

МУЛЬТИАГЕНТНА АРХІТЕКТУРА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ МІСЬКИМ ТРАФІКОМ В УМОВАХ МІНЛИВОСТІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розв'язується актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності керування міським трафіком в умовах високої просторово-часової мінливості. Проаналізовано недоліки існуючих жорстко періодичних систем керування та обґрунтовано доцільність переходу до подієво-орієнтованої парадигми. Запропоновано нову мультиагентну архітектуру децентралізованого керування, яка використовує адаптивну нечітку логіку. Особливістю архітектури є селективна активація механізмів адаптації (оновлення функцій належності та ваг правил) виключно за настання критичних подій у транспортній мережі. Чисельне моделювання доводить, що такий підхід забезпечує зменшення середньої затримки транспортних засобів на 25,4 %, скорочення довжини черг на 28,9 % та зростання загальної пропускної здатності на 18 % при одночасному зниженні обчислювального навантаження на систему у понад 2,3 рази.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи, мультиагентна архітектура, нечітка логіка, адаптивна оптимізація.

Abstract

The report solves the urgent scientific and applied problem of increasing the efficiency of urban traffic control under conditions of high spatio-temporal volatility. The shortcomings of existing strictly periodic control systems are analyzed, and the expediency of transition to an event-driven paradigm is substantiated. A novel multi-agent architecture for decentralized control using adaptive fuzzy logic is proposed. A specific feature of the architecture is the selective activation of adaptation mechanisms (updating membership functions and rule weights) solely upon the occurrence of critical events in the traffic network. Numerical simulation proves that this approach ensures a 25.4% reduction in average vehicle delay, a 28.9% reduction in queue length, and an 18% increase in overall throughput while simultaneously reducing the computational load on the system by more than 2.3 times.

Keywords: intelligent transportation systems, multi-agent architecture, event-oriented control, fuzzy logic, adaptive optimization.

Вступ

Сучасний етап розвитку великих міст характеризується стрімким зростанням рівня автомобілізації, що призводить до хронічного перевантаження транспортних мереж. Інтенсивна урбанізація та ускладнення просторово-часової структури потоків роблять традиційні методи організації дорожнього руху неефективними. Оскільки фізичне розширення дорожньої інфраструктури в умовах щільної міської забудови є економічно недоцільним або об'єктивно неможливим, головним шляхом вирішення проблеми заторів стає впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

В основі сучасних ІТС лежить концепція децентралізованого керування, де ключову роль відіграють мультиагентні системи. У таких системах кожен світлофорний об'єкт розглядається як інтелектуальний автономний агент, здатний аналізувати поточну ситуацію на своєму локальному сегменті та взаємодіяти з сусідніми агентами для досягнення глобальної мети — мінімізації затримок та максимізації пропускної здатності.

Аналіз останніх досліджень

Широке застосування в мультиагентних системах керування трафіком знайшов математичний апарат нечіткої логіки. Він дозволяє оперувати лінгвістичними змінними (наприклад, «велика черга», «низька інтенсивність»), що імітує логіку прийняття рішень людиною-регулювальником [1, 2]. Проте аналіз

існуючих рішень показує суттєвий недолік: абсолютна більшість адаптивних контролерів функціонує на основі жорстко періодичного оновлення параметрів [3, 4].

За такого підходу алгоритми оптимізації ініціюються через задані фіксовані інтервали часу, незалежно від реального стану транспортного потоку. В умовах мінливості трафіку це призводить до двох критичних проблем. По-перше, при раптових подіях (ДТП, різке зростання потоку, наближення громадського транспорту) система реагує із запізненням, оскільки очікує наступного такту перерахунку. По-друге, у стабільні міжпікові періоди система виконує складні оптимізаційні розрахунки, результати яких мінімально відрізняються від попередніх, що призводить до невиправданого марнотратства обчислювальних ресурсів та енергії периферійних контролерів [5].

Мультиагентна архітектура та подієвий підхід

Для подолання вищезазначених обмежень у даному дослідженні запропоновано вдосконалену мультиагентну архітектуру, що базується на методі адаптивної подієво-орієнтованої оптимізації. Головна ідея полягає у відмові від таймерного циклу на користь селективної активації обчислень.

У межах розробленої архітектури кожен агент постійно моніторить стан підпорядкованого перехрестя (дані з індуктивних петель, радарів чи систем відеоаналітики). Проте складний алгоритм адаптації параметрів нечіткого висновку запускається виключно за умови настання наперед визначених критичних подій у транспортній мережі.

Алгоритмічно механізм ініціації подій спирається на постійний контроль граничних значень. Такими подіями-тригерами у запропонованій системі є:

- перевищення заданого порогового значення довжини черги на будь-якому з під'їздів до перехрестя;
- різка зміна інтенсивності вхідного транспортного потоку (фіксується детекторами на входах до транспортного вузла);
- реєстрація наближення транспортного засобу, що має безумовний пріоритет у русі (громадський транспорт, автомобілі екстрених служб).

Фіксація однієї з цих подій свідчить про те, що поточні налаштування нечіткого контролера (його функції належності та ваги правил) більше не відповідають реальній дорожній ситуації. Лише в цей момент агент активує модуль локальної оптимізації. Процес адаптації включає два рівні:

1. **Параметричний рівень:** динамічне зміщення та масштабування функцій належності нечітких множин вхідних змінних («Довжина черги», «Інтенсивність прибуття») для більш точного охоплення поточної динаміки потоку.
2. **Структурний рівень:** зміна вагових коефіцієнтів бази нечітких правил. Наприклад, якщо виявляється наближення пріоритетного транспортного засобу, агент миттєво генерує внутрішню подію, яка підвищує вагу правил, відповідальних за вмикання зеленого сигналу на відповідному напрямку.

Експериментальне моделювання та аналіз результатів

Для перевірки ефективності розробленої архітектури було проведено серію чисельних експериментів у середовищі імітаційного мікроскопічного моделювання. Транспортна мережа була представлена системою взаємопов'язаних регульованих перехресть. З метою створення умов експлуатаційної мінливості, інтенсивність генерування транспортних засобів на вхідних вузлах мережі змінювалася за нелінійним законом, імітуючи перехід від спокійного міжпікового трафіку до жорсткого ранкового/вечірнього "години пік".

Оцінка якості керування здійснювалася шляхом порівняння запропонованого подієво-орієнтованого методу із класичним періодичним адаптивним методом. Динаміку зміни середньої затримки транспортних засобів залежно від інтенсивності вхідного потоку наведено на рисунку 1.

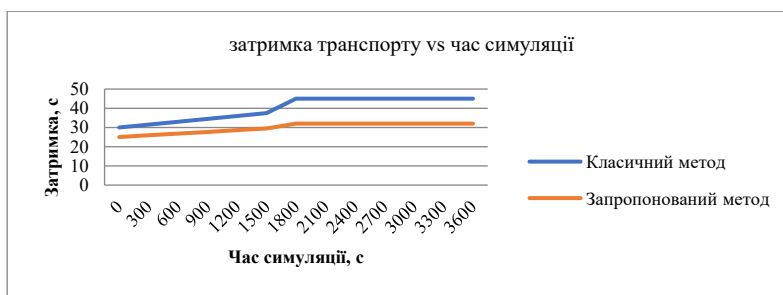


Рисунок 1 – Порівняння динаміки середньої затримки транспортних засобів для класичного та подієво-орієнтованого методів керування

Аналіз отриманих графічних залежностей свідчить про принципову різницю в поведінці систем при досягненні критичних навантажень. При інтенсивності до 600-700 авт/год обидва методи демонструють схожі результати. Проте, при подальшому зростанні трафіку (перевищення порогу 800 авт/год) класичний метод швидко вичерпує свої адаптивні можливості через затримку реакції на швидкі зміни, що призводить до лавиноподібного зростання затримок та утворення стійких заторів. Натомість мультиагентна архітектура з подієвим керуванням своєчасно ініціює переналаштування нечітких контролерів, зберігаючи затримки у прийнятних межах.

Зведені кількісні показники ефективності, усереднені за результатами серії експериментів, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння ефективності методів керування трафіком

Показник	Класичний метод	Запропонований метод
Середня затримка, с	42,6	31,8
Середня довжина черги, од.	14,2	10,1
Пропускна здатність, %	100	118
Кількість оновлень керування, %	100	43

Як видно з наведених даних, розроблений метод забезпечує суттєве покращення якості обслуговування транспортного потоку. Середня затримка одного транспортного засобу зменшилася на 25,4 % (з 42,6 с до 31,8 с), а середня довжина черги перед перехрестями скоротилася на 28,9 % (з 14,2 до 10,1 од.). Оперативне реагування на зміну щільності потоку та швидке розвантаження проблемних напрямків дозволило збільшити загальну пропускну здатність транспортного вузла на 18 %, що є критично важливим досягненням для умов щільної міської забудови.

Окремим і надзвичайно важливим аспектом дослідження є аналіз обчислювальної ефективності розробленої архітектури. Оскільки агенти базуються на мікроконтролерах типу IoT (Internet of Things), економія їхніх обчислювальних ресурсів та пропускну здатності каналів зв'язку є пріоритетною задачею. Порівняння обчислювального навантаження двох методів представлено на рисунку 2.

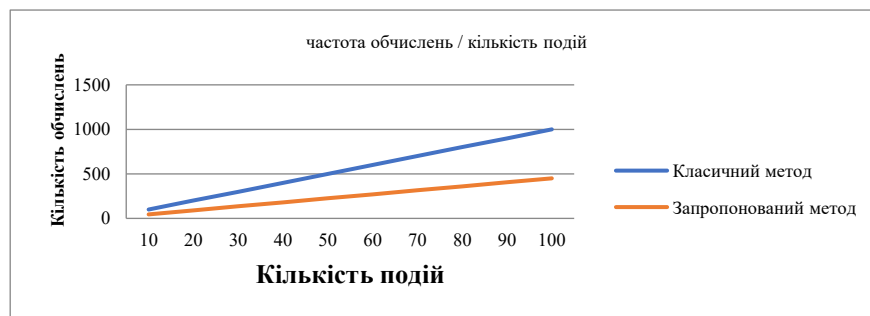


Рисунок 2 – Порівняння обчислювального навантаження класичного та подієво-орієнтованого методів залежно від мінливості трафіку

Отримані результати підтверджують головну алгоритмічну гіпотезу дослідження. Завдяки відмові від періодичного оновлення та переходу до селективного розрахунку виключно за умови настання подій, кількість актів оновлення керувальних рішень зменшилася у понад 2,3 раза (склала 43 % від базового рівня). Це означає, що понад 50 % часу мікроконтролер перебуває у стані очікування або виконує базові функції моніторингу, що суттєво знижує енергоспоживання системи, подовжує термін служби апаратної частини та вивільняє обчислювальні потужності для вирішення інших задач рівня Smart City (наприклад, криптографічного захисту даних).

Висновки

У доповіді вирішено задачу підвищення ефективності міської транспортної інфраструктури шляхом розробки мультиагентної архітектури з децентралізованим керуванням. Головною науковою новизною роботи є інтеграція подієво-орієнтованого підходу з алгоритмами адаптації нечіткої логіки.

Доведено, що активація обчислень виключно у відповідь на суттєві зміни параметрів потоку (утворення черг, різка зміна інтенсивності, пріоритетний транспорт) дозволяє системі уникати запізнених реакцій під час пікових навантажень та холостих обчислень у спокійні періоди. Практичне значення одержаних результатів підтверджується даними імітаційного моделювання: запропонована архітектура здатна зменшити затори (скорочення затримок на 25,4 %), збільшити пропускну здатність на 18 % і, що найважливіше для інженерної реалізації, знизити обчислювальне навантаження на обладнання у 2,3 раза. Напрямок подальших досліджень є інтеграція запропонованого методу з технологіями V2X (Vehicle-to-Everything) для отримання предиктивних даних про наближення безпілотних автомобілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Horn G., Przeździek T., Büscher M. та ін. An event-driven multi agent system for scalable traffic optimization. Workshops of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2020. Vol. 1150. P. 1373–1382.
2. Chala T. D., Kóczy L. T. Agent-based intelligent fuzzy traffic signal control system for multiple road intersection systems. Sensors. 2024. Vol. 25(13). Article 4126.
3. Jafari S., Shahbazi Z., Byun Y. C. Improving the road and traffic control prediction based on fuzzy logic approach in multiple intersections. Mathematics. 2022. Vol. 10 (16). Article 2832.
4. Li W., Li H., Wang S. An event-driven multi-agent based distributed optimal control strategy for HVAC systems in IoT-enabled smart buildings. Automation in Construction. 2021. Vol. 132. Article 103919.
5. Yan C., Zhang J., Xia J., Park J. H. RL-based adaptive fuzzy optimized tracking control for constrained switched stochastic nonlinear systems: A modified AED-ADT method. IEEE Transactions on Cybernetics. 2025. Vol. 55(10). P. 4596–4608.

Гандрибіда Владислав Олександрович, аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com.

Севастьянов Володимир Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sevastyanov.vladimir@vntu.edu.ua

Handrybida Vladyslav Oleksandrovych, PhD student of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com.

Sevastyanov Volodymyr Mykolayovych, PhD, Associate Professor of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sevastyanov.vladimir@vntu.edu.ua.