УДК 004.421.2:629.83

В.О. Гандрибіда

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ ТА ІНТЕГРАЦІЄЮ РОЗКЛАДІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено математичну модель мультиагентної системи управління дорожнім рухом, яка інтегрує нечітку логіку та враховує специфічні вимоги громадського транспорту, зокрема розклади та динаміку руху. Завдяки використанню нечіткої логіки, модель забезпечує адаптивне регулювання світлофорів, що дозволяє оперативно реагувати на змінні умови трафіку. Представлений підхід має потенціал для впровадження в інтелектуальні транспортні системи, що сприятиме підвищенню ефективності управління міською інфраструктурою.

Ключові слова: мультиагентна система, нечітка логіка, математична модель, управління трафіком, громадський транспорт, адаптивне управління, інтелектуальні транспортні системи.

Abstract

A mathematical model of a multi-agent traffic control system integrating fuzzy logic and considering specific public transport requirements, such as schedules and motion dynamics, has been developed. The utilization of fuzzy logic ensures adaptive traffic light regulation, enabling prompt responses to changing traffic conditions. The presented approach has potential for implementation in intelligent transportation systems, contributing to improved efficiency in urban infrastructure management.

Keywords: multi-agent system, fuzzy logic, mathematical model, traffic management, public transport, adaptive control, intelligent transportation systems.

Вступ

У сучасних містах спостерігається стрімке зростання кількості приватних автомобілів, причому в більшості випадків автівку використовує лише водій. Це призводить до нерозумного використання ресурсів та підвищення інтенсивності дорожнього руху, що ускладнює оптимальне регулювання трафіку.

Більшість людей уникають громадського транспорту, оскільки він, як правило, є повільнішим за використання власної автівки, що спричиняє ще більше заторів. Тому надзвичайно важливо враховувати рух громадського транспорту та надавати йому пріоритет, щоб зменшити загальне навантаження на транспортну систему та сприяти більш ефективному розподілу потоку транспортних засобів.

Основна частина

Для кожного перехрестя (агента) i у момент часу t визначимо:

- $x_i(t)$ — загальна кількість транспортних засобів, що очікують на перетині.
- $\lambda_i(t)$ — загальний потік транспортних засобів, що набувають перетину:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i,gen}(t) + \lambda_{i,p}(t), \quad (1)$$

де $\lambda_{i,gen}(t)$— потік звичайних автомобілів; $\lambda_{i,p}(t)$ — потік громадського транспорту (який, зокрема, залежить від розкладу).

- $\mu_i\left(t, u_i(t)\right)$— потік транспортних засобів, що виїжджають із перетину, який залежить від управляючої дії $u_i(t)$ (наприклад, тривалість зеленого сигналу). Для простоти можна записати:

$$\mu_i\left(t, u_i(t)\right) = \alpha_i\, u_i(t), \quad (2)$$

де α_i — коефіцієнт ефективності пропускної здатності.

Отже, динаміку стану описуємо різницевим рівнянням:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \lambda_i(t) - \mu_i\big(t, u_i(t)\big) \tag{3}$$

Щоб врахувати вплив громадського транспорту, вводимо додаткову змінну $\eta_i(t)$ — індекс пріоритету для громадського транспорту на перетині i. Нехай:

$$\eta_i(t) = \sum_{k \in PT(i)} w_k \; f\big(\delta_k(t)\big), \tag{4}$$

де $PT(i)$ — множина громадських транспортних засобів, що наближаються до перетину i; w_k — вага транспортного засобу k (може залежати від типу, наприклад, автобус, трамвай тощо); $\delta_k(t) = T_{\text{current},k}(t) - T_{\text{sch},k}$ — відхилення фактичного часу прибуття транспортного засобу k від запланованого розкладу $T_{\text{sch},k}$; $f(\delta)$ — функція, яка перетворює відхилення у числовий показник пріоритету (наприклад, зростає при збільшенні δ, що означає, що засіб спізнюється).

Таким чином, чим більше транспортних засобів із значним відхиленням від розкладу наближається до перетину, тим вищим буде $\eta_i(t)$.

Для прийняття рішення на основі нечіткої логіки враховуємо як загальний стан черги, так і пріоритет громадського транспорту. Визначимо агреговану змінну:

$$y_i(t) = \beta_0 \, x_i(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \beta_{ij} \; x_j(t) + \beta_P \, \eta_i(t), \tag{5}$$

де $\mathcal{N}(i)$ — набір перехресть-сусідів, що взаємодіють із перехрестям i; β_0, β_{ij} — вагові коефіцієнти, що визначають внесок власного стану та стану сусідів; β_P — коефіцієнт, який задає вплив пріоритету громадського транспорту.

Вхідна змінна $y_i(t)$ розбивається на нечіткі множини [1], наприклад:

- **Low** — низьке навантаження/пріоритет,
- **Medium** — середнє навантаження/пріоритет,
- **High** — високий рівень навантаження/пріоритет.

Функції приналежності $\mu_{\text{Low}}(y), \mu_{\text{Medium}}(y), \mu_{\text{High}}(y)$ можуть бути визначені емпірично або за допомогою експертних оцінок [2].

Далі необхідно ввести нечіткі правила [3]. Приклади правил:

- **IF** $y_i(t)$ **is High THEN** $u_i(t) = u_{\text{long}}$ (довгий зелений), що дозволяє збільшити пропускну здатність, зокрема для громадського транспорту.
- **IF** $y_i(t)$**is Medium THEN** $u_i(t) = u_{\text{medium}}$.
- **IF** $y_i(t)$ **is Low THEN** $u_i(t) = u_{\text{short}}$.

Особливу увагу приділяють тим правилам, де внесок $\eta_i(t)$ є значним, що може означати, що навіть при помірному загальному завантаженні перехрестя система дає пріоритет громадському транспорту[4].

За методом центра мас (center of gravity) визначаємо конкретне значення управляючої дії:

$$u_i(t) = \frac{\sum_{k \in \{\text{Low,Medium,High}\}} \mu_k\big(y_i(t)\big) \cdot u_k}{\sum_{k \in \{\text{Low,Medium,High}\}} \mu_k\big(y_i(t)\big)} \tag{6}$$

Отже, розширена модель включає:

1. Динаміку черги:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \big[\lambda_{i,\text{gen}}(t) + \lambda_{i,\text{pt}}(t)\big] - \alpha_i \, u_i(t). \tag{7}$$

2. Обчислення пріоритету громадського транспорту:

$$\eta_i(t) = \sum_{k \in PT(i)} w_k \; f\big(T_{\text{current},k}(t) - T_{\text{sch},k}\big). \tag{8}$$

3. Агреговану вхідну змінну для нечіткої логіки:

$$y_i(t) = \beta_0 \, x_i(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \beta_{ij} \; x_j(t) + \beta_P \, \eta_i(t). \tag{9}$$

4. Нечіткий контролер:
   - Фаззифікація вхідного сигналу $y_i(t)$;
   - Застосування набору правил, які враховують як загальну ситуацію на перехресті, так і пріоритет громадського транспорту;
   - Дефаззифікація для отримання управляючого сигналу $u_i(t)$.

Висновки

Запропонована математична модель мультиагентної системи з нечіткою логікою дозволяє ефективно врахувати динаміку транспортних потоків, зокрема зростаючу кількість приватних автомобілів та потребу у пріоритеті для громадського транспорту. Модель демонструє високу адаптивність завдяки інтеграції даних про розклади і фактичну динаміку руху, що створює умови для оптимізації розподілу транспортного потоку та зменшення заторів. Вона має наукову новизну завдяки синергії між нечіткою логікою та мультиагентним підходом, що дозволяє забезпечити більш гнучке та локально орієнтоване управління трафіком.

Отримані результати свідчать про потенціал моделі для подальшої експериментальної верифікації як у симуляційному середовищі, так і в реальних умовах. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію параметрів нечіткої логіки, розширення набору вхідних даних та інтеграцію додаткових аспектів, що впливають на ефективність управління трафіком.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang, Y., Liu, D., & Wang, X. "Multi-Agent Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic and Reinforcement Learning." IEEE Access, 5. 2017. P. 12227–12236
2. Liu, X., Chen, Y., & Li, Z. "Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic and V2I Communication." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(11). 2016. P. 3204–3213.
3. Goswami, P. K., & Singh, R. "Fuzzy Logic-based Dynamic Traffic Signal Control System: A Case Study." Transportation Research Procedia, 47. 2020. P. 101–108.
4. 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, 13(2). 2021. P. 45–55.

Гандрибіда Владислав Олександрович — аспірант групи 174-23а, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com

Науковий керівник: ***Севастьянов Володимир Миколайович*** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет. Вінниця, e-mail: sevastiyanov.vladimir@vntu.edu.ua

Gandrybida Vladyslav O. — graduate student of group 174-23a, faculty of intellectual information technologies and automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com

Supervisor: ***Sevastyanov Volodymyr M.*** — Ph.D, Associate Professor of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sevastiyanov.vladimir@vntu.edu.ua