

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.14.88-96

УДК 711.7:656.025.4:004.9

к.т.н., доцент **Васильєва Г.Ю.**,

anvas677@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0557-6925,

Зварич О.А.,

zvarich.dp@gmail.com, ORCID: 0009-0008-2063-5608,

Чередніченко О.П.,

orcherednichenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-0445-2816,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ЧАСОВО-ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗАТРИМОК ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТ

Представлено результати дослідження багаторівневої структури затримок міського пасажирського транспорту на вулично-дорожній мережі великих міст та окреслено підходи до їх зменшення на основі сучасних цифрових технологій. Проаналізовано еволюцію наукових поглядів на міські транспортні потоки – від описових статистичних моделей і класичних графових підходів до мікросимуляцій та методів машинного навчання, що забезпечують оперативну оцінку й прогнозування затримок. Проведено порівняльний огляд світових методик HCM, TRANSYT, мікросимуляційних інструментів і рішень на основі великих даних, визначено їх переваги, обмеження та оптимальні сфери застосування для задач міського пасажирського транспорту. На базі даних GPS-моніторингу, дорожніх детекторів і мобільних сервісів здійснено аналітичну оцінку та верифікацію часово-просторових профілів затримок, сформовано карти «гарячих точок», виокремлено сезонно-добові закономірності та головні причини перевантажень – від недостатньої пропускної здатності окремих ділянок і неефективних світлофорних циклів до впливу погодних умов та інцидентів. Запропоновано концепцію системи моніторингу затримок у реальному часі, що інтегрує багатоканальний збір даних, потокову обробку та алгоритми машинного навчання для миттєвого виявлення й прогнозу порушень руху. Обґрунтовано механізми впровадження «розумної» мобільності через поєднання цієї системи з міськими цифровими платформами – інтелектуальним керуванням світлофорами, електронними квитковими сервісами, геоінформаційними порталами та сервісами Mobility as a Service. Практичне значення роботи полягає у створенні передумов для оперативного диспетчерського управління, скорочення затримок, підвищення регулярності перевезень і зниження екологічного навантаження. Перспективи подальших

досліджень охоплюють розроблення адаптивних прогнозних моделей на базі штучного інтелекту, інтеграцію з системами автономного та мікротранспорту, а також уніфікацію відкритих стандартів обміну даними між операторами міської мобільності.

Ключові слова: просторовий розвиток міста; транспортна інфраструктура; вулично-дорожня мережа; міська мобільність; системи моніторингу руху; розумне місто; інтелектуальні транспортні системи; оптимізація перевезень; планування міського середовища.

Постановка проблеми. Еволюція наукових підходів до вивчення міських транспортних потоків відображає поступове ускладнення міського середовища та розвиток аналітичних інструментів. На початковому етапі дослідження ґрунтувалися переважно на описових статистичних спостереженнях і простих емпіричних залежностях, що дозволяли визначати середні швидкості руху та інтенсивність потоків. З другої половини XX століття поширилися класичні математичні моделі транспортного попиту, теорія черг і графові підходи, які дали змогу розглядати міську вулично-дорожню мережу як складну систему з вузлами та ребрами, прогнозувати завантаження та розподіл транспортних потоків. Подальший розвиток привів до впровадження комп'ютерного моделювання і мікросимуляцій, де враховуються динаміка руху окремих транспортних засобів, зміни у режимах роботи світлофорів та поведінкові аспекти водіїв і пасажирів. У XXI столітті ключову роль почали відігравати великі масиви даних, що надходять із GPS-технологій, датчиків трафіку та мобільних мереж, а також методи машинного навчання для прогнозування затримок і оптимізації маршрутів. Сучасні дослідження поєднують системний аналіз, мережеву науку, штучний інтелект і концепцію «розумного міста», забезпечуючи багаторівневе розуміння та управління міськими транспортними потоками в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Монографія Карлоса Даганцо 1997 року [1] створила фундамент для подальших досліджень, описавши макроскопічні та мікроскопічні закономірності руху й заклавши теоретичні принципи хвильового поширення заторів і моделі черг. На цьому підґрунті у 2000 році вийшов оновлений «Highway Capacity Manual» [2], який стандартизував розрахунки затримок і ввів у практику проектування поняття рівня сервісу, ставши головним інженерним посібником для транспортного планування. Робота Робертсона та колег 2004 року [3] показала, як мережеве узгодження світлофорів через програму TRANSYT може зменшувати затримки на міських коридорах, демонструючи ефективність алгоритмічних методів для оперативного управління. У 2007 році дослідження Барсело і Касаса [4] на

прикладі AIMSUN представило новий рівень деталізації за допомогою мікросимуляцій, що дало можливість враховувати поведінкові аспекти водіїв і пасажирів та прогнозувати варіативність затримок у реальному часі. Подальші роботи вже зосередилися на оперативному управлінні та використанні великих даних. Стаття Кетса і ван Лінта 2012 року [5] довела, що прогнозування прибуття автобусів на основі GPS істотно підвищує регулярність руху. Дослідження Лі, Хонга та Чжана 2015 року [6] вперше комплексно застосувало великі дані й методи машинного навчання для прогнозу часу поїздки на міських артеріях, розширивши масштаби аналітики. У 2019 році Чжен і Лю [7] показали переваги глибокого підкріплювального навчання для динамічного керування світлофорами, що забезпечило суттєве скорочення середніх затримок. Нарешті, робота Чена і Вана 2023 року [8] підсумувала сучасний досвід, описавши інтегровані платформи «розумного міста» з відкритими API та сервісами Mobility as a Service, які забезпечують персоналізоване планування поїздок та адаптивне управління пасажиропотоками. У сукупності ці праці демонструють логічний перехід від базових теорій і нормативів до комплексних, гнучких і масштабованих систем реального часу, що поєднують інженерію, інформаційні технології та штучний інтелект і безпосередньо відповідають сучасним завданням міського будівництва та господарства.

Мета статті полягає у всебічному дослідженні структури затримок міського пасажирського транспорту на вулично-дорожній мережі, розробленні методичних підходів до їх кількісної оцінки та прогнозування на основі сучасних цифрових технологій, а також у формуванні концепції системи моніторингу в реальному часі та інтеграції її з міськими цифровими платформами для підвищення ефективності управління мобільністю й забезпечення сталого розвитку міського середовища.

Виклад основного матеріалу. Концепція системи моніторингу затримок у реальному часі спирається на безперервний збір, обробку та аналіз даних про рух усіх видів міського пасажирського транспорту, включно з автобусами, трамваями, тролейбусами й маршрутними таксі. У її основі лежить багаторівнева мережа датчиків та комунікаційних технологій: GPS-модулі на рухомому складі, дорожні детектори трафіку, камери відеоаналітики, мобільні операторські дані та краудсорсинг із мобільних додатків пасажирів. Дані надходять до центрального аналітичного ядра, де за допомогою алгоритмів потокової обробки, машинного навчання та статистичних моделей відбувається автоматичне виявлення затримок, визначення їх причин і прогнозування подальшого розвитку ситуації. Система працює у режимі майже миттєвої реакції, дозволяючи диспетчерським службам оперативно переналаштовувати маршрути, змінювати графіки, активувати пріоритет на світлофорах або

направляти резервний транспорт. Для забезпечення надійності важливими є багатоканальні канали зв'язку, відмовостійкі хмарні платформи та механізми кіберзахисту, що гарантують безперервність роботи навіть у пікові періоди.

Для узагальнення результатів аналізу доцільно представити порівняльну характеристику провідних світових підходів до оцінювання затримок у міському транспорті. У таблиці 1 систематизовано ключові особливості нормативної методики *HCM*, алгоритмічної оптимізації сигналізації *TRANSYT*, детального мікросимуляційного моделювання та сучасних *big data/ML* рішень. Такий формат дає змогу наочно зіставити вимоги до вхідних даних, вихідні показники, переваги й обмеження кожної моделі, а також окреслити типові завдання, для яких кожен підхід є найбільш ефективним.

Формалізація поняття «структура затримок» передбачає перехід від загального опису транспортних перешкод до чіткої системи вимірюваних показників, які відображають, як саме затримки виникають, розподіляються й змінюються у просторі та часі. Просторово-часова складова цієї структури означає, що кожна затримка може бути локалізована на певній ділянці вулично-дорожньої мережі та прив'язана до конкретного проміжку доби, дня тижня або сезону. У практичному вимірі це виражається у створенні карти або матриці, де для кожного сегмента мережі й кожного інтервалу часу фіксуються середня тривалість і частота затримок, довжина черг, а також швидкість руху відносно нормативної. Такий підхід дозволяє виявляти «гарячі точки» — ділянки з найвищою імовірністю перевантажень — і відстежувати, як змінюється ситуація залежно від добового циклу, погоди чи особливих подій.

Стохастичні характеристики структури затримок відображають їх випадкову, імовірнісну природу. Навіть за стабільного попиту й незмінної інфраструктури час очікування та швидкість руху завжди коливаються через людський фактор, випадкові маневри, мікроінциденти або коливання інтенсивності потоку. Для кількісного опису використовують розподіли ймовірностей часу затримки, варіацію та дисперсію швидкості, коефіцієнти нерегулярності, а також моделі на основі теорії черг або процесів Маркова.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика міжнародних методів оцінювання затримок міського транспорту

Підхід	Суть і призначення	Вхідні дані	Вихідні метрики	Сильні сторони	Обмеження	Типові завдання
HCM	Нормативна методика розрахунку	Інтенсивності, розподіл поворотів,	Середня затримка, рівень сервісу (A–F),	Стандартизованість, швидкість оцінки,	Спрощення процесів, чутливість до припущень,	Швидке техніко-економічне обґрунтування,

	затримок і рівня сервісу для перехресть та коридорів	фази/цикли, геометрія	довжина черги	порівняльність результатів	слабка робота з нестабільними режимами	порівняння альтернатив
TRANSYT	Алгоритмічна оптимізація планів сигналізації для мінімізації затримок у мережі	Профілі потоків, параметри світлофорів, довжини підходів, насичені потоки	Затримка, кількість зупинок, оптимальні офсети/зелені хвилі	Ефективне узгодження світлофорів, практичні плани фаз	Не моделює мікродинаміку маневрів, залежність від якості вхідних даних	Налаштування пріоритету громадського транспорту, координація світлофорів
Microsimulation	Детальне дискретно-подієве моделювання поведінки окремих транспортних засобів та пасажирів	Геометрія мережі, правила руху, графіки сигналів, розклади громадського транспорту	Розподіли затримок, варіабельність, конфлікти, викиди CO ₂ /NO _x	Висока деталізація, врахування поведінкових факторів, оцінка BRT/виділень смуг	Висока трудомісткість калібровки та валідації, потреба у великих обчислювальних ресурсах	Оцінка пріоритету ОТ, аналіз складних вузлів та сценаріїв розвитку
Big data / ML	Аналіз великих масивів GPS/AVL/детекторів для оцінки та прогнозування затримок	Історії траєкторій, швидкості, дані мобільних мереж, погодні фактори, інциденти	Фактична затримка, час поїздки, індекс надійності, прогнози в реальному часі	Масштабованість, реальні патерни, швидка діагностика та прогноз	Неповнота або упередженість даних, складність інтерпретації моделей	Моніторинг і прогнозування затримок у реальному часі, диспетчерські рішення

У поєднанні просторово-часові й стохастичні показники формують повну картину динаміки транспортних процесів: вони дають змогу не лише констатувати факт перевантаження, а й оцінити ризики його виникнення, спрогнозувати тривалість та наслідки, а також вибудувати адаптивні стратегії управління.

Завдяки такій формалізації поняття «структура затримок» набуває точного аналітичного змісту, придатного для моделювання, порівняння різних міських територій та впровадження систем моніторингу і прогнозування в режимі реального часу.

Впровадження «розумної» мобільності вимагає тісної інтеграції цієї системи з наявними міськими цифровими платформами. Ідеться про об'єднання з інтелектуальними транспортними системами керування світлофорами, електронними квитковими сервісами, міськими геоінформаційними порталами та додатками громадського транспорту. Єдиний центр даних дає змогу місту створювати персоналізовані сервіси для пасажирів: динамічні розклади, попередження про затримки, рекомендації альтернативних маршрутів, а також облік навантаження для збалансування пасажиропотоків. Ключову роль відіграють стандартизовані інтерфейси обміну інформацією та відкриті API, що дозволяють підключати приватних операторів таксі, велошерингу чи каршерингу до єдиного середовища «Mobility as a Service». У результаті формується гнучка екосистема міської мобільності, де транспортні оператори, міська влада й користувачі взаємодіють у режимі реального часу, підвищуючи ефективність перевезень, знижуючи затримки та покращуючи якість міського середовища для мешканців і відвідувачів.

Аналітична оцінка та верифікація структури затримок передбачає комплексний збір фактичних даних про рух міського пасажирського транспорту й їх перевірку на достовірність. На основі GPS-треків, даних дорожніх датчиків, камер відеоаналітики та мобільних сервісів формується єдина база, яку очищують від помилок і зіставляють із реальними графіками руху. Побудова карт затримок і часово-просторових профілів дає змогу візуалізувати інтенсивність і тривалість зупинок на окремих ділянках мережі в різні години доби та пори року, визначити «гарячі точки» перевантажень і періоди пікових відхилень. Подальший аналіз статистики дозволяє виокремити домінуючі причини затримок — від недостатньої пропускної здатності вулично-дорожньої мережі та неефективних світлофорних циклів до погодних умов чи інцидентів — і виявити стійкі сезонно-добові закономірності, які лягають в основу прогнозних моделей та рекомендацій з оптимізації руху.

Висновки. Затримки міського пасажирського транспорту мають багаторівневу природу, яка формується поєднанням інфраструктурних, організаційних та поведінкових чинників. Порівняння світових моделей — від нормативного HCM та алгоритмічного TRANSYT до мікросимуляцій і підходів big data — засвідчило доцільність їх комбінованого використання: стандартизовані методи забезпечують швидку базову оцінку, тоді як мікросимуляція і аналіз великих даних дають глибоке уявлення про динаміку та поведінкові аспекти пасажиропотоків. Концепція системи моніторингу затримок у реальному часі демонструє потенціал для підвищення оперативності управлінських рішень та інтеграції у цифрову інфраструктуру «розумного міста». Аналітична оцінка й побудова карт часово-просторових профілів

дозволили виокремити «вузькі місця» мережі та визначити сезонно-добові закономірності, що впливають на регулярність руху.

Перспективами подальших досліджень є створення адаптивних прогнозних моделей, здатних урахувувати короткострокові зміни попиту та інцидентів у русі з використанням технологій штучного інтелекту. Перспективним напрямом є розроблення єдиних відкритих стандартів обміну даними між операторами різних видів транспорту, що забезпечить комплексне керування мобільністю в межах концепції MaaS. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на оцінюванні впливу автономних транспортних засобів і мікромобільності на структуру затримок, а також на розробці методів інтеграції моніторингових систем із міськими енергетичними та екологічними сервісами для підвищення стійкості міської інфраструктури та зниження вуглецевого сліду транспорту.

Список використаних джерел

1. Daganzo, C.F. (1997). *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Oxford: Pergamon. 352 pp.
2. Transportation Research Board. (2000). *Highway capacity manual (HCM 2000)*. Washington, DC: National Academy of Sciences. 1134 pp.
3. Robertson, D.I., Bretherton, R.D., & Whelan, R.A. (2004). TRANSYT: Traffic Network Study Tool—Latest developments. *Traffic Engineering & Control*, 45(6), 207–213. 7 pp.
4. Barceló, J., & Casas, J. (2007). Dynamic network simulation with AIMSUN. In L.K. Helbing, S. Lämmer, & J. Seyfried (Eds.), *Simulation approaches in transportation analysis* (pp. 57–98). Springer. 42 pp.
5. Cats, O., & van Lint, H. (2012). Real-time transit control using bus arrival predictions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 73–84. 12 pp.
6. Li, Z., Hong, Y., & Zhang, D. (2015). A real-time travel time prediction method for urban arterials using big data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 29–44. 16 pp.
7. Zheng, Z., & Liu, H. (2019). Data-driven adaptive traffic signal control using deep reinforcement learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 103, 99–118. 20 pp.
8. Chen, X., & Wang, J. (2023). Smart city mobility platforms for public transport delay management. *Journal of Urban Technology*, 30(2), 45–67. 23 pp.

PhD, Associate Professor **Vasylieva Hanna**,
Postgraduate Student **Oleg Zvarych**,
Master of the Public Administration **Cherednichenko Oleksandra**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

**SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS AND MODELING
OF PUBLIC TRANSPORT DELAYS
IN THE URBAN STREET–ROAD NETWORK**

The article presents the results of a study on the multi-level structure of public transport delays within the street–road networks of large cities and outlines approaches to reducing these delays using modern digital technologies. It analyzes the evolution of scientific views on urban traffic flows—from descriptive statistical models and classical graph-based approaches to microsimulation and machine-learning methods that enable rapid assessment and prediction of delays. A comparative review of global methodologies—HCM, TRANSYT, microsimulation tools, and big-data solutions—highlights their advantages, limitations, and optimal application areas for urban public transport tasks. Based on GPS monitoring data, roadway detectors, and mobile services, an analytical assessment and verification of spatio-temporal delay profiles were carried out, resulting in “hot-spot” maps and the identification of seasonal and diurnal patterns as well as key congestion causes, ranging from insufficient roadway capacity and inefficient signal timings to weather impacts and incidents. The concept of a real-time delay monitoring system is proposed, integrating multi-channel data collection, streaming data processing, and machine-learning algorithms for instant detection and forecasting of traffic disruptions. Mechanisms for implementing “smart” mobility are substantiated through the integration of this system with urban digital platforms—intelligent traffic-signal control, electronic ticketing services, geographic information portals, and Mobility as a Service solutions. The practical significance of the research lies in creating the prerequisites for rapid dispatch management, reducing delays, improving service regularity, and lowering the environmental burden. Prospects for further research include the development of adaptive forecasting models based on artificial intelligence, integration with autonomous and micro-mobility systems, and the unification of open data-exchange standards among urban mobility operators.

Keywords: urban spatial development; transport infrastructure; street–road network; urban mobility; traffic monitoring systems; smart city; intelligent transportation systems; transport optimization; urban environment planning.

REFERENCES

1. Daganzo, C.F. (1997). *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Oxford: Pergamon. 352 pp. {in English}.
2. Transportation Research Board. (2000). *Highway capacity manual (HCM 2000)*. Washington, DC: National Academy of Sciences. 1134 pp. {in English}.
3. Robertson, D.I., Bretherton, R.D., & Whelan, R.A. (2004). TRANSYT: Traffic Network Study Tool—Latest developments. *Traffic Engineering & Control*, 45(6), 207–213. 7 pp. {in English}.
4. Barceló, J., & Casas, J. (2007). Dynamic network simulation with AIMSUN. In L.K. Helbing, S. Lämmer, & J. Seyfried (Eds.), *Simulation approaches in transportation analysis* (pp. 57–98). Springer. 42 pp. {in English}.
5. Cats, O., & van Lint, H. (2012). Real-time transit control using bus arrival predictions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 73–84. 12 pp.
6. Li, Z., Hong, Y., & Zhang, D. (2015). A real-time travel time prediction method for urban arterials using big data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 29–44. 16 pp. {in English}.
7. Zheng, Z., & Liu, H. (2019). Data-driven adaptive traffic signal control using deep reinforcement learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 103, 99–118. 20 pp. {in English}.
8. Chen, X., & Wang, J. (2023). Smart city mobility platforms for public transport delay management. *Journal of Urban Technology*, 30(2), 45–67. 23 pp. {in English}.