

УДК 656.07:004.8

Горіна О.М.

**ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ У КОНЦЕПЦІЇ MOBILITY-AS-A-SERVICE**

Анотація. У роботі проаналізовано фізико-технологічні принципи реалізації концепції *Mobility-as-a-Service*. Особливу увагу приділено радіофізичним аспектам передачі сигналів у стандартах *V2X* та термодинамічній оптимізації енерговитрат транспортних мереж за допомогою ШІ. Визначено вплив інтелектуального управління на процеси горіння в ДВЗ та зниження емісії *NOx*. Окреслено перспективи впровадження інновацій у розбудову «розумних міст».

Abstract. The paper analyzes the physico-technological principles of the *Mobility-as-a-Service* concept. Particular attention is paid to the radiophysical aspects of signal transmission in *V2X* standards and thermodynamic optimization of network energy consumption using AI. The impact of intelligent control on combustion processes in ICE and the reduction of *NOx* emissions is determined. The prospects for implementing innovations in smart city development are outlined.

Сучасна глобальна урбанізація поставила перед людством критичний виклик: традиційні моделі транспортного планування більше не здатні впоратися з темпами зростання мегаполісів. Затори, дефіцит паркувальних місць та критичний рівень викидів CO_2 змушують шукати радикально нові підходи. Найбільш перспективною інновацією стала концепція *Mobility-as-a-Service* (MaaS) – «Мобільність як послуга» [1].

MaaS – це зміна парадигми від володіння власним транспортним засобом до споживання інтегрованого транспортного продукту. Основною ідеєю є об'єднання громадського транспорту, каршерінгу, мікромобільності (самокати, велосипеди) та таксі в єдиний цифровий інтерфейс [2]. Проте реалізація такої складної екосистеми неможлива без «цифрового мозку» – Штучного інтелекту (ШІ) та Інтернету речей (IP) [3].

Функціонування такої архітектури потребує не лише надійної фізичної бази передачі сигналів, а й потужних аналітичних інструментів для обробки колосальних масивів даних у режимі реального часу. Саме поєднання радіофізичних методів зв'язку та методів машинного навчання дозволяє створити динамічне середовище управління мобільністю.

1. Технологічний фундамент: ШІ як операційна система міста.

Штучний інтелект у системах MaaS виконує роль глобального диспетчера. На відміну від статичних розкладів минулого, сучасні інтелектуальні транспортні системи (ІТС) працюють у режимі реального часу, використовуючи:

- Прогностичну аналітику. Алгоритми машинного навчання обробляють масиви Big Data (історія поїздок, GPS-дані смартфонів, погодні умови, міські події) для прогнозування попиту [3]. Це дозволяє подавати безпілотні шаттли до станцій метро ще до того, як пасажирі звідти вийдуть.

- Динамічну маршрутизацію. Замість фіксованих ліній з'являється «транспорт за запитом» (On-Demand Transport). ШІ миттєво коригує шлях руху автобуса, щоб підібрати пасажирів в оптимальній точці, мінімізуючи пробіг без навантаження [1].

- Цифрові двійники (Digital Twins). Створення віртуальної копії транспортної мережі міста дозволяє моделювати сценарії (наприклад, перекриття вулиці) та знаходити рішення за частки секунди, запобігаючи транспортному колапсу [5].

Із точки зору фізики управління потоками, ШІ мінімізує хаотичність руху, перетворюючи його на впорядковану ламінарну систему. Динамічна маршрутизація миттєво коригує шлях руху, щоб підібрати пасажирів в оптимальній точці, що суттєво зменшує сумарний енергообмін всієї транспортної системи міста.

2. Радіофізика передачі сигналів та сенсорні системи: Технологія V2X.

Еволюція сучасного транспорту базується на впровадженні технології V2X (Vehicle-to-Everything). Це складний комплекс радіофізичних протоколів, що забезпечують безперервний обмін даними між транспортним засобом та оточуючим середовищем. Основними компонентами цієї архітектури є:

- V2V (Vehicle-to-Vehicle). Пряма взаємодія між автомобілями, що базується на обміні динамічними параметрами (вектор швидкості, кут повороту коліс, інтенсивність гальмування). Із точки зору фізики, це створює мережу «колективного інтелекту», де кожна одиниця транспорту стає активним датчиком. Це дозволяє системі ШІ виявляти небезпеку за межами прямої видимості (наприклад, екстрене гальмування авто за заворотом), що радикально знижує ймовірність каскадних ДТП.

- V2I (Vehicle-to-Infrastructure). Взаємодія автомобіля з елементами дорожньої інфраструктури (розумні світлофори, дорожні знаки, метеостанції). Фізична реалізація V2I дозволяє транспортному засобу отримувати дані про стан дорожнього полотна та фази світлофорних об'єктів у реальному часі. Це створює умови для реалізації «зеленої хвилі», де ШІ розраховує оптимальний швидкісний режим для проїзду перехресть без зупинок, що мінімізує енергетичні втрати на подолання інерції спокою.

- V2P (Vehicle-to-Pedestrian). Система виявлення найменш захищених учасників руху – пішоходів та велосипедистів. Використовуючи фізичні принципи поширення радіохвиль зокрема (DSRC (Dedicated Short-Range Communications) – протоколів виділеного зв'язку малої дальності або C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) – стільникового зв'язку між транспортними засобами та об'єктами), автомобіль отримує сигнали від смартфонів або «розумних» годинників людей, що знаходяться в «сліпих зонах» або за межами дії оптичних сенсорів. Це дозволяє ШІ «бачити» пішохода крізь фізичні перешкоди (будинки, припарковані авто) завдяки дифракції та відбиттю сигналів, що дає дорожочинний час для автоматичного гальмування та запобігання наїзду.

Фізична реалізація V2X вимагає використання міліметрового діапазону хвиль (стандарт 5G), що забезпечує наднизьку затримку сигналу (менше 1 мс). У контексті безпеки цей показник є критичним: при швидкості 100 км/год затримка сигналу всього у 100 мс призводить до того, що транспортний засіб долає додаткові 2,7 метра шляху до моменту активації гальмівної системи, що може бути вирішальним уникненням зіткнення. Використання фазованих антенних решіток та технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) дозволяє стабільно передавати дані в умовах щільної міської забудови, де спостерігається сильна інтерференція та дифракція радіохвиль. Крім того, ШІ обробляє дані з лідарів (LIDAR), що працюють за принципом активної оптичної локації. Фізика поширення лазерного променя та його відбиття від об'єктів дозволяє будувати 3D-карти середовища з міліметровою точністю, що є основою для безпечної навігації автономного транспорту в складних метеорологічних умовах.

3. Екологічний та соціальний аспект: Фізика міського середовища. Інноваційні транспортні системи є ключем до декарбонізації мегаполісів. Алгоритми MaaS пріоритезують у видачі маршрутів найбільш екологічні варіанти: електробуси, піші прогулянки або велотранспорт. Із точки зору фізики міського середовища, зменшення кількості приватного транспорту призводить до зниження ефекту «острова тепла». Кожен автомобіль із ДВЗ є тепловою машиною з низьким ККД, де більша частина енергії згоряння палива дисипує у вигляді тепла через радіатори та вихлопні системи. Оптимізація трафіку засобами ШІ знижує сумарну теплову потужність, що викидається в приземний шар атмосфери, запобігаючи перегріву вулиць.

Важливим соціальним фактором є зниження рівня акустичного забруднення. Фізика звукових хвиль у щільній забудові створює ефект багаторазового відбиття, що підвищує шумове навантаження на мешканців. Використання MaaS для переходу на електромобільність та плавне регулювання швидкості («зелені хвилі») дозволяє знизити інтенсивність звукового тиску на 10-15 дБ. Крім того, ШІ забезпечує інклюзивність: цифрові асистенти адаптують маршрути для людей з інвалідністю, враховуючи наявність пандусів та ліфтів на станціях у

реальному часі.

4. Енергетична ефективність та фізика «Платунінгу». Важливим аспектом МaaS є оптимізація витрат енергоресурсів [5]. Технологія платунінгу (рух автомобілів щільною колоною під управлінням ШІ) базується на фундаментальних законах аеродинаміки. Коли автомобілі рухаються на мінімальній дистанції (0,5-1 м), опір повітря для всієї колони суттєво зменшується через створення зони низького тиску за лідером, що мінімізує аеродинамічний опір для наступних одиниць. Як фахівці з фізики та хімії горіння, ми розуміємо, що сталий режим руху без різких прискорень забезпечує повне згоряння палива в ДВЗ та оптимальний ККД двигунів. ШІ створює «зелені хвилі», що мінімізує кількість циклів пуску-зупинки. Це критично, оскільки саме під час запуску та прогріву спостерігається неповне згоряння палива, що веде до підвищеної емісії токсичних речовин, зокрема NOx (оксидів азоту). Мінімізація температури згоряння в пікових режимах (через плавне прискорення) дозволяє знизити термічне окиснення азоту, що є ключовим для екологічної безпеки життєдіяльності мегаполіса. Окрім того, інтеграція електромобілів вимагає розрахунку теплових втрат у літій-іонних акумуляторах при швидких циклах розрядки, що також регулюється алгоритмами ШІ.

5. Виклики безпеки та прогнози розвитку. Збір колосальних обсягів персональних даних створює ризики для приватності. Майбутнє МaaS залежить від впровадження кібербезпеки на базі блокчейну та квантового шифрування даних [6]. Із точки зору безпеки життєдіяльності, критичним є захист від «каскадних збоїв»: помилка в алгоритмі ШІ може спричинити резонансний затор у всій мережі. Тому системи МaaS повинні мати фізичне дублювання та автономні локальні контури управління.

Для України впровадження таких систем є стратегічним завданням у рамках післявоєнного відновлення. Проектування міст за стандартами Smart City дозволить інтегрувати МaaS-платформи «з нуля». Використання інтелектуальних систем пожежної безпеки в тунелях, які враховують специфіку горіння металів та електролітів в електрокарах, стане обов'язковим компонентом нових транспортних вузлів.

Інноваційні технології в транспорті – це поєднання високих ІТ-технологій та фундаментальних законів фізики. Концепція Mobility-as-a-Service, підсилена ШІ та сучасними методами радіозв'язку, перетворює транспорт на розумну систему. Подальші дослідження мають зосередитися на розробці фізичних моделей безпечної автономної навігації в умовах аномальних погодних явищ та електромагнітних завад.

Список використаних джерел

1. Hensher D. A., Mulley C., Nelson J. D. *Mobility as a Service (MaaS): Challenges and Opportunities for Sustainable and Smart Mobility*. Elsevier, 2024. 342 p.
2. Європейська Комісія. Стратегія сталої та розумної мобільності — виведення європейського транспорту на шлях майбутнього. EU Publications, 2023. 28 с.
3. Kashyap R. *Artificial Intelligence in Intelligent Transportation Systems: Algorithms, Applications and Technologies*. CRC Press, 2025. 280 p.
4. Saraswat A., Mittal M. *Internet of Vehicles and V2X Communication: Future of Autonomous Transportation*. IEEE Press, 2024. 415 p.
5. Світовий банк. Транспорт у «розумному місті»: цифрова інфраструктура для «зелених» міст 2025. Вашингтон: World Bank Group, 2025. 112 с.
6. Statista Research Department. *Global Mobility-as-a-Service Market Size & Forecast 2021-2030*. Statista, 2024. 52 p.

Горіна Олена Михайлівна – к.п.н., доцент, доцент кафедри фізики та хімії горіння, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, e-mail: olena.gorina.nulp@gmail.com.

Horina Olena – Ph.D. (Pedagogical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Chemistry of Combustion, Lviv State University of Life Safety, e-mail: olena.gorina.nulp@gmail.com.