, зниження швидкості, можлива перевантаженість); жовті/зелені зони – середня щільність (помірний потік); сині/бліді зони – низька щільність (вільний рух, мінімальна кількість ТЗ).

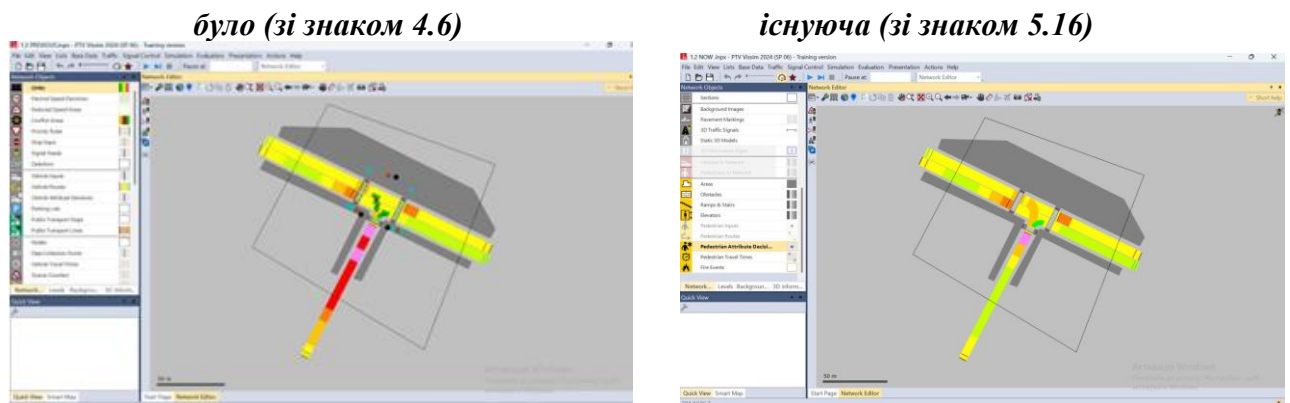


Рисунок 2 – Теплові карти щільності на перехресті вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харкова

Значне зменшення затримки ТЗ та викидів (див. табл. 2) свідчить про ефективність застосування правильної схеми ОДР та дорожніх знаків. Затримки пішоходів не змінилися, але загальна безпека зберіглася завдяки світлофорам.

Таблиця 2 – Аналіз оціночних показників на перехресті вул. Северина Потоцького – просп. Героїв Харкова

Показник	Було	Існуючий	Зміна	Оцінка
Середня затримка ТЗ, с	22,76	8,62	-14,14 с	Суттєве покращення
Затримка пішоходів, с	5,17	5,18	+0,01 с	Без змін
Викиди шкідливих речовин, г				
– СО	274,527	183,53	-90,997 г	Зменшення
– NOx	53,413	35,708	-17,705 г	Зменшення
– Летючі органічні сполуки (ЛОС)	63,624	42,535	-21,089 г	Зменшення
Складність перехрестя	5 – просте	1 – просте	-4 (спрощення)	Покращення
Аварійність	2,04 – безпечне	2,04 – безпечне	Без змін	Без змін

Аналіз результатів моделювання засвідчив, що правильне застосування дорожніх знаків у поєднанні зі світлофорним регулюванням дозволяє істотно покращити умови руху. Усі ключові показники — середня затримка транспорту, рівень викидів шкідливих речовин, складність руху — зазнали позитивних змін. Незначне зростання затримок пішоходів не є критичним. Отримані дані стали основою для розробки практичних рекомендацій щодо оптимізації розміщення знаків та вдосконалення ОДР у міському середовищі. Результати дослідження підтверджують, що дорожні знаки відіграють ключову роль у підвищенні ефективності функціонування перехресть. Вдосконалення їх системи є не лише питанням безпеки, а й засобом оптимізації ТП, зменшення екологічного навантаження та покращення загального комфорту дорожніх учасників.

Надалі доцільно продовжити дослідження впливу дорожніх знаків на ефективність функціонування перехресть, розширивши як методологічну базу, так і сферу аналізу. Зокрема, пропонується: розширити кількість досліджуваних перехресть з різними типами регулювання (нерегульовані, кільцеві) для порівняльної оцінки ефективності знаків у різних умовах; поглибити аналіз взаємодії дорожніх знаків із іншими елементами ОДР (зокрема, як знаки працюють у парі зі світлофорним регулюванням; як впливають на вибір траєкторій водіями; як впливають на зменшення помилок у прийнятті рішень); продовжувати моделювати сценарії з різними конфігураціями знаків (наявність/відсутність, заміна, перекриття, дублювання) у транспортному симуляторі PTV VISSIM для оцінки зміни показників затримки, безпеки та екологічного навантаження; оцінити роль дорожніх знаків у формуванні поведінки пішоходів, особливо на переходах без світлофорів — з урахуванням психологічного сприйняття знаків; дослідити економічну ефективність оптимізації знакової інформації (зменшення числа ДТП, пов'язаних з недоліками в розміщенні або дизайні знаків; підвищення пропускної здатності без необхідності дорогих реконструкцій); провести соціологічне опитування серед водіїв і пішоходів щодо зрозумілості та ефективності існуючих дорожніх знаків — як емпіричну базу для подальшого вдосконалення нормативів.

Література

1. Barbara Metz, Hans-Peter Krüger, Do supplementary signs distract the driver? Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Volume 23, 2014. P. 1-14, ISSN 1369-8478, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.12.012>
2. Šarić, Ž., Xu, X., Duan, L., & Babić, D. (2018). Identifying the safety factors over traffic signs in state roads using a panel quantile regression approach. Traffic Injury Prevention, 19(6), 607–614. <https://doi.org/10.1080/15389588.2018.1476688>
3. Xu X, Šarić Ž, Zhu F, Babić D. Accident severity levels and traffic signs interactions in state roads: a seemingly unrelated regression model in unbalanced panel data approach. Accid Anal Prev. 2018 Nov;120:122-129. doi: 10.1016/j.aap.2018.07.037

4. Peter Thurston, Chief Executive Officer Roadmarking Industry Association of Australia. Pavement Markings Role in Enhancing Road Safety Strategies. November, 09. 12 p. URL: <https://www.acrs.org.au/files/papers/24%20Thurston%20Pavement%20markings.pdf>
5. WOUNBA Jean Francois, TOKAM TINGANG Ulrich Cabrel, BWEMBA Charles, NKENG George ELAMBO. The impact of road signs on road traffic accidents: case of Yaounde, Cameroon. International Journal of Applied Science and Research. IJASR 2021, VOLUME 4, ISSUE 2 MARCH – APRIL. ISSN: 2581-7876.
6. Oscar Oviedo-Trespalacios, Verity Truelove, Barry Watsona, Jane A. Hinton. The impact of road advertising signs on driver behaviour and implications for road safety: A critical systematic review. Transportation Research Part A 122. 2019. Pp. 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.012>
7. Jodi Carson, Fred Mannering. The effect of ice warning signs on ice-accident frequencies and severities, Accident Analysis & Prevention, Volume 33, Issue 1, 2001, P. 99-109. ISSN 0001-4575, [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00020-8).
8. Babić, D., Babić, D., Fiolic, M., & Ferko, M. (2022). Road Markings and Signs in Road Safety. Encyclopedia, 2(4), 1738-1752. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040119>
9. Tekeş, B., Solmazer, G. ve Alkan, H. N. (2021). The relationship between traffic sign comprehension and risky traffic behaviors. Nesne, 9(22), 755-769. DOI: 10.7816/nesne-09-22-01
10. Adel S. Abdul Jabbar, Syed Abid A. Naqvi. Study of Road Signs in Saudi Arabia, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, Volume 5, Issue 2, 1993. P. 303-311, ISSN 1018-3639, [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30586-5](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30586-5).
11. Matin Giahni Foomani. Assessing the Impact of Active Signage Systems on Driving Behavior and Traffic Safety Concordia University, 2022. 225 p. URL: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/990857/7/Foomani_PhD_F2022.pdf
12. Rista, E., & Fitzpatrick, K. (2020). Comparison of LED-Embedded Pedestrian Crossing Signs with Rectangular Rapid Flashing Beacons and Pedestrian Hybrid Beacons. Transportation Research Record, 2674(11), 856-866. <https://doi.org/10.1177/0361198120941849> (Original work published 2020)
13. Hashim Al-Madani. Influence of drivers' comprehension of posted signs on their safety related characteristics, Accident Analysis & Prevention, Volume 32, Issue 4, 2000. P. 575-581. ISSN 0001-4575, [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00084-6).
14. Hu L, Feng D, Li Y, Xu J, Zheng J. The Effect of Safety Signs on the Monitoring of Conflict and Erroneous Response. Front Psychol. 2022 Feb 17;13:830929. doi: 10.3389/fpsyg.2022.830929.
15. Ferko M, Stažnik A, Modrić M, Dijanić H. The Impact of Traffic Sign Quality on the Frequency of Traffic Accidents. Promet [Internet]. 2019, Oct.25 [cited 2025Mar.27]; 31(5):549-58. Available from: <https://traffic.fpz.hr/index.php/PROMTT/article/view/3023>
16. Yannis, G., Kondyli, A., & Georgopoulou, X. (2013). Investigation of the impact of low cost traffic engineering measures on road safety in urban areas. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, 21(2), 181–189. <https://doi.org/10.1080/17457300.2013.796387>
17. Shyrle Berrio, Lope H. Barrero. Characterization of the state of the traffic signs focused on cyclists in Bogotá. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Volume 20, 2023, 100837. ISSN 2590-1982, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100837>.
18. Babić, D., Babić, D., Fiolić, M., Ružić, M. (2021). Effect of Different Stop Sign Configurations on Driving Speed When Approaching a Rural Intersection at Night-Time. In: Petrović, M., Novačko, L. (eds) Transformation of Transportation. EcoProduction. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66464-0_1
19. Організація та безпека дорожнього руху: Підручник / О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єсєсов та ін.: за заг. ред. В. П. Поліщука. К., Знання України, 2016. 467 с.

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ЕКСТРЕНИМИ СИТУАЦІЯМИ В МЕРЕЖІ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

Степанов О. В.¹, Третьяк А. О.²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

o.stepanov@nubip.edu.ua

Екстрені ситуації на дорожній мережі — такі як дорожньо-транспортні пригоди (ДТП), масові затори через аварії, природні катастрофи, несподівані перешкоди — становлять значну загрозу для безпеки учасників руху, функціонування транспортної інфраструктури та оперативного реагування служб екстреної допомоги. У міських агломераціях особливо гостро стоять питання прибуття швидкої, пожежних, аварійних служб, оскільки затори й перевантаженість вулиць можуть значно збільшувати час реакції, що збільшує ризики для життя та здоров'я людей.

Водночас традиційні системи управління дорожнім рухом рідко враховують вимоги екстреного реагування: світлофорні режими, інформаційні табло та диспетчерські центри зазвичай не оптимізовані для першочергового пропуску служб, а аналіз інцидентів часто залишається реактивним — після того, як подія вже сталася. У цьому контексті інноваційні підходи — на основі смарт-технологій, алгоритмів штучного інтелекту та мобільних рішень — здатні змінити парадигму: від реакції до превенції, від статичного управління до адаптивного реагування в реальному часі.

Метою цієї доповіді є аналіз інноваційних технологій і підходів, які можуть бути використані для підвищення ефективності реагування на екстрені ситуації в дорожній мережі, зокрема: прогнозування аварій, оптимізація маршрутів екстрених служб, інтеграція ІТС (інтелектуальних транспортних систем) з системами реагування, а також перспективи для української транспортної інфраструктури.

Ключові проблеми реагування на екстрені ситуації в дорожньому русі

Поганий час реагування екстрених служб

Затори в містах, непередбачувані інциденти та неефективне світлофорне регулювання можуть значно уповільнити прибуття швидкої або пожежних. Відсутність автоматизованої пріоритизації для служб — це суттєвий бар'єр для безпеки.

Недостатнє прогнозування ризику

Без аналізу даних про історію ДТП, потоки трафіку, погодні умови чи особливості інфраструктури, системи управління не можуть заздалегідь ідентифікувати «гарячі точки», де ймовірність аварій зростає.

Інформаційна розрізненість

Часто системи, які відповідають за рух (ІТС), диспетчерські служби та екстрені служби не інтегровані. Точки інцидентів можуть бути зафіксовані пізно або неточно, інформація про них не досягає відповідних служб у потрібний час.

Обмежена інфраструктура «зеленого коридору»

Не у всіх містах існує фізична або програмна підтримка для створення зелених коридорів для екстрених служб (наприклад, пріоритет на світлофорах, спеціальні смуги).

Кібербезпека та надійність систем

Смарт-рішення, які керують трафіком або оптимізують маршрути служб, піддаються ризикам кібератак або технічних збоїв, що може критично сказатися під час екстрених подій.

Інноваційні підходи до реагування

1. Прогностичні моделі аварій

Використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє оцінювати ймовірність ДТП в конкретних ділянках мережі, з урахуванням історичних даних, погодних умов, інтенсивності руху. Наприклад, дослідження виявляють, що моделі на основі глибинного навчання можуть автоматично виявляти аномалії та попереджати владу або

диспетчерські служби про потенційні екстрені події (див. методи, подані у роботах «AI on the Road»).

2. Смарт-маршрути для екстрених служб

Інтеграція ІТС з екстреними службами: система може розраховувати оптимальні маршрути для швидкої, пожежної або поліції з урахуванням поточного трафіку, стану світлофорів, заторів, інцидентів. При цьому важливо використати пріоритизацію світлофорів (наприклад, «зелений коридор») саме для екстрених транспортних засобів, щоб мінімізувати затримки.

3. Edge-обчислення для оперативного реагування

Архітектури, що використовують обчислення на кордоні мережі (Edge Computing), можуть прискорити обробку даних для прийняття рішень в реальному часі. Наприклад, нещодавні дослідження пропонують рішення з FPGA і алгоритмом Дейкстри для швидкого маршруту екстрених транспортних засобів.

4. Інтелектуальні системи евакуації

При масових інцидентах або катастрофах smart-платформи можуть координувати дії всіх учасників: транспорт, служби екстреного реагування та населення. Наприклад, концепції інтелектуального системного реагування (Evacuation Management Framework) передбачають використання AI, сенсорів і розподілених каналів зв'язку для адаптивного планування евакуації.

5. Системи виявлення інцидентів на основі відео та IoT

Камерні мережі та IoT-сенсори у ІТС можна використовувати для реального часу виявлення ДТП, небезпечного маневрування або об'єктів, що створюють загрозу (наприклад, пішоходи або перешкоди на проїжджій частині). Алгоритми глибокого навчання дозволяють аналізувати відеопотоки і формувати тривожні сповіщення для диспетчерів або попереджувальних систем.

На рівні державного управління, Україна має рекомендаційні документи щодо системи управління безпекою руху, які включають аналіз ризиків і планування реагування на ДТП згідно зі стандартом ISO 39001.

У наукових дослідженнях (наприклад, «Аналіз підходів до реалізації системи управління безпекою дорожнього руху в Україні») вказується на необхідність інтеграції даних ІТС, екстрених служб та ризик-менеджменту.

У зарубіжній практиці міські центри управління використовують IoT, системи раннього оповіщення та алгоритмічне планування маршрутів для підвищення ефективності реагування служб.

Проблеми та перспективи розвитку

Розгортання інноваційних систем (сенсори, Edge-обчислення, AI) потребує значних вкладень. Бюджетні обмеження міських адміністрацій можуть стримувати впровадження.

Екстрені служби, дорожні оператори, ІТС-центри часто мають різну організаційну структуру. Відсутність взаємодії та єдиного протоколу обміну даними ускладнює швидке реагування.

Не всі ділянки дорожньої мережі мають інфраструктуру для сенсорів або надійного зв'язку. У разі відмов зв'язку або обчислень можливе зниження надійності реагування.

Інтегровані системи піддаються ризику атак. Якщо зловмисники отримають доступ до каналів управління світлофорами або маршрутизації служб, це може призвести до трагедії.

Водії та мешканці можуть не довіряти новим технологіям або не знати, як діяти під час екстрених оповіщень. Потрібні чіткі інструкції, комунікаційні канали та освітні програми.

Побудова таких центрів, де дані ІТС, служби реагування та диспетчерські системи працюватимуть як єдина екосистема, дасть змогу створити ефективні алгоритми пріоритизації та маршрутизації.

Застосування edge-обчислень дозволить приймати рішення ближче до джерела даних — прискорюючи час реагування та зменшуючи затримки.

Смарт-фреймворки на основі AI і сенсорів з оповіщенням у реальному часі здатні координувати евакуацію під час масштабних інцидентів або катастроф, покращуючи безпеку та організацію руху.

Створення національних і міжнародних стандартів взаємодії ІТС, екстрених служб і транспортного господарства буде ключовим для інтеграції систем.

Впровадження криптографічних протоколів, багаторівневої автентифікації та захищених архітектур дозволить мінімізувати загрози кібернападів.

Просвітництво водіїв та громадськості про нові системи, правила поведінки під час екстрених оповіщень, а також тренування служб — все це сприятиме довірі та готовності до впровадження інновацій.

Інноваційні підходи до управління екстреними ситуаціями на дорожній мережі, засновані на смарт-технологіях (AI, IoT, Edge Computing, V2I/V2V, інтелектуальні моделі), відкривають новий рівень безпеки та оперативності реагування. Замість реактивного підходу можна перейти до передбачуваного, коли система прогнозує небезпечні сценарії й оптимально реагує ще до їх повної реалізації. Хоча існують значні бар'єри: фінансові, технічні, організаційні й безпекові, перспективи їх подолання — реальні та стратегічно важливі.

Для України такі інновації можуть стати частиною національної стратегії безпеки дорожнього руху, інтегруючись у наявні ІТС та диспетчерські системи. Системи пріоритизації екстрених служб, смарт-евакуація й прогностичні моделі — це не просто технології, а механізми, які можуть зберегти життя, знизити втрати та зробити транспортну мережу більш стійкою до надзвичайних подій.

Література

1. Мінрегіон України. Рекомендаційний посібник «Система управління безпекою руху на автомобільному транспорті». Міністерство розвитку громад та територій України, 2025.
2. Птиця Г. Г., Абрамова Л. С. Аналіз підходів до реалізації системи управління безпекою дорожнього руху в Україні. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, 2024, № 17, с. 33–41.
3. Abraham A., Zhang Y., Prasad S. Evacuation Management Framework towards Smart City-wide Intelligent Emergency Interactive Response System. arXiv, 2024.
4. Assoul M.A., Tahir A.M., Mahmoud T., Mdemaya G.B.J., Zekeng Ndadji M.M. A Comprehensive System Architecture ... for Emergency Response in Smart Cities. arXiv, 2024.
5. Adewopo V., Elsayed N. AI on the Road: A Comprehensive Analysis of Traffic Accidents and Accident Detection System in Smart Cities. arXiv, 2023.
6. Наукові праці ДонНТУ: Інтелектуальні системи керування дорожнім рухом з пріоритизацією транспорту за видами (швидка, пішоходи) під час поганих погодних умов.

PROACTIVE ANALYSIS OF ROAD TRAFFIC ACCIDENT IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN BASED ON MACHINE LEARNING MODELS AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

Kobdikova Sh. M.¹, Chupekov Y. K.² Arimbekova P. M.³

¹*Almaty Academy of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan named after Makan Esbulatov,*
sh.kobdikova@gmail.com

²*Police Department of the Almaty region of the Ministry of Internal Affairs,*
yelzhankali@gmail.com

³*Kazakh - German University,*
arimbekova@dku.kz

The problem of ensuring road traffic safety is critically important for the Republic of Kazakhstan. According to the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, the year 2024 was marked by a record increase in the number of road traffic accident [1], resulting in rising social losses and economic damage, which annually exceed 7 billion USD. The key control able factor of accident occurrence remains the human factor (maneuvering, violations, speeding) and the condition of road infrastructure. The existing practice of responding to traffic accident is predominantly retrospective – the analysis is carried out only after incidents have already occurred [3]. Such an approach demonstrates insufficient effectiveness under conditions of rapidly growing traffic flows and urbanization. A transition to proactive methods capable of predicting the emergence of hazardous situations and enabling the implementation of preventive measures in advance is required, which is supported by global research findings [4].

The purpose of the study is to develop and theoretically substantiate a methodology for proactive analysis and prediction of road traffic accident in Kazakhstan based on machine learning models adapted for integration on with the national digital infrastructure.

The objectives of the study include:

1. Analyzing the current state of road traffic accident in Kazakhstan and identifying key risk factors.
2. Justifying the need to transition from retrospective to proactive accident analysis.
3. Selecting and adapting machine learning algorithms for predicting the likelihood and severity of traffic accidents.
4. Developing an algorithm for integrating the predictive model with existing data sources (TOR platform, KazHydromet).
5. Proposing practical recommendations for the use of High-Risk Maps to exchange road traffic safety in Kazakhstan.

The scientific novelty of the study lies in the synthesis of ML models (Random Forest, XG Boots) and GIS-based analysis to create a dynamic proactive model for assessing road traffic accident risk, adapted for the first time to the specific datasets and factors of the road network of the Republic of Kazakhstan, including its integration with the unified digital platform TOR (Traffic Operational Response) [2].

Traditional accident analysis focused on the statistical identification of accident hotspots using historical data [3].

In Kazakhstan, since the year 2000, a total of 246,68 road traffic accidents has occurred resulting in 38,648 fatalities and 312,059 injuries of varying severity (Figure 1).

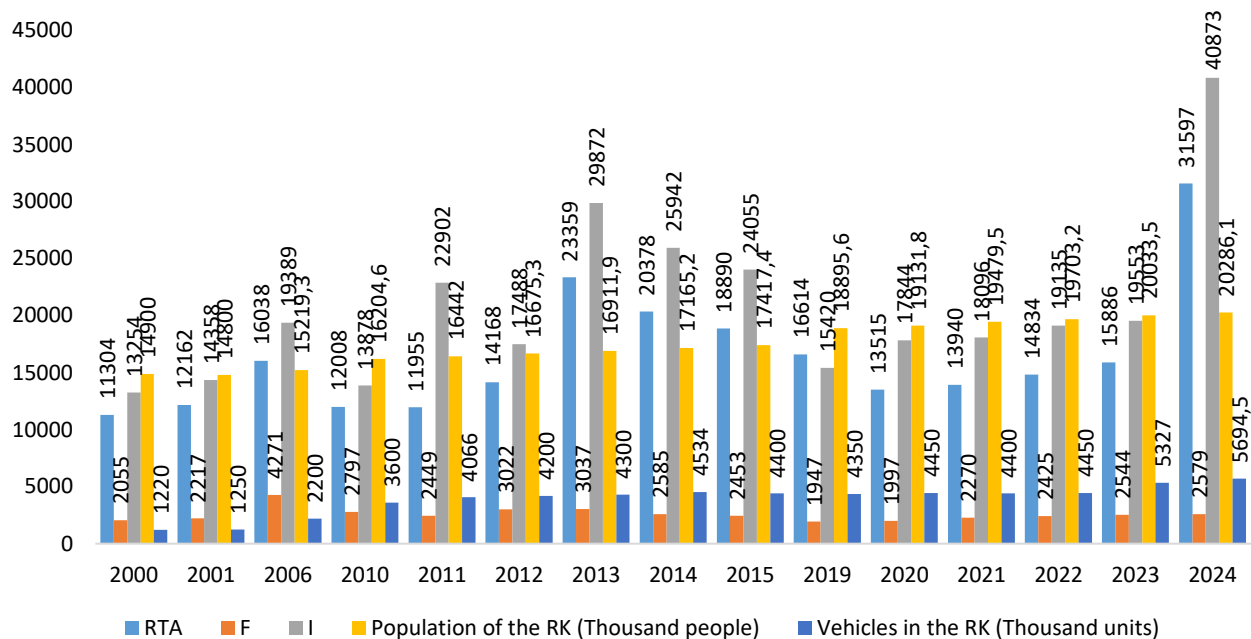


Figure 1 – Dynamics of road traffic accidents, severity of their consequences, and social transport risk expressed in coefficients

Contemporary studies indicate the factors influencing road traffic accidents (RTAs) exhibit a dynamic spatio-temporal character [4], and road traffic safety is determined by the complex interplay between weather conditions and driver behavior [7]. Effective forecasting is achieved through the application of machine learning models (e.g., Random Forest, Gradient Boosting), which are capable of processing large volumes of heterogeneous data and identifying nonlinear dependencies among hundreds of predictions, including weather, traffic intensity, and traffic violations [4]. In particular, gradient boosting algorithms have demonstrated high efficiency in integrated real-time traffic data [9]. Special attention in the literature is devoted to models that assess the severity of RTA outcomes (fatalities and injuries), which is essential for selecting appropriate preventive measures [10]. Current trends include the deployment of deep learning methods [8] and the emphasis on spatio-temporal Big Data analytics [11], which aligns with concept of integration of Geographic Information System (GIS) and the Hotspot Analysis methodology [6] is critically important for visualization and operational decision-making. This approach enables the transformation of numerical probability forecasts into illustrative Risk Maps, which can serve a basis for proactive interventions.

Methodology for Proactive Analysis Based on ML and GIS

1. Data Architecture and integration with TOR

Proactive analysis requires the utilization of Big Data, combining both static and dynamic data. In the context of the Republic of Kazakhstan, the unified digital platform TOR [2] serves as the basis for collecting and aggregating dynamic data. This system integrates:

Static Data: RTA geo-coordinates (KPSiSU GP RK [1]), road surface type, section geometry (JSC “NC “KazAvtoZhol” [5]).

Dynamic Data (Predictors): Traffic intensity, traffic speed, recorder speeding violations (TOR), as well as meteorological data (temperature, precipitation, visibility).

2. Machine Learning Model for Risk Prediction

The Random Forest model is proposed for RTA risk prediction. ML Algorithm Selection: Random Forest is selected due to its high robustness to outliers, its ability to handle large and incomplete datasets effectively, and its capability to assess feature importance. This allows for the accurate identification of Kazakhstan factors (e.g. speed, weather, rod defects) that contribute most significantly accident risk [3]. Predicted Parameter: The classification model predicts the probability that an RTA accident will occur on road segment G during the forecasted time interval t (e.g., the next 24 hours). The integral risk indicator R for segment G at time t combines the predicted probability and the historical RTA severity:

$$R(G, t) = P_{RTA}(t, G) \cdot K_{Gravity}(G) \quad (1)$$

Where:

- $P_{RTA}(t, G)$ – the predicted probability of an RTA, calculated by the ML model;
- $K_{Gravity}(G)$ - the severity coefficient, based on the average severity of RTAs (ratio of fatalities to injuries) historically recorded on the given road segment.

3. Visualization and GIS Analysis

The result of the risk prediction $R(G, t)$ is mapped onto the geoinformation representation of the road network. Using Geographic Information System (GIS) technologies and the Hotspot Analysis method, Proactive Risk Maps are generated [6]. Road segments are color-coded (from green to red), providing operational information for relevant services.

Results and Discussion

1. Analysis of Predictive Performance

The theoretical validation of the model using data from Kazakhstan allows for the identification of the most significant predictors for the national road network. Unlike traditional methods, the proactive model can detect potential accident hotspot that become critical only under the combination by dynamic factors (for example, a road segment that are safe in dry conditions become critically hazardous during rain and high speed). This enables services to respond to the dynamic of risk rather than its historical occurrence.

Key predictions in the context of Kazakhstan:

- Speed monitoring indicator (dynamic): increase in the average traffic speed on a road segment.
- Road surface condition: unsatisfactory road conditions (according to [5], which, in combination with weather factors, increase accident risk.
- Weather factors: sudden temperature drop (risk of ice formation) or heavy precipitation.

2. Practical implementation of Risk Maps

The implementation of Proactive Risk Maps based on GIS ensures operational decision-making efficiency. A map updated at a high frequency (ever 1 – 4 hours) allow for:

- Targeted patrolling: police services receive automatically generated instructions for patrolling “red” segments during the forecasted time interval, significantly improving the effectiveness of limited resources.
- Preventive maintenance: road services can proactively plan the application of anti-icing materials or the repair of road defects based on the forecasted maximum risk, thereby reducing indirect causes of RTAs.

Conclusions

1. A methodology for proactive analysis of RTAs in the Republic of Kazakhstan has been developed and sustained, based on the integration on Big Data (TOR, meteorological data) and predictive machine learning models.

2. The scientific and practical necessity of transportation from reactive responses to forecasting RTAs has been demonstrated, which is critically important given the increasing accident rates in Kazakhstan [1].

3. The purposed approach enables dynamic risk assessment on road segments, identification of key influencing factors, and visualization of results in the form of Proactive Risk Maps.

Practical Recommendations for Implementation in Kazakhstan

- Integration with TOR: it is recommended that the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan initiate the development of an ML module for the TOR platform, which would utilize its aggregated data [2] as the primary input features for calculating RTA probability [4].
- Interagency collaboration: ensure standardized data exchange between the Ministry of Internal Affairs (RTAs), JSC “NC “KazAvtoZhol” (road conditions [5]), and KazHydromet (weather forecasts) to improve accuracy of the predictive model.

- Pilot project: conduct pilot testing methodology in Almaty or Astana – regions with the highest traffic density and RTA rates – to evaluate the effectiveness of preventive measures based on ML based forecasting.

References

1. General Prosecutor's Office Republic of Kazakhstan (KPSiSU). Statistical data on registered road traffic accidents in the Republic of Kazakhstan for 2023–2024 [Electronic resource]. Available at: <https://www.kpssu.kz> (дата звернення: 13.11.2025)
2. Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan / Gov.kz. On the introduction of the unified digital platform Traffic Operational Response (TOR) in the cities of Kazakhstan [Electronic resource]. Available at: <https://www.gov.kz/mia> (дата звернення: 13.11.2025)
3. Taylor M., Lee G. Thompson K. Review of Machine Learning Approaches for Road Traffic Accident Prediction // Accident Analysis & Prevention. – 2019. – Vol. 138. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1016/j.aap.2019.105432 (дата звернення: 13.11.2025)
4. Wang X., Kockelman K. Spatial-Temporal Accident Forecasting using Deep Learning Methods // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2018. – Vol. 90. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.003 (дата звернення: 13.11.2025)
5. JSC “NC “KazAvtoZhol. Annual report on the state and development of the republican public road network in the Republic of Kazakhstan [Electronic resource]. Available at: <https://www.kazavtozhol.kz>. (дата звернення: 13.11.2025)
6. Gabr I., Shaheen H. Geospatial Hotspot Analysis of Road Traffic Accidents for Proactive Safety Management using GIS // International Journal of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 18. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1007/s40999-020-00508-y (дата звернення: 13.11.2025)
7. Al-Ahmadi H. M. Al-Qadhi S.S. The Influence of Dynamic Factors on Traffic Safety: A Hybrid Machine Learning Approach // Journal of Safety Research. – 2021. – Vol. 76. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1016/j.jsr.2020.12.010 (дата звернення: 13.11.2025)
8. Chen P., Fan X. Deep Learning for Traffic Accident Prediction: A Comprehensive Survey and Future Directions // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 9. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1109/TITS.2021.3115403 (дата звернення: 13.11.2025)
9. Zhu Y., Zhang J. Integrating Real-Time Traffic Data into Crash Prediction Models using Gradient Boosting Decision Trees // Accident Analysis & Prevention. – 2020. – Vol. 143. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1016/j.aap.2020.105574 (дата звернення: 13.11.2025)
10. Abdel-Aty M.A., Uddin M. N. Abdel-Aty M. A., Uddin M. N. Analysis of factors affecting traffic crash severity using random parameters logit model // Safety Science. – 2018. – Vol. 104. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1016/j.ssci.2017.12.022 (дата звернення: 13.11.2025)
11. Hao W. et al. Spatio-temporal Big Data Analytics for Enhanced Traffic Safety: A Dynamic Perspective // Safety Science. – 2023. – Vol. 165. – [Electronic resource]. – DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106201 (дата звернення: 13.11.2025)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АВАРІЙНОСТІ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ВУЛИЦЯХ ЗАГАЛЬНОМІСЬКОГО ТА РАЙОННОГО ЗНАЧЕННЯ

Просвірнін О. В.¹, Рябушенко О. В.¹, Попадинець Д. М.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Управління патрульної поліції в Харківській області Департаменту патрульної поліції
prosvirnin2001@gmail.com

У сучасних містах питання аварійності набуває особливої актуальності, оскільки зростання інтенсивності дорожнього руху, збільшення щільності забудови та складність транспортних потоків формують нові ризики для безпеки учасників руху. У світовій науковій літературі рівень аварійності часто пов'язують із особливостями міських вулиць: їх функціональним класом, пропускнуою здатністю та швидкісними режимами. В дослідженнях [1,2] автори порівнюють ризики на артеріях (магістральні вулиці) та колекторах (районні вулиці). Робиться висновок, що найбільш тяжкі аварії здебільшого відбуваються на артеріях. Дослідження [3] містить методологічну базу для кількісного порівняння очікуваної аварійності для різних класів доріг. В роботі підтверджується, що магістралі вищого порядку формують інший рівень небезпеки, ніж вулиці локальної та районної мережі, проте характер цих закономірностей значно залежить від специфіки міської структури. Незважаючи на важливість даної тематики, для міста Харкова комплексних робіт, присвячених аналізу зв'язку між класом вулиці та її аварійністю, досі не проводилося. Це обумовило необхідність та актуальність даного дослідження.

У роботі досліджено вплив функціонального класу міських вулиць на рівень аварійності шляхом порівняння двох типів магістралей міста Харкова: загальноміського та районного значення. Для аналізу було розглянуто статистику ДТП за річний проміжок часу, а саме за 2024 рік, по 10 вулицях. Було обрано 5 магістралей загальноміського значення, що забезпечують транзитні та міжрайонні транспортні зв'язки, та 5 районних магістралей, які забезпечують розподіл транспортних потоків усередині житлової структури міста (рис. 1).



Рисунок 1 – Розташування обраних магістральних вулиць загальноміського значення (червоні) та районного значення (сині) в місті Харкові

На рис. 2 представлені коефіцієнти аварійності, які були розраховані за формулою:

$$K_a = C_{\text{заг}} / L, \quad (1)$$

де $C_{\text{заг}}$ - загальна кількість ДТП на ділянці вулиці за рік; L - довжина ділянки вулиці, км.

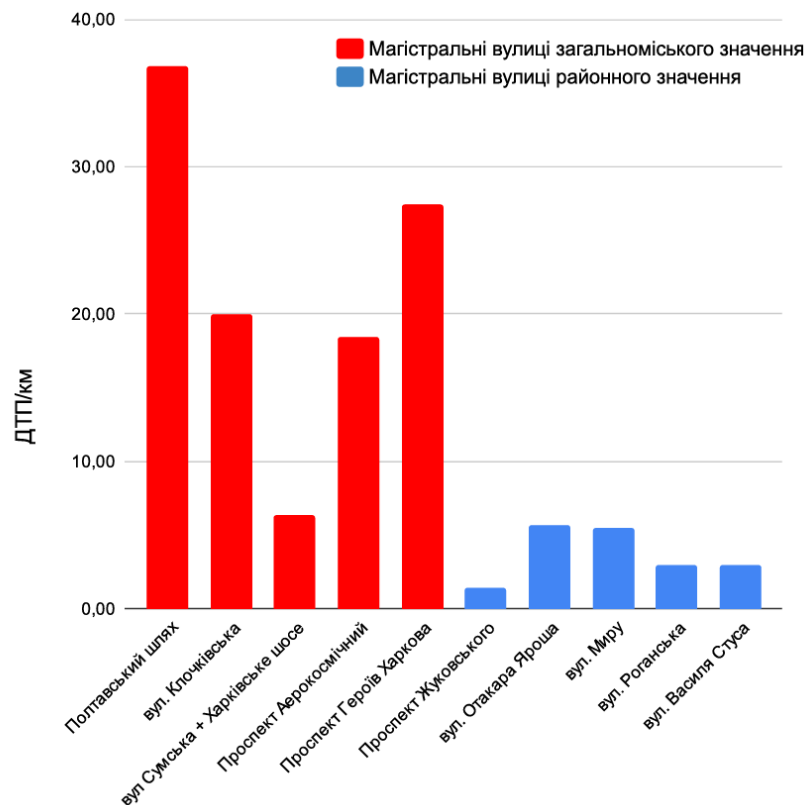


Рисунок 2 – Порівняння коефіцієнтів аварійності для міських магістралей різних типів

Як можна бачити, графік демонструє суттєву різницю між магістральними вулицями загальноміського значення та магістральними вулицями районного значення за показником коефіцієнта аварійності. Вулиці Полтавський шлях, Клочківська, Аерокосмічний проспект, Героїв Харкова мають значно вищі значення коефіцієнту аварійності, що нерідко перевищують 20–35 ДТП/км, тоді як для районних магістралей цей показник переважно знаходиться в діапазоні від 1 до 6 ДТП/км. Така різниця свідчить про те, що вулиці загальноміського значення формують основні ризики аварійності, що може бути пов'язано з інтенсивним рухом, більшою кількістю смуг, високими швидкостями та складнішою структурою транспортних потоків. Натомість районні магістралі, які обслуговують локальні переміщення та мають нижче навантаження, демонструють нижчі ризики ДТП. Таким чином, було підтверджено, що функціональний клас вулиці є одним із ключових чинників, який визначає її рівень аварійності.

Література

1. Xintong Yan, Jie He, Guanhe Wu, Shuang Sun, Chenwei Wang, Zhiming Fang, Changjian Zhang (2024). Driving risk identification of urban arterial and collector roads based on multi-scale data. Accident Analysis & Prevention, Volume 206, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107712>.
2. ITF (2020), “Best Practice for Urban Road Safety: Case Studies”, International Transport Forum Policy Papers, No. 76, OECD Publishing, Paris. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/best-practice-urban-road-safety.pdf>
3. Xuesong Wang, Xueyu Zhang, Yingying Pei (2024). A systematic approach to macro-level safety assessment and contributing factors analysis considering traffic crashes and violations, Accident Analysis & Prevention, Volume 194, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107323>.

ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРНІСНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

Абрамова Л. С.¹, Кобзев В. Г.², Назаров О. С.², Назарова Н. В.², Гарнат А. С.²

¹ Харківський національний автодорожній університет

abramova_ls@ukr.net

² Харківський національний університет радіоелектроніки

volodymyr.kobziev@nure.ua

Існуючі підходи визначення значень показників безпеки дорожнього руху (БДР) для ділянок дорожньої мережі і перехресть ґрунтуються на детермінованих значеннях характеристик дорожнього покриття і рівня освітлення, погодних умов в різні періоди року, інтенсивності руху, стилю водіння і поведінки водіїв та ін. Первинними показниками БДР для конкретних ділянок доріг або їх множин, що визначаються територіальними одиницями, є кількість зареєстрованих ДТП за певний період часу, кількість загиблих та кількість осіб, травмованих внаслідок ДТП. Узагальнені показники (коефіцієнти аварійності і тяжкості наслідків ДТП, коефіцієнт безпеки) обчислюються на основі первинних показників, а також інтенсивності руху, довжини і швидкісних характеристик ділянки дороги. Їх визначення регламентовано стандартами (ДСТУ 4100:2021 "Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні") [1] та нормативними документами (М 218-03450778-652:2008 "Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України") [2].

Пропонується використовувати ймовірнісні методи для різнобічного моделювання можливих ситуацій, що є характерним для камерального підходу моделювання руху і дослідження показників безпеки.

Найпростішим випадком опису такої ситуації є представлення одного з факторів, що впливає на значення показника безпеки дорожнього руху, у вигляді випадкової величини з деяким законом розподілу ймовірностей. Наприклад, при визначенні коефіцієнта безпеки $K_{\text{без}}$ на певній ділянці величина безпечної швидкості V може приймати свої значення в деякому інтервалі між найменшим і найбільшим з однаковою ймовірністю. Відомо, що величина $K_{\text{без}}$ лінійно залежить від V , і це дає можливість використати найпростіші формули теорії ймовірностей при подальших обчисленнях. Зафіксувавши обґрунтоване попередніми розрахунками значення швидкості $V_{\text{вх}}$ на вході до цієї ділянки, можна отримати найменше, найбільше і середнє значення оцінки $K_{\text{без}}$ для прийняття рішення про ступінь небезпеки ділянки дороги. Заміна рівномірного розподілу ймовірностей значень безпечної швидкості V на теоретично обґрунтований інший розподіл дасть можливість додати найбільш ймовірне значення коефіцієнта безпеки $K_{\text{без}}$ до трьох раніше вказаних оцінок ступені небезпеки. Крім того, обрання прийнятного значення рівня надійності (довірчої ймовірності) γ ($0 < \gamma < 1$) при відомому законі розподілу дає можливість визначити межі довірчого інтервалу, до якого з ймовірністю γ буде належати істинне значення коефіцієнта безпеки $K_{\text{без}}$.

Більш складним, але також обґрунтованим для оцінки коефіцієнта безпеки $K_{\text{без}}$, є розгляд у вигляді випадкової величини з певним законом розподілу ймовірностей одного з компонентів входної швидкості $V_{\text{вх}}$, наприклад, швидкості прискореного руху транспортного засобу на початку попередньої ділянки, ширини колії транспортного засобу або висоти його центру мас у розрахунку максимально допустимої швидкості по перекиданню на повороті. Залежність коефіцієнта безпеки від усіх вказаних величин є нелінійною, що приведе до більш складних, але корисних розрахунків раніше вказаних оцінок коефіцієнта безпеки $K_{\text{без}}$.

Обґрунтований вибір параметрів найбільш небезпечних ділянок дорожньої мережі і конструктивних характеристик сучасних транспортних засобів дасть можливість проведення різнобічного камерального дослідження показників безпеки з застосуванням методів теорії ймовірностей.

Подібні ймовірнісні методи можуть бути застосовані при аналізі коефіцієнтів тяжкості наслідків ДТП та коефіцієнтів аварійності на конкретних ділянках дорожньої мережі.

Значення коефіцієнтів аварійності залежать від рівня інтенсивності руху, який на переконання авторів має ймовірнісний характер.

Література

1. ДСТУ 4100:2021 "Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні"
2. М 218-03450778-652:2008 "Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України"

Наукове видання

Збірка тез доповідей

VI міжнародної науково-практичної конференції
«Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом»

18-19 листопада 2025 р.

Колектив авторів

Відповідальний за випуск Іван НАГЛЮК

Видання змішаними мовами

ISBN 978-617-7886-89-0

DOI: 10.61718/in202512.01

Авторські аркуші – 12,3

Видавець СГ НТМ «Новий курс»

Наукова установа

Просп. Перемоги, 77, оф. 179, м. Харків, 61174, Україна

Тел.: +380500301905, +380962250903

Telegram, Viber: +380970440309

Сайт: www.newroute.org.ua

E-mail: info@newroute.org.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК № 8013 від 22.11.2023

Зареєстровано у Global Register of Publishers

Зареєстровано у Crossref із власним префіксом 10.61718