

УДК 004.94:656.05

DOI: 10.31673/2412-9070.2025.048452

С. С. КОРОТКОВ, PhD, доцент;

ORCID: 0000-0002-4090-5934

Н. О. ЛАЩЕВСЬКА, канд. техн. наук, доцент;

ORCID: 0000-0003-2148-115X

Т. П. ДОВЖЕНКО, канд. техн. наук, доцент,

ORCID: 0000-0002-0352-8391

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ САМООРГАНІЗУЮЧОЮ МЕРЕЖЕЮ НА ОСНОВІ АГЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У статті представлено комплексне дослідження методів управління транспортними потоками в міських умовах за допомогою агентних моделей та нечіткої логіки. З кожним роком інтенсивність міського трафіку зростає, що призводить до проблем, таких як затори, підвищене забруднення повітря, зниження швидкості руху та збільшення стресу серед учасників дорожнього руху. Традиційні методи управління транспортом часто не можуть врахувати складність і динамічність сучасних транспортних систем, у яких взаємодіють різноманітні агенти, такі як автомобілі, пішоходи та громадський транспорт. Агентне моделювання дозволяє створити більш гнучкі та адаптивні моделі, в яких кожен учасник дорожнього руху (агент) може приймати автономні рішення на основі локальних умов.

У статті акцентується увага на важливості застосування нечіткої логіки для обробки неповної або нечіткої інформації, яка часто виникає у реальних міських умовах. Нечітка логіка дозволяє моделювати складну поведінку учасників трафіку та покращує процес прийняття рішень у випадках, коли параметри руху змінюються непередбачувано. Для управління світлофорами, наприклад, застосовуються нечіткі правила, що адаптують тривалість сигналів відповідно до поточної інтенсивності руху.

Симуляції, проведені за допомогою запропонованої моделі, продемонстрували, що інтеграція агентного підходу з нечіткою логікою може значно знизити затори, скоротити час затримок та підвищити пропускну здатність транспортної системи у різних сценаріях трафіку. Модель була перевірена на кількох рівнях завантаженості транспортної мережі, від низького до високого, і в усіх випадках показала високу ефективність. Запропонований підхід не лише допомагає в аналізі поточних умов, але й відкриває можливості для прогнозування і планування транспортної інфраструктури майбутнього.

Застосування цієї моделі може сприяти більш ефективному використанню дорожньої інфраструктури, покращенню умов пересування в містах та зниженню негативного впливу на довкілля завдяки зменшенню заторів і забруднення повітря.

Ключові слова: агентна модель; нечітка логіка; інформаційні мережі; інформаційні системи; комп'ютерне моделювання; оптимізація; система управління.

Вступ

Постановка проблеми. У сучасних містах транспортні системи стають дедалі складнішими через збільшення кількості транспортних засобів, пішоходів та інших учасників дорожнього руху. Це призводить до таких проблем, як затори, неефективне використання дорожньої інфраструктури, забруднення повітря і підвищений рівень стресу серед учасників руху. Однією з основних задач у дослідженні таких систем є оптимізація транспортних потоків та зниження негативних наслідків через ефективне управління ресурсами.

З огляду на складність транспортної системи, яка включає в себе різні агенти (автомобілі, пішоходи, громадський транспорт) з унікальними цілями, поведінкою та взаємодією, класичні підходи до моделювання виявляються неефективними. Агентне моделювання дозволяє ство-

рити більш гнучкі та реалістичні симуляції, де кожен агент може адаптувати свою поведінку на основі поточних умов, що забезпечує глибше розуміння системи.

Однак, через велику кількість факторів, які впливають на поведінку учасників транспортного руху, виникає проблема точної і коректної оцінки поточної ситуації на дорозі та прийняття рішень. Для вирішення цієї проблеми використовуються методи нечіткої логіки, що дозволяють обробляти нечітку або неповну інформацію та допомагають більш точно моделювати поведінку агентів в умовах невизначеності.

Основні завдання, які постають при моделюванні:

1. Побудова моделі системи управління транспортною мережею, що відображає реалістичні взаємодії агентів.
2. Застосувати сучасні методи оцінки інтенсивності транспортних потоків і прийняття рішень в умовах невизначеності.
3. Інтегрувати нечітку логіку в систему управління транспортною мережею для покращення процесу прийняття рішень у ситуаціях з неповною інформацією.
4. Оптимізувати рух транспорту з урахуванням взаємодії різних типів агентів (машини, пішоходи, автобуси).

Рішення цих завдань дозволить створити ефективну модель системи управління транспортною мережею, яка зможе не тільки симулювати поточні умови, але й бути інструментом для прогнозування і аналізу різних сценаріїв для підвищення ефективності міського руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки агентне моделювання набуло широкого розповсюдження у різних галузях, включаючи транспортні мережі. Дослідники використовують агентно-орієнтовані підходи для вирішення складних проблем, пов'язаних із динамікою транспортних потоків, поведінкою водіїв, пішоходів і громадського транспорту.

У статті Meng X., Hou Q., Quan L. [1], представлено новий підхід до моделювання складних, нелінійних і нестационарних процесів на основі самоорганізуючої нечіткої нейронної мережі з адаптивною еволюційною стратегією (AE-SOFNN). Така модель поєднує гнучкість нечіткої логіки з адаптивністю штучних нейронних мереж, що дозволяє ефективно працювати в умовах невизначеності та змін середовища — характерних для промислових процесів.

У дослідженні Morri N., Hadouaj S. & Said L. [2] запропоновано інтелектуальну систему керування громадським транспортом, здатну ефективно реагувати на транспортні збурення. Враховуючи великий обсяг і високу динамічність даних у транспортних мережах, а також відсутність достатньо розвинених інтелектуальних систем у цій сфері, автори обґрунтовують необхідність створення гнучкого та адаптивного контролера.

У роботі Tamrat D., Lazlo T. Koczy. [3] представлено нову децентралізовану систему керування дорожнім рухом для кількох перехресть, яка базується на агентному моделюванні з використанням нечіткої логіки. Мотивацією дослідження стала проблема того, що затори на одному перехресті можуть швидко поширюватися на суміжні, викликаючи блокування міських районів. Існуючі рішення не завжди справляються з динамікою міського трафіку.

У статті Bartłomiej P. [4] представлено новий підхід до моделювання сигналізованих транспортних потоків, який поєднує клітинні автомати (СА) та нечіткі числа. Метою є подолання обмежень класичних стохастичних СА-моделей, таких як потреба у численних моделюваннях Монте-Карло та складність калібрування. Запропонований алгоритм забезпечує суттєве зниження обчислювальних витрат і дозволяє швидше отримувати результати моделювання, що робить його придатним для використання в системах управління дорожнім рухом у реальному часі.

В останніх дослідженнях також активно розвивається напрямок інтеграції агентних моделей з методами нечіткої логіки. Це поєднання дозволяє враховувати складну поведінку агентів в умовах невизначеності та неструктурованих даних. Наприклад, Ikidid A., El Fazziki A., Sadgal M. [5] розглядають системи, що використовують нечітку логіку для пріоритетного управління міським трафіком і підходить для досліджень у контексті розумних міст.

Таким чином, агентне моделювання та нечітка логіка є перспективними напрямками у дослідженнях транспортних мереж. Останні наукові праці демонструють ефективність таких

підходів у моделюванні складних систем, що включають взаємодію багатьох учасників із різними типами поведінки в умовах невизначеності. Це забезпечує нові можливості для оптимізації параметрів систем управління транспортними системами і створення більш ефективної інфраструктури міста.

Метою даного дослідження є розробка агентної моделі для симуляції та оптимізації міської транспортної мережі з використанням методів нечіткої логіки. Така модель повинна враховувати складні взаємодії між різними агентами (транспортними засобами, пішоходами, світлофорами) і надавати можливість аналізу та прогнозування трафіку в умовах невизначеності.

Конкретні завдання дослідження:

1. Аналіз існуючих моделей агентного моделювання для систем управління транспортною мережею і визначення ключових параметрів, які необхідно враховувати при моделюванні міського транспорту.

2. Розробка агентної моделі транспортної мережі, яка включає різні типи агентів (автомобілі, автобуси, пішоходи), їхню поведінку, взаємодію з інфраструктурою (світлофори, перехрестя) і динамічні зміни у транспортному потоці.

3. Інтеграція методів нечіткої логіки для врахування невизначеності у поведінці агентів і зовнішніх умов (наприклад, щільність трафіку, погодні умови, аварії). Створення нечіткої системи для управління світлофорами на основі трафіку в реальному часі.

4. Проведення чисельних експериментів із симуляції транспортної системи на основі запропонованої агентної моделі з використанням нечіткої логіки для оцінки ефективності управління транспортним потоком.

5. Оцінка ефективності моделі за допомогою ключових показників: час проїзду, кількість заторів, рівень забруднення та ефективність використання дорожньої інфраструктури.

6. Аналіз різних сценаріїв (наприклад, збільшення кількості транспорту у пікові години, аварії, зміни у роботі світлофорів) для визначення потенційних шляхів оптимізації транспортних потоків у місті.

Очікувані результати:

1. Створення агентної моделі, що дозволяє реалістично симулювати транспортні процеси в місті.

2. Інтеграція нечіткої логіки для поліпшення процесу прийняття рішень у транспортній мережі.

3. Оптимізація транспортних потоків і мінімізація заторів через ефективне управління світлофорами.

4. Пропозиції щодо впровадження отриманих результатів у реальних транспортних мережах для покращення міського руху

Основна частина

Агентне моделювання (ABM) – це метод симуляції, в якому окремі агенти (об'єкти з автономною поведінкою) взаємодіють один з одним і з середовищем. Агенти можуть представляти різних учасників транспортної системи, таких як водії автомобілів, пішоходи, громадський транспорт або світлофори, кожен із яких має свої правила і стратегії прийняття рішень. Цей підхід дозволяє змодельовати складні динамічні процеси у транспортних системах.

Модель системи управління транспортною мережею будується на основі кількох типів агентів:

1. Транспортні засоби: кожен автомобіль, автобус або інший транспортний засіб є окремим агентом, який рухається мережею доріг відповідно до своїх цілей (досягнення місця призначення) та обмежень (правила дорожнього руху, світлофори, інші учасники).

2. Пішоходи: їхня поведінка включає рух по тротуарах, перехід дороги на пішохідних переходах, очікування сигналу світлофора.

3. Світлофори: ці агенти управляють потоком транспорту на перехрестях, змінюючи кольори відповідно до заданих правил або динамічних умов трафіку.

Агентне моделювання дозволяє врахувати індивідуальну поведінку кожного агента, що є важливим при моделюванні таких систем, як міський трафік. Транспортні системи мають децентралізовану природу, оскільки кожен учасник приймає рішення самостійно, але при цьому існують складні взаємодії між агентами, наприклад, зупинка через затор або аварія.

Основні переваги агентного підходу:

1. Моделювання гетерогенних агентів: різні типи агентів мають різну поведінку та цілі. Це дозволяє відображати реальність із великою точністю.

2. Адаптація до динамічних умов: агенти можуть змінювати свою поведінку залежно від змін у середовищі (наприклад, зміна кольору світлофора або зростання кількості транспорту).

3. Простота впровадження нових правил і взаємодій: в АВМ легко додати нові типи агентів або змінити правила взаємодії між ними.

Методи нечіткої логіки використовуються для моделювання процесу прийняття рішень в умовах невизначеності або неповної інформації. Це особливо корисно у транспортних системах, де такі змінні, як інтенсивність трафіку, швидкість руху або кількість заторів є динамічними і складно передбачуваними.

Для інтеграції нечіткої логіки в агентну модель використовуються нечіткі правила, що дозволяють управляти поведінкою світлофорів залежно від трафіку. Наприклад:

1. Якщо щільність трафіку низька на в'їзді і висока на виїзді, тоді час зміни сигналу буде коротким.

2. Якщо трафік середній на обох напрямках, час сигналу буде середнім.

3. Якщо трафік високий на в'їзді і низький на виїзді, час сигналу буде тривалим.

Агентна модель системи управління транспортною мережею будується з урахуванням кількох рівнів взаємодії між агентами:

1. Автомобілі рухаються дорогою, обираючи оптимальні шляхи, враховуючи обмеження швидкості, інші транспортні засоби і правила дорожнього руху.

2. Світлофори змінюють сигнали залежно від динаміки транспортного потоку. Нечітка логіка використовується для визначення тривалості червоного або зеленого світла, враховуючи трафік на в'їзді та виїзді з перехрестя.

3. Пішоходи перетинають дороги на пішохідних переходах, очікуючи на зелене світло або при відсутності транспортних засобів.

Ключові параметри, які враховуються у моделі:

1. Щільність трафіку (кількість автомобілів на одиницю площі дороги).

2. Час затримки на світлофорах для транспортних засобів.

3. Кількість аварій або непередбачуваних подій, які можуть вплинути.

Розробка моделі

Розробка агентної моделі для симуляції та аналізу системи управління транспортною мережею міста полягає у поетапному створенні компонентів, що взаємодіють між собою, а також у їхньому графічному представленні для кращого розуміння.

Етапи розробки моделі:

1. **Формулювання мети та завдань моделі.** Основною метою є симуляція системи управління для аналізу ефективності управління транспортними потоками та оптимізації роботи світлофорів з використанням нечіткої логіки. Модель повинна враховувати динамічні зміни у трафіку, поведінку агентів та невизначеності в середовищі.

2. **Визначення основних агентів та їх характеристик:**

- Транспортні засоби: автомобілі, автобуси, які мають параметри (швидкість, напрямок руху, маршрут).

- Пішоходи агенти, що рухаються пішохідними зонами та перетинають дороги.

- Світлофори - контрольні агенти, що регулюють рух на перехрестях залежно від стану трафіку.

3. **Побудова транспортної інфраструктури.** Дороги та перехрестя моделюються як граф, де вузли є перехрестями, а ребра – дорогами. Кожне ребро має певні параметри, такі як кількість смуг, довжина та обмеження швидкості.

4. **Інтеграція нечіткої логіки для управління світлофорами.** Вхідні параметри для нечіткої логіки включають щільність трафіку на підходах до перехресть, швидкість руху транспорту і кількість пішоходів. Вихідним параметром є тривалість сигналу світлофора.

Тестування та оцінка ефективності моделі

Для тестування моделі та оцінки ефективності управління світлофорами агентним підходом з нечіткою логікою був створений алгоритм на мові програмування JavaScript. Для перевірки алгоритму були використані наступні параметри:

- трафік рівнів завантаженості показаний на рис. 1, рис. 2 та рис. 3;

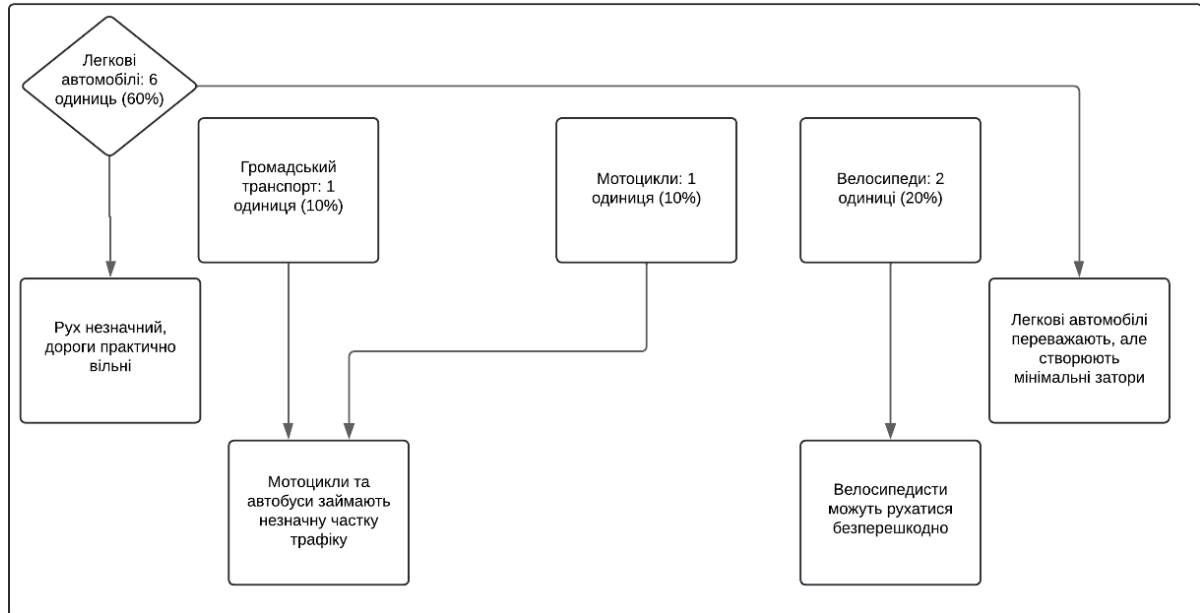


Рис. 1. Низький трафік (10% завантаженість)

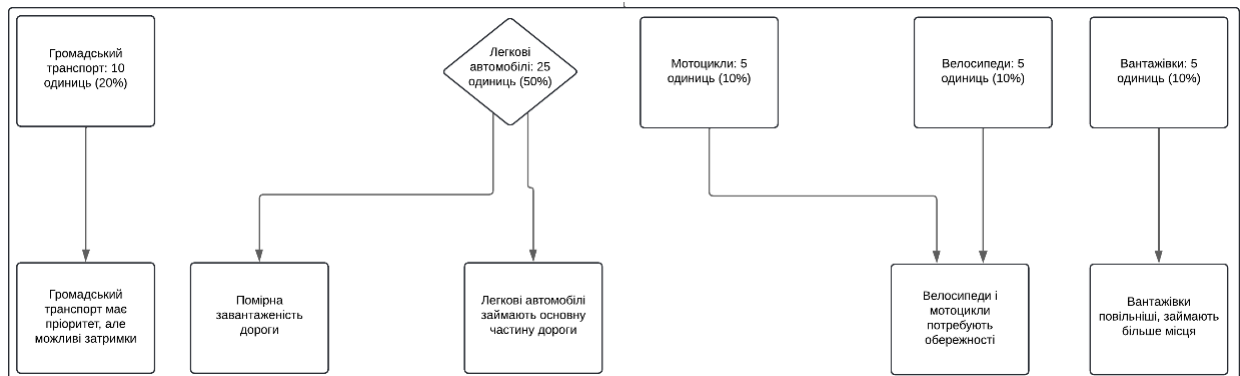


Рис. 2. Середній трафік (50% завантаженість)

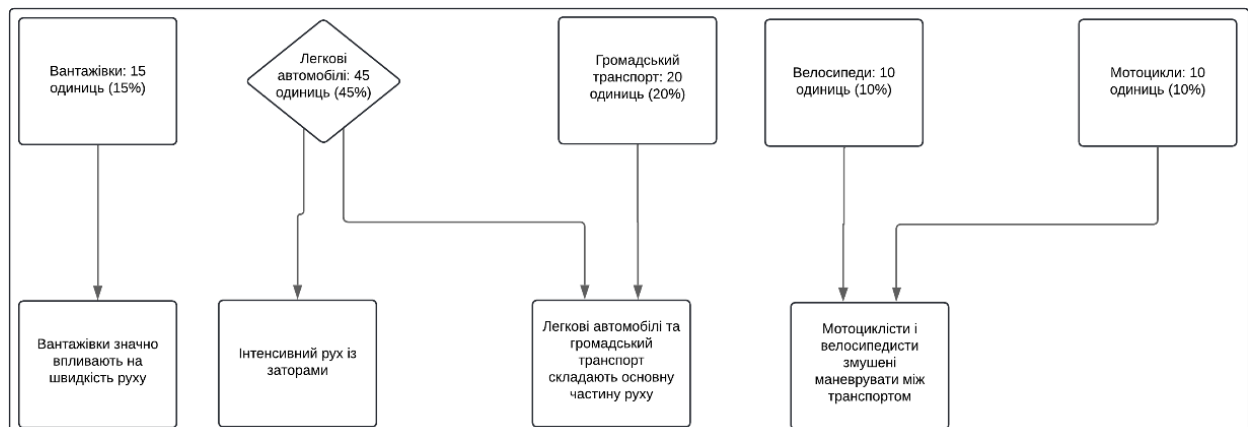


Рис. 3. Високий трафік (90% завантаженість)

- пішоходи (кількість пішоходів):

- 5 осіб (мало пішоходів);
- 35 осіб (середньо пішоходів);
- 70 осіб (багато пішоходів).

Після тестування були отримані наступні результати:

Для низького трафіку та малої кількості пішоходів тривалість зеленого сигналу коротша, а ефективність для пішоходів менша. Для середнього та високого завантаження трафіку й пішоходів зелені сигнали довші, що збільшує ефективність для обох категорій.

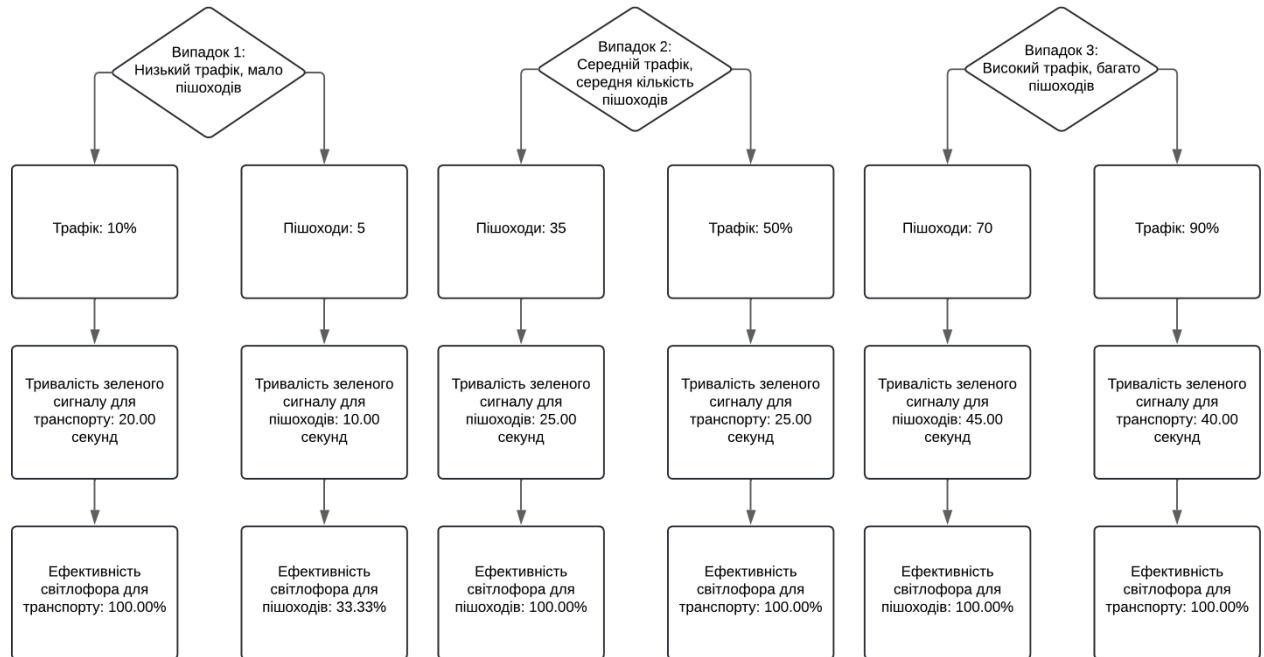


Рис. 4. Результати тестування моделі

Для оцінки ефективності управління світлофорами між традиційним методом та агентним підходом з нечіткою логікою розглянемо кілька важливих параметрів. Це дозволить порівняти, як різні методи впливають на потоки транспорту та пішоходів і оцінити результати в різних умовах.

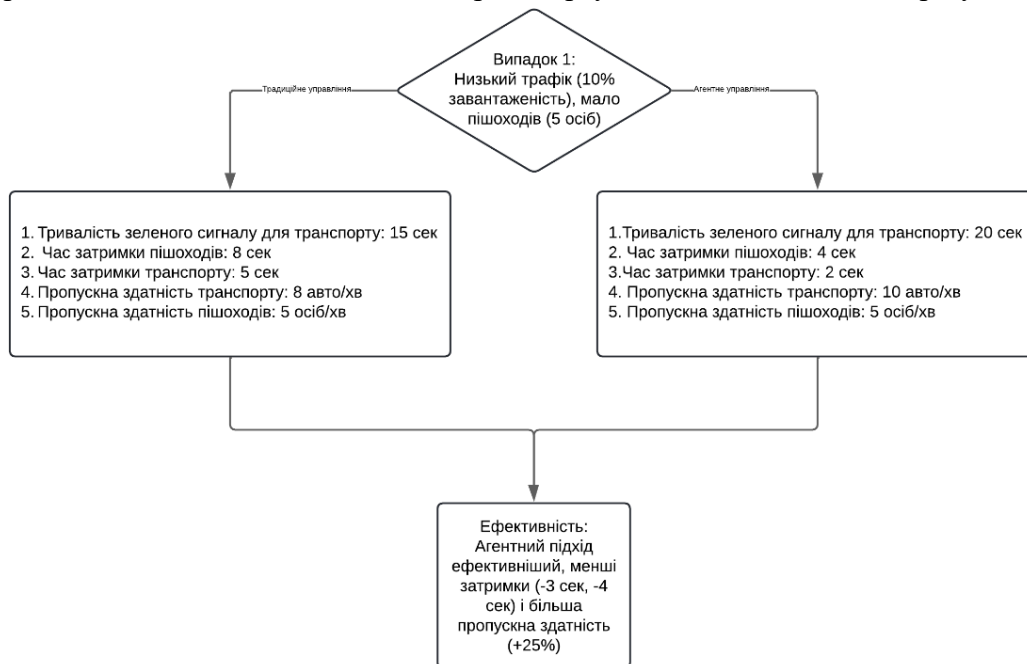


Рис. 5. Оцінка ефективності різних методів керування світлофорів для низького трафіку

Параметри оцінки ефективності:

- час затримки транспорту (секунди);
- час затримки пішоходів (секунди);
- тривалість зеленого сигналу (секунди);
- кількість пропущених одиниць транспорту (кількість авто/хвилина);
- пропускна здатність для пішоходів (кількість пішоходів/хвилина).

Оцінка для різних методів керування світлофорів зображена на рис. 5, рис. 6 та рис. 7.

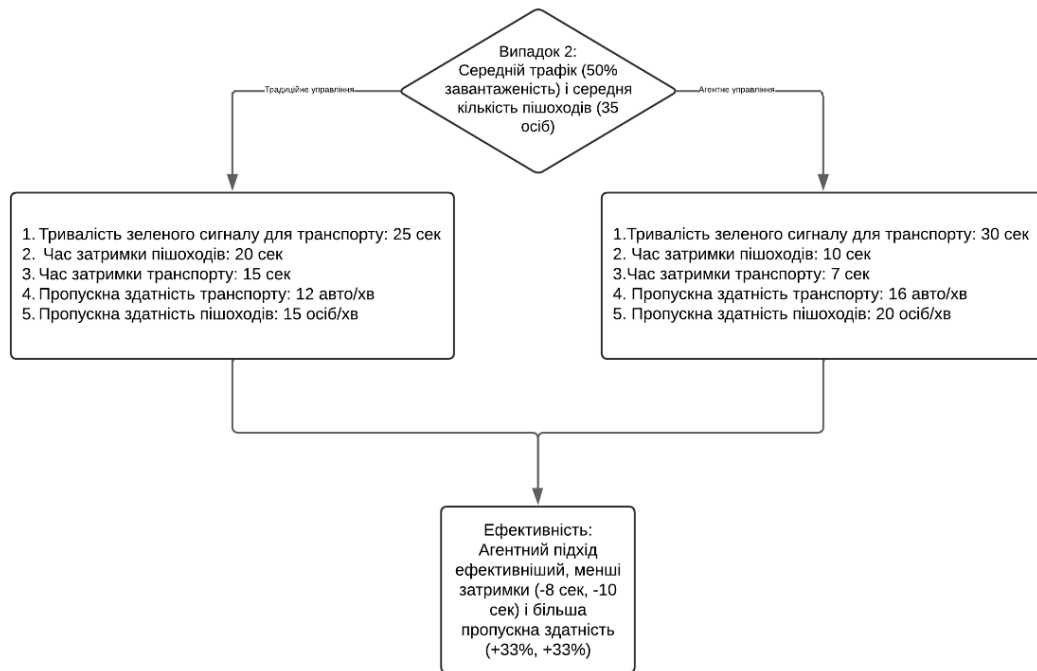


Рис. 6. Оцінка ефективності різних методів керування світлофорів для середнього трафіку

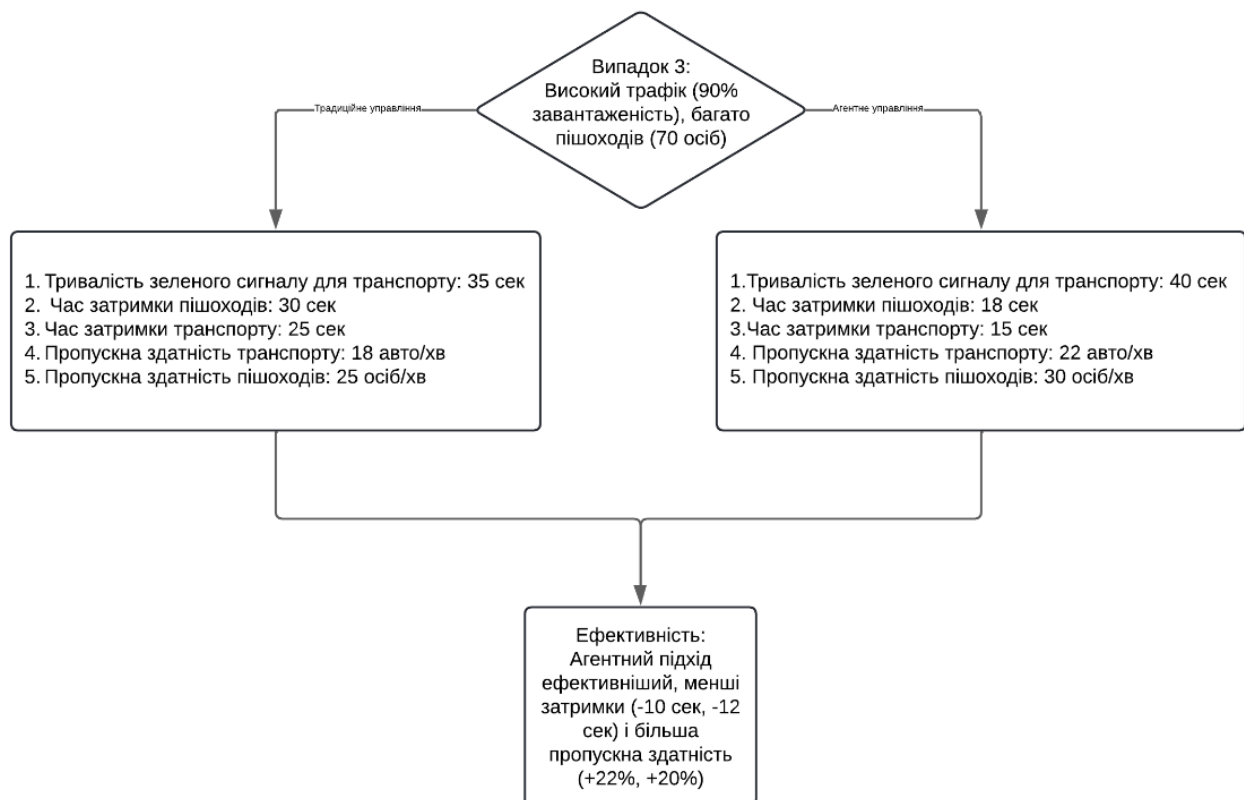


Рис. 7. Оцінка ефективності різних методів керування світлофорів для високого трафіку

Висновки

Агентне управління з нечіткою логікою показує більшу ефективність для обробки різних сценаріїв завантаженості. Для низького та середнього трафіку агентний підхід зменшує затримки і збільшує пропускну здатність для транспорту та пішоходів. У випадку високого трафіку агентний підхід також значно переверщує традиційне управління світлофорами, забезпечуючи менші затримки та кращу пропускну здатність.

Таким чином, агентний підхід із використанням нечіткої логіки дає більшу ефективність і покращує транспортні потоки у всіх сценаріях.

Перспективи подальших досліджень включають:

1. Розширення моделі для інтеграції інших типів агентів, таких як велосипедисти або нові види громадського транспорту.
2. Використання машинного навчання для покращення адаптивності системи до нових сценаріїв трафіку.
3. Розробка моделей для більш складних інфраструктурних умов, таких як багатопіверхові дороги та тунелі.
4. Адаптація моделі для реального впровадження у системи "розумних" міст з урахуванням інтернету речей (IoT).

Список літератури

1. Meng X., Hou Q., Quan L. et al. Self-organizing fuzzy neural network with adaptive evolution strategy for nonlinear and nonstationary processes. *Artif Intell Rev* 58, 280 (2025): <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11283-x>.
2. Morri N., Hadouaj S. & Said L. Fuzzy logic based multi-objective optimization of a multi-agent transit control system. *Memetic Comp.* 15, 71–87 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12293-022-00384-7>.
3. Tamrat D., Lazlo T. Koczy. Agent-Based Intelligent Fuzzy Traffic Signal Control System for Multiple Road Intersection Systems // *Mathematics*. – MDPI. – 2023. – Vol. 13, №1. – Article 124: <https://www.mdpi.com/2227-7390/13/1/124>.
4. Bartłomiej P. A Traffic Model Based on Fuzzy Cellular Automata // *International Journal of Computer Applications*. – 2013. – Vol. 72, №1. https://www.researchgate.net/publication/258839802_A_Traffic_Model_Based_on_Fuzzy_Cellular_Automata.
5. Ikidid A., El Fazziki A., Sadgal M. A Fuzzy Logic Supported Multi-Agent System for Urban Traffic and Priority Link Control // *Journal of Universal Computer Science*. – 2021. – T. 27, № 10. – С. 1026-1045. – DOI: <https://doi.org/10.3897/jucs.69750>.

S. Korotkov, N. Lashchevska, T. Dovzhenko

METHODS OF MANAGING A SELF-ORGANIZING NETWORK BASED ON AGENT-BASED MODELING WITH FUZZY LOGIC

The article presents a comprehensive study of traffic flow management methods in urban environments using agent-based models and fuzzy logic. As urban traffic intensity increases each year, this leads to issues such as congestion, elevated air pollution, reduced traffic speed, and increased stress among road users. Traditional traffic management methods often fail to account for the complexity and dynamic nature of modern transport systems, where diverse agents such as cars, pedestrians, and public transport interact. Agent-based modeling allows for the creation of more flexible and adaptive models where each road user (agent) can make autonomous decisions based on local conditions.

The article emphasizes the importance of using fuzzy logic to process incomplete or vague information, which frequently occurs in real urban conditions. Fuzzy logic enables the modeling of complex traffic behaviors and improves decision-making processes in cases where traffic parameters change unpredictably. For example, fuzzy rules are applied to traffic light control, adjusting signal duration according to current traffic intensity.

Simulations conducted using the proposed model demonstrated that integrating agent-based approaches with fuzzy logic can significantly reduce congestion, shorten delay times, and improve the throughput of the transpor-

tation system under various traffic scenarios. The model was tested across multiple levels of network load, from low to high, and in all cases, it showed high efficiency. The proposed approach not only aids in analyzing current conditions but also provides opportunities for future infrastructure planning and forecasting.

The application of this model could contribute to more efficient use of road infrastructure, improve urban travel conditions, and reduce the negative environmental impacts through decreased congestion and air pollution.

Keywords: agent-based model; fuzzy logic; information networks; information systems; computer modeling; optimization; control system.
