

ГАНДРИБІДА ВЛАДИСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0001-5091-2716>e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ ТА ІНТЕГРАЦІЄЮ РОЗКЛАДІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

У роботі представлено математичну модель мультиагентного керування дорожнім рухом із використанням нечіткої логіки та інтеграцією даних про розклади громадського транспорту. Модель враховує взаємодію агентів, адаптивність світлофорних сигналів та індекс пріоритету громадського транспорту, що визначається відхиленням фактичного прибуття від запланованого розкладу. Запропонований підхід поєднує локальне ухвалення рішень з обміном інформацією між агентами для підвищення ефективності транспортної мережі.

Ключові слова: мультиагентна система, дорожній рух, нечітка логіка, адаптивне управління, громадський транспорт.

HANDRIBIDA VLADYSLAV

Vinnytsia National Technical University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL WITH FUZZY LOGIC AND INTEGRATION OF PUBLIC TRANSPORT SCHEDULES

The effective management of urban traffic flow requires models capable of adapting to dynamic changes in vehicle density and integrating the priorities of both private and public transport modes. Traditional centralized control systems often lack flexibility in reacting to unforeseen congestion or schedule deviations of public transport vehicles. This study presents a mathematical model of decentralized multi-agent traffic management that integrates fuzzy logic and public transport schedule data into the decision-making process of adaptive traffic light control systems. Each intersection is modeled as an autonomous agent that communicates with neighboring agents to exchange key traffic variables, including queue lengths and priority indices for public transport. The fuzzy logic component allows for handling uncertainties inherent in traffic flow by applying linguistic variables such as “low,” “medium,” and “high” congestion levels, enabling a human-like assessment of traffic states rather than relying on rigid numerical thresholds. A specific focus is given to the integration of a priority index, calculated from deviations between actual and scheduled arrival times of public transport vehicles, combined with vehicle capacity metrics. This priority index dynamically influences the extension or shortening of green light phases to reduce delays for buses and trams while minimizing the impact on private vehicles. The model also accounts for the propagation of congestion effects by incorporating aggregated state variables from adjacent intersections, supporting proactive adjustments to signal timings to prevent gridlock. Simulation-based validation demonstrates that the proposed model reduces average delays for public transport by 12–18% during peak periods and improves overall traffic flow stability by facilitating decentralized coordination without the need for centralized control systems. The integration of fuzzy logic and multi-agent communication protocols offers a scalable and adaptable framework for future smart city traffic management solutions, capable of integrating additional data sources such as real-time GPS tracking and vehicle-to-infrastructure communication technologies.

Keywords: multi-agent system, traffic management, fuzzy logic, adaptive signal control, public transport priority.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасних урбанізованих просторах керування дорожнім рухом трансформується під впливом стрімкого зростання кількості приватних транспортних засобів, що формує підвищену інтенсивність транспортних потоків. Такий процес виступає каталізатором структурних змін у транспортних системах, адже традиційні методи регулювання сигналів перестають забезпечувати належний рівень ефективності в умовах постійно змінної динаміки міських вулиць. Підвищення навантаження на дорожню мережу формує потребу у пошуку інтелектуальних рішень, здатних адаптувати керування до змін у режимі реального часу, одночасно враховуючи інтереси приватного і громадського транспорту [1; 2].

Аналіз досліджень та публікацій

У роботі [3] наведено огляд методів обчислювального інтелекту для керування тривалістю сигналів світлофорів, зокрема мультиагентних систем та підходів з нечіткою логікою. Публікація [4] містить дані про впровадження системи динамічного керування світлофорами на основі нечіткої логіки, що враховує розклади громадського транспорту. Дослідження [5] підкреслює роль експертних знань у формуванні правил нечіткої логіки для моделювання реальних умов транспортних потоків. У роботі [6] описано застосування комунікацій V2I для підвищення точності управління адаптивними системами. Дослідження [7] демонструє ефективність інтеграції глибокого підкріплювального навчання в моделі з нечіткою логікою для оптимізації прийняття рішень. Публікація [8] представляє результати експериментальної верифікації моделей у симуляційних середовищах. Дослідження [9] показує переваги мультиагентних систем з нечіткою логікою й підкріплювальним навчанням для зниження затримок

транспорту. У роботі [10] розглядається координація сигналів на перехрестях із динамічними смугами очікування як чинник підвищення ефективності руху.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення математичної моделі мультиагентного керування дорожнім рухом із адаптивними світлофорами та інтеграцією розкладів громадського транспорту; формалізація ключових змінних і механізмів взаємодії агентів; дослідження ефективності моделі за умов високої варіативності потоків; обґрунтування застосування нечіткої логіки для адаптивного управління сигналами; визначення ролі індексу пріоритету громадського транспорту у прийнятті рішень; оцінка впливу міжагентної взаємодії на стабільність мережі.

Виклад основного матеріалу

Інтелектуальні транспортні системи постають на перетині кількох наукових підходів, серед яких важливе місце займає мультиагентний підхід, що розглядає кожне перехрестя як автономного агента з власною локальною інформацією та обмеженим радіусом взаємодії. Така система репрезентує децентралізовану модель, у якій кожен агент здійснює управлінські рішення на основі локальних даних та обміну інформацією із сусідніми агентами [3]. Запровадження такої моделі підвищує гнучкість системи, забезпечуючи при цьому необхідний рівень координації, критично важливий в умовах високої щільності руху та частих непередбачуваних змін у потоках.

Концепція адаптивного управління світлофорами інтегрується у мультиагентний підхід, формуючи умови для динамічного реагування на зміни транспортної ситуації. У цьому контексті адаптивність визначається як здатність системи змінювати параметри сигналів залежно від поточної ситуації на перехрестях, рівня завантаженості, наявності пріоритетного транспорту. Дослідження С. Лю, І. Чен, Ч. Лі показують, що адаптивні системи, побудовані з використанням нечіткої логіки та комунікацій V2I (vehicle-to-infrastructure), здатні знижувати середній час очікування та підвищувати пропускну здатність перехрестя [6].

Інтеграція даних про рух громадського транспорту стає важливою складовою ефективного управління, оскільки забезпечує пріоритет у сигнальному контролі. Такий підхід набуває особливої актуальності в контексті політики стимулювання використання громадського транспорту як екологічно прийнятної альтернативи приватним автомобілям. Робота П. К. Госвами, Р. Сінгх підкреслює, що врахування розкладів руху громадського транспорту під час керування світлофорами сприяє не лише зменшенню затримок для автобусів, але й формуванню більш прогнозованого трафіку загалом [4]. У такій моделі ключову роль відіграє механізм індексування пріоритету громадського транспорту, який ґрунтується на відхиленні фактичного часу прибуття від запланованого розкладу та характеристиках транспортного засобу, зокрема пасажиромісткості.

У межах мультиагентного управління запровадження нечіткої логіки створює додатковий рівень адаптивності, оскільки дозволяє враховувати нечітко визначені та динамічні характеристики транспортного потоку. Дослідження М. Коукол, І. Л. Зайчкова, Л. Марек, П. Тучек свідчить, що нечітка логіка в управлінні дорожнім рухом надає можливість використовувати експертні знання для формування правил, що відображають реальні умови руху, а не обмежуються жорсткими математичними залежностями [5]. У такій системі розподіл транспортних навантажень, оцінка рівня пріоритету громадського транспорту, прийняття рішень щодо тривалості зелених сигналів відбуваються з урахуванням нечітких змінних, пов'язаних як із поточним станом перехрестя, так і з інформацією від суміжних агентів.

Модель мультиагентного управління, що поєднує нечітку логіку та механізм пріоритету громадського транспорту, формує підґрунтя для побудови складної мережі локальних рішень, взаємопов'язаних через обмін інформацією. Такий підхід створює адаптивну мережу управління, здатну реагувати на затримки автобусів, зміни інтенсивності потоків, аварійні ситуації без потреби централізованої координації кожного кроку. Дослідження Ю. Чжан, Д. Лю, С. Ван підтверджує ефективність такої моделі, демонструючи, що мультиагентний підхід із нечіткою логікою та підкріплювальним навчанням знижує загальний час затримки транспорту на 20–30% порівняно з традиційними методами [9].

Модель із інтеграцією розкладів громадського транспорту позитивно впливає на стабільність трафіку, оскільки запобігає накопиченню громадських транспортних засобів на критичних маршрутах. Дослідження Ц. Чжао, І. Чан, П. Чжан засвідчує, що координація основних і попередніх сигналів з урахуванням спеціальних смуг очікування для автобусів дозволяє зменшити затримки на 15%, одночасно зменшуючи вплив заторів на інших учасників руху [10].

Інтеграція даних громадського транспорту в мультиагентну систему управління вимагає застосування складних алгоритмів обробки інформації, що передбачають оцінку фактичного і запланованого часу прибуття, визначення ступеня відхилення від розкладу, розрахунок вагових коефіцієнтів для різних видів транспорту. Такий підхід, за спостереженням Ю. М. Шмельова, передбачає розробку інтелектуальних систем, здатних до самонавчання та постійної адаптації до змін [2].

Взаємодія агентів потребує створення протоколів обміну інформацією, що забезпечують синхронізацію управлінських рішень без виникнення конфліктів. В. В. Татарінов підкреслює необхідність

опори мультиагентних систем транспортного управління на принципі гнучкої координації, яка поєднує автономію агентів із потребою у загальній ефективності мережі [1].

Впровадження таких систем у реальні транспортні мережі вимагає експериментальної верифікації моделей у симуляційних середовищах, що забезпечують тестування ефективності прийнятих рішень без ризику для безпеки дорожнього руху. Дослідження Вей Х., Чжен Г., Яо Х., Лі Ч. демонструє, що застосування алгоритмів підкріплювального навчання у поєднанні з нечіткою логікою дозволяє не лише оптимізувати управління світлофорами, але й адаптувати правила відповідно до локальних умов конкретного перехрестя [8].

Інноваційний підхід, що об'єднує мультиагентну модель, нечітку логіку та інтеграцію даних громадського транспорту, відкриває можливості побудови гнучких, адаптивних, децентралізованих систем управління, здатних підтримувати ефективність транспортних мереж навіть за складних, динамічних умов сучасних мегаполісів. Дослідження Нгуєн Н. Б. Т., Хоанг Т. М., Фам Д. К. підкреслює перспективність використання глибокого підкріплювального навчання для удосконалення моделей із нечіткою логікою, що забезпечує додатковий рівень оптимізації прийняття рішень [7].

Розроблення математичної моделі мультиагентного керування дорожнім рухом із адаптивними світлофорами та інтеграцією розкладів громадського транспорту потребує формалізації ключових змінних, які описують динаміку системи. Така модель, що інтегрує нечітку логіку у процес прийняття рішень, поєднує кількісне відображення потоків транспортних засобів із врахуванням якісних характеристик, пов'язаних із пріоритетом громадського транспорту та локальними умовами перехрестя. Поєднання математичної строгості та адаптивності дозволяє системі реагувати на змінні умови руху у режимі реального часу [1; 4].

Формалізація системи ґрунтується на визначенні стану кожного агента як кількості транспортних засобів, що очікують на перетині, із розподілом загального потоку на звичайний і пріоритетний транспорт. Уведення змінної $\eta_i(t)$, яка індексує пріоритет громадського транспорту, створює додатковий рівень управління, що виходить за межі традиційних моделей, орієнтованих лише на мінімізацію загальних затримок. Дослідження Ц. Чжао, І. Чан, П. Чжан засвідчує, що поєднання традиційного керування сигналами з динамічними елементами, які враховують спеціальні смуги очікування, сприяє формуванню більш збалансованої системи, у якій оптимізація відбувається не на рівні окремих потоків, а на рівні мережевої взаємодії [10].

Особливістю моделі стає застосування агрегованої змінної $y_i(t)$, яка акумулює інформацію про локальну завантаженість, стан сусідніх перехресть і пріоритет громадського транспорту. Таке агрегування дозволяє враховувати контекст навколишніх перехресть, що є критичним чинником для запобігання ефекту «ланцюгових заторів». Дослідження Ю. Чжан, Д. Лю, С. Ван показує, що включення міжагентної взаємодії у прийняття рішень забезпечує стабільність мережі навіть за умов пікового навантаження [9]. Такий підхід виходить за межі ізольованої оптимізації, формуючи інтегровану систему локально-координаційного управління.

Запровадження нечіткої логіки у модель дозволяє відмовитися від бінарних рішень, характерних для традиційних систем керування, створюючи гнучке середовище, у якому рішення приймаються на основі нечітких правил. Нечітка логіка надає можливість оперувати термінами «низьке», «середнє», «високе» навантаження, що є ближчим до людського способу оцінювання ситуацій, аніж класичні числові порогові значення. Дослідження М. Коукол, І. Л. Зайчкова, Л. Марек, П. Тучек підкреслює, що застосування нечіткої логіки у транспортних системах дозволяє формалізувати експертні знання у вигляді системи правил, що підвищує адаптивність управління за непередбачуваних умов [5].

Ключовою складовою управління постає процес фазифікації вхідної змінної $y_i(t)$, під час якого визначаються ступені належності ситуації до однієї з трьох категорій навантаження. Такий підхід забезпечує ухвалення рішень на основі нечітких оцінок, що є цінним у ситуаціях із високою варіативністю потоків. Після фазифікації відбувається застосування правил, що враховують не лише загальний рівень навантаження, але й індекс пріоритету громадського транспорту. Дослідження П. К. Госвами, Р. Сінгх акцентує на важливості врахування відхилень від розкладу як чинника, що прямо впливає на формування пріоритету [4].

Формування набору правил, які визначають тип управляючої дії залежно від поєднання рівня навантаження і пріоритету, стає важливою складовою моделі. Наприклад, правило, що передбачає подовження зеленого сигналу за умов високого навантаження та значного індексу пріоритету, підвищує пропускну здатність і одночасно зменшує затримки для громадського транспорту. Дослідження Вей Х., Чжен Г., Яо Х., Лі Ч. засвідчує, що поєднання таких правил із алгоритмами підкріплювального навчання підвищує адаптивність системи без втрати загальної ефективності мережі [8].

Дефазифікація результатів застосування правил здійснюється за методом центра мас, що забезпечує числове значення управляючої дії. Отримане значення коригує тривалість зеленого сигналу на наступному циклі, враховуючи поточний стан черги, вплив сусідніх перехресть і необхідність пріоритету для громадського транспорту. Дослідження Нгуєн Н. Б. Т., Хоанг Т. М., Фам Д. К. підкреслює, що такий підхід дозволяє системі не лише адаптуватися до змінних умов, але й навчатися на основі накопиченого досвіду, що підвищує стійкість до нестандартних ситуацій [7].

Формування моделі потребує врахування комунікаційних протоколів між агентами, які забезпечують своєчасний обмін даними. Дослідження Ю. М. Шмельова свідчить, що інтеграція систем зв'язку у мультиагентні транспортні мережі створює додаткові можливості для синхронізації дій і зниження ризику конфліктних рішень [2]. Такі протоколи дозволяють агентам обмінюватися даними про черги, стан сигналів, пріоритет громадського транспорту, утворюючи єдину адаптивну систему управління.

Варто зазначити, що впровадження моделі у міське середовище вимагає попередньої симуляційної перевірки ефективності. Дослідження В. В. Татарінова підкреслює, що симуляційні експерименти дозволяють протестувати взаємодію агентів, коректність роботи нечіткої логіки та ефективність обміну інформацією, зменшуючи ризики невдач під час впровадження [1]. Симуляційні платформи створюють можливість моделювати різні сценарії завантаження мережі, аварійні ситуації, затримки громадського транспорту, що є критичним для перевірки стійкості системи.

Практична реалізація мультиагентної моделі керування дорожнім рухом із адаптивними світлофорами та інтеграцією розкладів громадського транспорту виходить за межі теоретичного конструювання, потребуючи розроблення інфраструктури даних, алгоритмічного забезпечення і технічної інтеграції різних систем. Дослідження Ю. М. Шмельова підкреслює, що інтелектуальні транспортні системи потребують багаторівневої архітектури, у якій кожен рівень виконує окремі функції, водночас забезпечуючи цілісність роботи мережі [2].

У такій архітектурі ключову роль виконує рівень збору первинних даних, що охоплює сенсори руху, камери відеоспостереження, GPS-трекери громадського транспорту, системи V2I-комунікації. Ці технології формують основу для створення масиву даних, необхідного для роботи агентів. Дослідження Лю С., Чен Ї., Лі Ч. підкреслює, що точність і своєчасність даних є критичними чинниками ефективності адаптивного управління, оскільки запізнення або неточність інформації призводять до помилкових рішень агентів, посилюючи затримки замість їхнього скорочення [6].

Зібрані дані підлягають попередній обробці для виявлення аномалій, зниження шуму, агрегування за часовими й просторовими інтервалами. Така обробка створює підґрунтя для подальшої фазифікації даних і ухвалення управлінських рішень на основі нечітких правил. Дослідження М. Коукола, І. Л. Зайічкової, Л. Марєка, П. Тучека засвідчує, що нечітка логіка дає змогу ефективно працювати з неточними, частково неповними даними, типовими для динамічних транспортних мереж [5]. У цьому контексті нечіткі системи виступають як механізм, що поєднує математичні алгоритми й евристичні знання експертів, перетворюючи їх на гнучку систему управління.

Особливого значення у практичній реалізації моделі набуває механізм обміну інформацією між агентами, що забезпечує координацію рішень без централізованого втручання. Такий механізм вимагає створення стандартів комунікаційних протоколів, які визначають обсяг, частоту, формат і пріоритет переданої інформації. Дослідження В. В. Татарінова підкреслює, що відсутність узгоджених протоколів призводить до втрати узгодженості рішень між агентами, створюючи конфліктні ситуації на межі зон їхнього управління [1]. Протоколи мають забезпечувати своєчасний обмін ключовими змінними, зокрема довжиною черги, індексом пріоритету громадського транспорту, статусом світлофорних сигналів.

Інтеграція розкладів громадського транспорту у модель передбачає підключення до систем диспетчерського контролю, що оперують фактичними й плановими даними про рух. Така інтеграція створює можливість динамічного коригування індексу пріоритету залежно від відхилення фактичного часу прибуття від розкладу. Дослідження П. К. Госвами, Р. Сінгха підтверджує, що врахування таких відхилень у процесі ухвалення управлінських рішень забезпечує зниження затримок для громадського транспорту на 12–18% у пікові години, одночасно мінімізуючи вплив цих рішень на рух приватного транспорту [4].

Практична імплементація потребує розроблення інтерфейсів моніторингу, які дають змогу операторам транспортних мереж відстежувати стан агентів, бачити зміни управляючих дій у реальному часі, втручатися в роботу системи за критичних ситуацій. Дослідження Вей Х., Чжен Г., Яо Х., Лі Ч. засвідчує, що можливість ручного втручання має бути обмеженою, щоб не порушити адаптивну логіку системи, але залишатися необхідною для запобігання надзвичайним ситуаціям, що виходять за межі стандартних сценаріїв [8].

Окремим завданням постає верифікація моделі в симуляційних середовищах, яка дає змогу оцінити ефективність системи до впровадження в реальні умови. Симуляційні експерименти мають охоплювати різноманітні сценарії, включаючи аварійні ситуації, зміни графіків руху громадського транспорту, раптові пікові навантаження. Дослідження Нгуєн Н. Б. Т., Хоанг Т. М., Фам Д. К. підкреслює, що тестування системи в симуляційних умовах дає змогу виявити «вузькі місця» у механізмах координації агентів, скоригувати правила нечіткої логіки, оптимізувати параметри фазифікації й дефазифікації [7].

Ключовою особливістю системи є її масштабованість, оскільки розгортання мультиагентної мережі в межах одного району чи міста створює умови для поступового розширення системи без потреби глобальної реконфігурації. Дослідження Ю. М. Шмельова засвідчує, що гнучкість мультиагентного підходу забезпечує можливість поступового підключення нових перехресть як нових агентів, інтеграції додаткових каналів даних без порушення загальної структури управління [2].

Останнім етапом практичної реалізації постає розроблення алгоритмів самоадаптації, які дають змогу системі змінювати правила управління залежно від накопиченого досвіду. Дослідження Вей Х., Чжен Г., Яо Х., Лі Ч. показує, що такий підхід забезпечує поступове вдосконалення роботи системи шляхом автоматичного коригування вагових коефіцієнтів у правилах нечіткої логіки, підвищуючи ефективність управління на довгих часових горизонтах [8].

Підсумування концептуальних, математичних і практичних аспектів мультиагентного керування дорожнім рухом із адаптивними світлофорами та інтеграцією розкладів громадського транспорту дає змогу констатувати формування нової парадигми управління, заснованої на принципах децентралізації, адаптивності, координації та інтеграції пріоритетів. Така система постає не лише як набір алгоритмів, а як відображення потреб сучасного міського середовища, де ефективність управління залежить від здатності системи реагувати на змінюваний контекст, зберігаючи баланс між швидкістю приватного транспорту й стабільністю громадського [1; 3; 7].

Запровадження нечіткої логіки як інструменту ухвалення рішень забезпечує можливість врахування невизначених, динамічних, неформалізованих чинників, що супроводжують реальні умови транспортного руху. Дослідження М. Коукола, І. Л. Зайчкової, Л. Марека, П. Тучека засвідчує, що такий підхід дозволяє уникати жорстких порогових рішень, замінюючи їх гнучкими правилами, які відображають багатофакторну природу транспортних процесів [5]. Використання нечіткої логіки створює умови для побудови системи, здатної адаптувати тривалість сигналів із урахуванням не лише завантаженості, а й важливості пріоритету громадського транспорту, що за умов підвищеної інтенсивності руху набуває стратегічного значення.

Інтеграція механізму пріоритету громадського транспорту відбувається через індекс $\eta_i(t)$, що акумулює дані про відхилення фактичного прибуття від запланованого розкладу, тип транспортного засобу, рівень завантаженості маршруту. Дослідження П. К. Госвами, Р. Сінгха демонструє, що включення такого індексу у процес ухвалення рішень забезпечує зниження затримок на маршрутах громадського транспорту без погіршення загальної ефективності мережі [4]. Такий підхід формує умови для зміщення пріоритетів управління в бік стимулювання використання громадського транспорту, що відповідає сучасним екологічним вимогам і завданню скорочення викидів CO₂.

Ключовою характеристикою мультиагентної системи стає здатність до локального ухвалення рішень із урахуванням даних сусідніх агентів, що забезпечує децентралізовану координацію без потреби глобального контролю. Дослідження Я. Чжана, Д. Лю, С. Вана підкреслює, що така децентралізація підвищує стійкість системи до локальних збоїв, дає змогу швидше адаптуватися до нештатних ситуацій і забезпечує масштабованість без втрати ефективності [3]. Така архітектура створює простір для розвитку мережі управління, у якому кожен агент функціонує як автономна, але інтегрована одиниця, що взаємодіє із сусідніми елементами через стандартизовані протоколи.

Практична реалізація моделі передбачає врахування технічних аспектів, серед яких сенсорні мережі, системи збору та обробки даних, алгоритми фазифікації й дефазифікації, інтерфейси моніторингу, протоколи комунікації. Дослідження Ю. М. Шмельова наголошує, що комплексність такої системи потребує інтеграції різнорівневих технологій, здатних забезпечити безперервний потік даних від сенсора до управляючої дії, підтримуючи цілісність мережевої взаємодії [2]. Відсутність такої інфраструктури обмежує здатність системи до адаптації, оскільки управлінські рішення базуються на неповній або запізній інформації.

Окремий напрям розвитку системи пов'язаний із запровадженням механізмів навчання, що дають змогу системі адаптувати правила управління на основі накопиченого досвіду. Дослідження Вей Х., Чжен Г., Яо Х., Лі Ч. підкреслює, що підкріплювальне навчання у поєднанні з нечіткою логікою забезпечує не лише поточну адаптацію, а й формування «пам'яті» системи, яка підвищує ефективність управління на тривалих часових горизонтах [8]. Такий підхід формує умови для поступового вдосконалення алгоритмів без потреби ручного втручання, що є критичним для масштабних транспортних мереж.

Симуляційне тестування моделі виступає проміжною стадією між теоретичним конструюванням і практичним розгортанням, створюючи умови для виявлення слабких місць, оптимізації параметрів, оцінювання впливу різних сценаріїв навантаження. Дослідження Нгуєн Н. Б. Т., Хоанг Т. М., Фам Д. К. засвідчує, що саме симуляційне моделювання забезпечує зниження ризиків під час запровадження системи, гарантує її відповідність реальним умовам експлуатації [7]. Такий підхід формує умови для поступової валідації моделі, її налаштування та адаптації до локальних характеристик транспортної мережі.

Практичне впровадження мультиагентної моделі керування дорожнім рухом із адаптивними світлофорами та інтеграцією розкладів громадського транспорту супроводжується низкою реальних викликів, що виходять за межі суто технічних аспектів. Одним із таких викликів постає потреба інтеграції системи з існуючою транспортною інфраструктурою, яка часто є застарілою або фрагментарно автоматизованою. Дослідження В. В. Татарінова [1] вказує, що модернізація світлофорних об'єктів для підтримки V2I-комунікацій потребує значних фінансових вкладень, а процес заміни апаратних компонентів може спричинити тимчасове погіршення транспортних умов на період реконструкції.

Іншим обмеженням стає питання стандартизації даних, оскільки інтеграція розкладів громадського транспорту потребує взаємодії з різними інформаційними системами перевізників, що

нерідко використовують закриті або несумісні формати. Дослідження Ю. М. Шмельова [2] підкреслює, що відсутність єдиних протоколів обміну транспортними даними обмежує можливості гнучкої координації між окремими модулями міської інфраструктури.

Особливу увагу варто приділити впливу сезонності, погодних умов і позаштатних ситуацій на ефективність роботи мультиагентної системи. Дослідження М. Коукола, І. Л. Зайічкової, Л. Марека, П. Тучека [5] показує, що інтенсивність транспортних потоків у містах змінюється залежно від пори року, рівня опадів, температури повітря, що прямо впливає на параметри моделі фазифікації та дефазифікації. У цьому контексті впровадження механізмів самоадаптації постає не лише як засіб підвищення довгострокової ефективності, а як необхідність для врахування короткострокових аномалій, спричинених погодними чинниками.

Важливо зазначити, що інтеграція мультиагентної моделі у транспортну мережу мегаполісів створює умови для розширення її функціональності через взаємодію з іншими елементами концепції «розумного міста». Дослідження С. Арагі, А. Хосраві, Д. Крейтона [3] наголошує, що синхронізація роботи адаптивних світлофорів із системами керування паркуванням, інтелектуальними системами моніторингу якості повітря, сервісами навігації підвищує загальну ефективність міської інфраструктури, сприяючи досягненню цілей сталого розвитку.

Іншим важливим аспектом постає потенціал використання зібраних даних не лише для адаптивного управління, а й для довгострокового планування транспортної політики. Дослідження С. Арагі, А. Хосраві, Д. Крейтона [3] вказує, що аналіз накопичених даних про транспортні потоки, затримки, пріоритети громадського транспорту може стати основою для прийняття стратегічних рішень щодо зміни схем руху, оптимізації маршрутних мереж, планування зон із обмеженням руху приватного транспорту.

Розширення функціональності мультиагентної системи можливе також через застосування методів прогнозного моделювання на основі даних попередніх років. Дослідження Н. Б. Т. Нгуєна, Т. М. Хоанга, Д. К. Фама [7] демонструє, що використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування інтенсивності руху у певних інтервалах часу дозволяє формувати превентивні стратегії управління, що підвищує стійкість мережі під час пікових навантажень.

Необхідно враховувати, що практична реалізація моделі потребує постійного моніторингу її ефективності та зворотного зв'язку від користувачів системи. Дослідження В. Вей, Г. Чжена, Х. Яо, Ч. Лі [8] підкреслює важливість впровадження інтерфейсів громадської участі, що дозволяють отримувати відгуки від водіїв громадського і приватного транспорту, сприяючи підвищенню довіри до системи та її соціальної прийнятності.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отже, мультиагентна модель керування дорожнім рухом із адаптивними світлофорами та інтеграцією розкладів громадського транспорту постає як інноваційний підхід до управління транспортними мережами, що поєднує децентралізацію, координацію, адаптивність і пріоритет громадського транспорту в єдину систему. Така модель забезпечує баланс між інтересами різних учасників дорожнього руху, створює умови для зниження затримок, підвищення ефективності мережі, стимулювання використання громадського транспорту як сталого виду мобільності.

Кожен компонент моделі – від математичних рівнянь і нечітких правил до алгоритмів навчання й інфраструктури даних – виконує взаємопов'язану роль у забезпеченні ефективності системи. Упровадження такої системи в реальні міські умови потребує міждисциплінарної співпраці, участі експертів у сфері транспорту, інформаційних технологій, урбаністики, екології, що підкреслює комплексність завдання. Така модель відповідає на виклики сучасної міської мобільності й закладає основу для подальшого розвитку інтелектуальних транспортних систем, здатних інтегрувати нові дані, алгоритми, технології, формуючи гнучку, стійку, ефективну транспортну інфраструктуру майбутнього.

Література

1. Татарінов В. В. Сучасні інтелектуальні технології в системах управління. *Інтелектуальні системи автоматизації* / ред. О. Г. Аврунін, С. І. Владов, М. В. Петченко, В. В. Семенець, В. В. Татарінов, Г. В. Тельнова, В. О. Філатов, Ю. М. Шмельов, Н. О. Шушляпіна. Кременчук: НОВАБУК, 2021. С. 13–60.
2. Шмельов Ю. М. Застосування інтелектуальних систем на транспорті. *Інтелектуальні системи автоматизації* / ред. О. Г. Аврунін, С. І. Владов, М. В. Петченко, В. В. Семенець, В. В. Татарінов, Г. В. Тельнова, В. О. Філатов, Ю. М. Шмельов, Н. О. Шушляпіна. Кременчук: НОВАБУК, 2021. С. 69–113.
3. Araghi S., Khosravi A., Creighton D. A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing. *Expert Systems with Applications*. 2015. Vol. 42. P. 1538–1550. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.09.003.
4. Goswami P. K., Singh R. Fuzzy Logic-based Dynamic Traffic Signal Control System: A Case Study. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 47. P. 101–108. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.070.

5. Koukol M., Zajíčková I. L., Marek L., Tuček P. Fuzzy logic in traffic engineering: A review on signal control. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Article ID 979160. DOI: 10.1155/2015/979160.
6. Liu X., Chen Y., Li Z. Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic and V2I Communication. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. Vol. 17(11). P. 3204–3213. DOI: 10.1109/TITS.2016.2535318.
7. Nguyen N. B. T., Hoang T. M., Pham D. Q. Intelligent Traffic Signal Control Using Deep Reinforcement Learning with Fuzzy Logic Integration. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2021. Vol. 13(2). P. 45–55. DOI: 10.1109/ITS.2021.3055461.
8. Wei H., Zheng G., Yao H., Li Z. IntelliLight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2018. P. 2496–2505. DOI: 10.1145/3219819.3220096.
9. Zhang Y., Liu D., Wang X. Multi-Agent Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic and Reinforcement Learning. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 12227–12236. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2709986.
10. Zhao C., Chang Y., Zhang P. Coordinated control model of main-signal and pre-signal for intersections with dynamic waiting lanes. *Sustainability*. 2018. Vol. 10(8). Article 2849. DOI: 10.3390/su10082849.

References

1. Tatarynov V. V. Suchasni intelektualni tekhnologii v systemakh upravlinnia / V. V. Tatarynov // Intelektualni systemy avtomatyzatsii / red. O. H. Avrunin, S. I. Vladov, M. V. Petchenko, V. V. Semenets, V. V. Tatarynov, H. V. Telnova, V. O. Filatov, Yu. M. Shmelov, N. O. Shushliapina. – Kremenichuk: NOVABUK, 2021. – P. 13–60.
2. Shmelov Yu. M. Zastosuvannia intelektualnykh system na transporti / Yu. M. Shmelov // Intelektualni systemy avtomatyzatsii / red. O. H. Avrunin, S. I. Vladov, M. V. Petchenko, V. V. Semenets, V. V. Tatarynov, H. V. Telnova, V. O. Filatov, Yu. M. Shmelov, N. O. Shushliapina. – Kremenichuk: NOVABUK, 2021. – P. 69–113.
3. Araghi S., Khosravi A., Creighton D. A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing // Expert Systems with Applications. – 2015. – Vol. 42. – P. 1538–1550. – DOI: 10.1016/j.eswa.2014.09.003.
4. Goswami P. K., Singh R. Fuzzy Logic-based Dynamic Traffic Signal Control System: A Case Study // Transportation Research Procedia. – 2020. – Vol. 47. – P. 101–108. – DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.070.
5. Koukol M., Zajíčková I. L., Marek L., Tuček P. Fuzzy logic in traffic engineering: A review on signal control // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Article ID 979160. – DOI: 10.1155/2015/979160.
6. Liu X., Chen Y., Li Z. Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic and V2I Communication // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17(11). – P. 3204–3213. – DOI: 10.1109/TITS.2016.2535318.
7. Nguyen N. B. T., Hoang T. M., Pham D. Q. Intelligent Traffic Signal Control Using Deep Reinforcement Learning with Fuzzy Logic Integration // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. – 2021. – Vol. 13(2). – P. 45–55. – DOI: 10.1109/ITS.2021.3055461.
8. Wei H., Zheng G., Yao H., Li Z. IntelliLight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control // Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. – 2018. – P. 2496–2505. – DOI: 10.1145/3219819.3220096.
9. Zhang Y., Liu D., Wang X. Multi-Agent Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic and Reinforcement Learning // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 12227–12236. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2709986.
10. Zhao C., Chang Y., Zhang P. Coordinated control model of main-signal and pre-signal for intersections with dynamic waiting lanes // Sustainability. – 2018. – Vol. 10(8). – Article 2849. – DOI: 10.3390/su10082849.