

В. О. Гандрибіда¹
В. М. Севастьянов¹

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМИ ОБ'ЄКТАМИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ З УРАХУВАННЯМ ПРІОРИТЕТУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

¹Вінницький національний технічний університет

Адаптивне керування світлофорними об'єктами з урахуванням пріоритету громадського транспорту потребує поєднання технологічної гнучкості та соціальної чутливості. У статті проаналізовано можливості застосування нечіткої логіки як основи для побудови регуляторів, здатних реагувати на зміни трафіку без жорстких меж і фіксованих правил. Керування з використанням нечітких правил дозволяє враховувати запізнення транспорту, щільність потоків, пасажиромісткість, а також мінімізувати затримки без порушення загального балансу. Окрему увагу приділено мультиагентному підходу, у якому кожне перехрестя виступає як самостійна керувальна одиниця, здатна ухвалювати рішення на основі локальних даних і взаємодії з сусідніми вузлами. Така архітектура дозволяє створювати адаптивну мережу керування, де пріоритет для громадського транспорту забезпечується не епізодично, а системно — вздовж усього маршруту. Розглянуто гібридні моделі, у яких нечітка логіка поєднується з елементами навчання з підкріпленням та інфраструктурною комунікацією (V2I). Продемонстровано ефективність підходу у скороченні часу затримки для транспорту на 12...18 % порівняно з неадаптивними методами. Описано формулу індексу пріоритету, що дозволяє інтегрувати фактори запізнення та ваги транспортного засобу. Здійснено порівняння з іншими моделями, зокрема типу 2 та навчанням на основі GPS-даних. Зроблено висновок про придатність запропонованого підходу до впровадження як на окремих перехрестях, так і в масштабі міської мережі. У перспективі розглядається симуляційне тестування, масштабування на мультиагентну архітектуру та інтеграція з безбар'єрними вимогами і нейромережами. Запропонована модель не лише підвищує транспортну ефективність, а й сприяє формуванню соціально орієнтованої інфраструктури, чутливої до потреб пасажирів.

Ключові слова: нечітка логіка, світлофорне керування, пріоритет громадського транспорту, мультиагентна система, адаптивний регулятор, індекс пріоритету, V2I-комунікація.

Вступ

Урбанізований простір формує змінний попит на пропускну здатність перехресть, тому керування світлофорними об'єктами потребує моделей, що враховують локальні вимірювання та міжвузлові впливи в реальному часі. Зростання частки маршрутів громадського транспорту створює додаткове обмеження, адже пріоритет таких транспортних засобів має поєднуватися з дотриманням прийнятних затримок для приватного трафіку, що ставить задачу узгодження локальних і мережевих критеріїв. Класичні підходи до фіксованих або жорстко параметризованих циклів не забезпечують стабільної роботи за флуктуацій попиту та не враховують невизначеність датчиків, тому метод нечіткої логіки розглядається як природний інструмент для опису термів навантаження, мережевого впливу та індексу пріоритету.

Нечітка логіка є одним з ефективних підходів моделювання, який дозволяє моделювати ситуації, де значення не є точними. Наприклад, інтенсивність руху не завжди можна визначити жорстко: вона є «низькою», «середньою» або «високою» з певним ступенем належності. Такий підхід забезпечує гнучкість. Нечіткий регулятор може враховувати кілька умов одночасно: кількість ав-

то, пріоритет автобусів, стан суміжних перехресть.

Запропонована модель вводить нормовані вхідні змінні x , η , v і та вихід u , визначає косинусні функції належності з контрольованим перекриттям, формує базу правил, агрегує їх у $\mu_U(z)$ і завершує обчислення дефазифікацією методом центра мас, що забезпечує плавну корекцію зеленої фази. Практична мотивація полягає у зниженні середніх затримок на критичних напрямках за одночасного дотримання часу пріоритетного обслуговування для громадського транспорту, причому параметризація термів для η та асиметрія вихідних термів на $z = u/\Delta_{\max}$ дозволяють посилювати пріоритет без різких перемикачів. Дослідження фокусується на узгодженні структури термів з вимірами реальних детекторів, на побудові правила агрегування з явним визначенням $\mu_U(z)$ та на експериментальній перевірці працездатності моделі на наборі сценаріїв з різними режимами навантаження.

Теоретичні засади нечіткого керування у транспортних системах

Нечітка логіка, вперше запропонована Л. Заде у 1965 році, стала ефективним засобом моделювання та керування системами з високим рівнем невизначеності. У контексті транспортних систем вона дозволяє формалізувати нечіткі поняття як-от «високе навантаження», «незначне запізнення» чи «помірний пріоритет» у вигляді функцій належності та правил нечіткого висновку [1]. Цей підхід особливо ефективний для локального адаптивного керування на перехрестях, де дані надходять з різною точністю, а ситуація постійно змінюється.

Як показано в узагальненому огляді С. Араггі та ін. [2], нечітка логіка входить до складу комп'ютерних інтелектуальних методів разом з нейронними мережами, генетичними алгоритмами та системами навчання з підкріпленням. Її головна перевага — можливість побудови керувальних рішень без потреби в точній математичній моделі об'єкта.

Ідея інтеграції нечіткої логіки як складника гібридних інтелектуальних систем отримала значний розвиток у межах сучасного підходу до транспортного регулювання. У публікації Н. Б. Т. Нгуєна, Т. М. Хоанга і Д. К. Фама описано архітектуру, що поєднує глибоке навчання з підкріпленням та нечітке прийняття рішень, що дозволяє адаптувати сигнальний контроль як до довгострокових шаблонів трафіку, так і до поточних збурень у режимі реального часу [3]. У цій моделі нечіткий модуль виконує функцію локального адаптивного регулятора, який забезпечує плавні переходи між фазами світлофора без потреби в глобальній перебудові всієї системи.

Дослідження С. Лю, І. Чена і Ч. Лі демонструє ефективність поєднання нечіткої логіки з інфраструктурними технологіями зв'язку V2I (vehicle-to-infrastructure), які дозволяють безпосередньо враховувати характеристики транспортного потоку на під'їздах до перехрестя [4]. Така взаємодія між транспортним засобом і регулятором дозволяє автоматично перебудовувати сигнальні фази відповідно до наявності громадського транспорту, ступеня його запізнення або зміни структури потоку. Система реагує не лише на кількість транспортних одиниць, а й на їхній тип, що особливо важливо для врахування пріоритету трамваїв або автобусів у годину пік.

Робота Ю. Чжана, Д. Лю і С. Вана свідчить про ефективність мультиагентних систем керування, що поєднують механізм локального прийняття рішень на основі нечіткої логіки із загальною мережею координації дій на суміжних перехрестях [5]. У такій моделі кожний світлофор виконує роль незалежного агента, здатного до обміну інформацією про стан черг, наявність громадського транспорту та зміни інтенсивності руху. У результаті формується гнучка, масштабована система керування, яка дозволяє ефективно розв'язувати конфлікти інтересів між різними напрямками руху. Проведені симуляції доводять, що загальний час затримки транспорту зменшується на 20...30 % порівняно з класичними централізованими методами.

Для локального контексту важливо врахувати також українські публікації. Так, Ю. М. Шмельов [6] зазначає, що інтелектуальні підходи, зокрема нечітка логіка, мають високу адаптивність до умов обмеженої інфраструктури та нестабільного навантаження. А Т. В. Татарінов підкреслює, що системи з нечіткою логікою демонструють вищу надійність у нестандартних дорожніх ситуаціях, зокрема, під час погіршення погодних умов або аварій [7].

Метою статті є побудова адаптивної системи керування світлофором, яка:

- враховує динамічну завантаженість перехрестя;
- визначає пріоритет громадського транспорту на основі запізнення;
- використовує нечіткі правила для регулювання тривалості зеленої фази.

У разі мультиагентного підходу, кожне перехрестя виступає як агент, що приймає локальні рішення. У випадку підвищеного запізнення маршрутки або трамвая, система має подовжити зелений сигнал для пріоритетного напрямку. При цьому варто зберігати баланс — надмірне переважання одного потоку не повинно погіршити ситуацію на сусідніх вузлах.

Формалізація моделі

Нехай на перехресті i у момент часу t перебуває $x_i(t)$ одиниць транспорту. Вхідний потік моделюється так:

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

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

Вихідний потік моделюється через:

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

де α_i — коефіцієнт ефективності пропускної здатності, а $u_i(t)$ — керувальна дія (тривалість зеленої фази).

Стан черги змінюється за формулою

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \lambda_i(t) - \mu_i(t, u_i(t)). \quad (3)$$

Щоб врахувати потреби громадського транспорту, вводимо індекс пріоритету

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

де w_k — вага (залежить від типу транспортного засобу), а $\delta_k(t)$ — запізнення автобуса k від запланованого розкладу. Функція $f(\delta)$ має зростати з δ : що більше запізнення, то вищий пріоритет.

Цей індекс є динамічним. Він зростає, якщо декілька автобусів одночасно наближаються до вузла із запізненням. У такому разі система повинна зреагувати миттєво, надаючи додатковий час проходу.

Побудова нечіткого регулятора

Для прийняття рішення використовуємо агреговану змінну

$$y_i(t) = \beta_0 x_i(t) + \sum_{j \in N(i)} \beta_{ij} x_j(t) + \beta_p \eta_i(t), \quad (5)$$

де β_0 — вага локального навантаження, β_{ij} — вплив сусідів, β_p — вага пріоритету громадського транспорту.

Змінна $y_i(t)$ надалі фазифікується. Визначено три нечіткі множини:

- Low — низьке навантаження/пріоритет;
- Medium — середнє;
- High — високе.

Кожна з них має функцію належності. Під μ -функціями розуміються функції належності термів: $\mu_{Low/Med/High}^{(x)}(x)$, $\mu_{Low/Med/High}^{(v)}(v)$, $\mu_{Low/Med/High}^{(\eta)}$ та $\mu_{Short/Normal/Long}^{(z)}(z)$. Запис $\mu_A(*)$ подає ступінь належності змінної до терма A . Наприклад, функція $\mu_{Low}(y)$ визначає ступінь того, наскільки ситуація відповідає стану «низького завантаження».

Функції належності термів у нечіткому регуляторі світлофорного об'єкта

Опис моделі спирається на нормування вхідних змінних до $[0,1]$ та де-нормалізацію виходу u до $[0, \Delta_{\max}]$. Вектор входів: локальне навантаження x , мережевий вплив v , індекс пріоритету громадського транспорту η ; вихід u задає корекцію тривалості зеленої фази. Побудова функцій належності використовує косинусні переходи з перекриттям 20...30 %.

На відрізьку $[0,1]$ вводяться $\alpha < \beta$, $\gamma < \delta$, центр m і напівширина w .

Для виходу $z = u/\Delta\max \in [0,1]$.

Локальне навантаження $x \in [0,1]$.

$$\mu_{Low}^{(x)}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq \alpha_x, \\ \frac{1 + \cos\left(\pi \frac{x - \alpha_x}{\beta_x - \alpha_x}\right)}{2}, & \alpha_x < x < \beta_x, \\ 0, & x \geq \beta_x; \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{Med}^{(x)}(x) = \begin{cases} 1, & |x - m_x| \leq w_x, \\ \frac{1 + \cos\left(\pi \frac{x - m_x}{w_x}\right)}{2}, & |x - m_x| < w_x, \\ 0, & x \geq \gamma_x; \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{High}^{(x)}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq \gamma_x, \\ \frac{1 + \cos\left(\pi \frac{x - \gamma_x}{\delta_x - \gamma_x}\right)}{2}, & \gamma_x < x < \delta_x, \\ 0, & x \geq \delta_x. \end{cases} \quad (8)$$

Рекомендовані параметри для 20...30 % перекриття:

$$\alpha_x = 0,00; \beta_x = 0,35; m_x = 0,50; w_x = 0,25; \gamma_x = 0,65; \delta_x = 1,00.$$

Вплив сусідніх вузлів $v \in [0,1]$.

Конструкція термів тотожна до x , але з дещо ширшими «плечами», щоб відобразити інерційність мережевих ефектів

$$\alpha_v = 0,00; \beta_v = 0,35; m_v = 0,50; w_v = 0,25; \gamma_v = 0,65; \delta_v = 1,00.$$

Індекс пріоритету громадського транспорту $\eta \in [0,1]$.

Підвищена чутливість до середніх значень досягається вужчим «дзвоном» для Medium і раннім зростанням High

$$\mu_{Low}^{(\eta)}: \alpha_\eta = 0,00; \beta_\eta = 0,25; \mu_{Med}^{(\eta)}: m_\eta = 0,45; w_\eta = 0,18; \mu_{High}^{(\eta)}: \gamma_\eta = 0,55; \delta_\eta = 0,85.$$

Ті самі формули, що й для x , застосовуються із зазначеними параметрами $(\alpha_\eta, \beta_\eta, m_\eta, w_\eta, \gamma_\eta, \delta_\eta)$.

Вихідна змінна $u \in [0, \Delta\max]$.

Для зручності дефазифікації через центр тяжіння вводяться три терми: Short, Normal, Long, — з трикутними ядрами на нормованому інтервалі $z = u/\Delta\max \in [0,1]$.

$$\mu_{Short}(z) = \begin{cases} \frac{\beta_u - z}{\beta_u - \alpha_u}, & \alpha_u \leq z < \beta_u, \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{Long}(z) = \begin{cases} \frac{z - \gamma_u}{\delta_u - \gamma_u}, & \gamma_u \leq z < \delta_u, \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{Normal}(z) = \begin{cases} \frac{z - \alpha'_u}{\beta'_u - \alpha'_u}, & \alpha'_u \leq z < \beta'_u, \\ \frac{\gamma'_u - z}{\gamma'_u - \beta'_u}, & \beta'_u \leq z < \gamma'_u, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (11)$$

Параметри пропонується взяти як $\alpha_u = 0,00$; $\beta_u = 0,25$; $\alpha_{u'} = 0,20$; $\beta_{u'} = 0,50$; $\gamma_{u'} = 0,80$; $\gamma_u = 0,60$; $\delta_u = 1,00$. Значення $\Delta_{\max}$ задається конфігураційно (практично $\Delta_{\max} \in [15, 30]$ с для одиничної фази).

Нормований результат z^* обчислюється методом центру ваги

$$z^* = \frac{\left(\int_0^1 z \cdot \mu_U(z) dz \right)}{\left(\int_0^1 \mu_U(z) dz \right)}; \quad (12)$$

$$u^* = \Delta_{\max} \cdot z^*, \quad (13)$$

де $\mu_U(z)$ — агрегована вихідна функція належності після композиції правил.

На основі цих множин формулюються нечіткі правила:

— IF $y_i(t)$ is High THEN $u_i(t) = u_{\text{long}}$;

— IF $y_i(t)$ is Medium THEN $u_i(t) = u_{\text{medium}}$;

— IF $y_i(t)$ is Low THEN $u_i(t) = u_{\text{short}}$.

Особливість моделі в тому, що навіть у разі середнього навантаження, але з високим значенням $\eta_i(t)$ система може збільшити тривалість зеленої фази для ГТ. Таким чином забезпечується адаптація не лише до трафіку, але й до динаміки розкладу.

Система формує агреговану вихідну функцію належності $\mu_U(z)$ на основі правил. Інтенсивність правила r визначається як

$$\lambda_r = \min\left(\mu_{\{A_r\}}^{(x)}(x), \mu_{\{B_r\}}^{(v)}(v), \mu_{\{C_r\}}^{(\eta)}(\eta)\right). \quad (14)$$

Наслідок правила «підрізається» як

$$\mu_U(z) = \min(\lambda_r, \mu_U(z)). \quad (15)$$

Агрегування наслідків відбувається за максимумом

$$\mu_U(z) = \max_{\{r\}} \mu_U(z). \quad (16)$$

Отримана $\mu_U(z)$ підставляється у формулу методу центра мас.

$$z^* = \left\{ \int_0^1 z \cdot \mu_U(z) dz \right\} / \left\{ \int_0^1 \mu_U(z) dz \right\}, u^* = \Delta_{\{\max\}, z}^*. \quad (17)$$

Після визначення всіх μ -функцій система застосовує дефазифікацію (використовується стандартний метод центра мас; базові оператори — як у класичному нечіткому виведенні).

$$u_i(t) = \frac{\sum_{k \in \{\text{Low}, \text{Medium}, \text{High}\}} \mu_k(y_i(t)) \cdot u_k}{\sum_{k \in \{\text{Low}, \text{Medium}, \text{High}\}} \mu_k(y_i(t))}. \quad (18)$$

Архітектура реалізації

Система реалізована у середовищі MATLAB Fuzzy Logic Toolbov. Також можливе впровадження в Python з використанням бібліотеки *scikit-fuzzy*. Архітектура включає:

- фазифікатор — перетворює $x_i(t)$, $\eta_i(t)$ на лінгвістичні змінні;
- базу правил — нечіткі правила типу «Якщо–То»;
- дефазифікатор — обчислює $u_i(t)$ для подовження або скорочення фази.

Блок-схема включає сенсори (для зчитування кількості ТЗ), GPS або AVL-дані (для фіксації запізень), обробку даних, застосування правил і передавання керувальної дії до контролера.

Сценарії моделювання

Для перевірки ефективності запропонованої системи змодельовано кілька сценаріїв:

1. Базовий — низька інтенсивність, відсутній ГТ.
2. Пікове навантаження — високі $x_i(t)$, без громадського транспорту.
3. Запізнення громадського транспорту — високий $\eta_i(t)$, помірне $x_i(t)$.
4. Конфлікт — високі $x_i(t)$ та $\eta_i(t)$ одночасно.
5. Без адаптації — фіксоване керування світлофора.

Для кожного сценарію оцінювались:

- середній час очікування;
- кількість фаз;
- середнє запізнення громадського транспорту.

Структура програмної реалізації

Розроблена система реалізована у вигляді модуля нечіткого керування світлофорним об'єктом з урахуванням показника пріоритету громадського транспорту. Архітектура базується на чотирьох ключових блоках:

1. Вхідний шар — збирає значення завантаженості перехрестя $x_i(t)$, індексу пріоритету $\eta_i(t)$ та навантаження сусідів. Вхідні дані надходять від індукційних детекторів та модулів GPS-моніторингу.

2. Фазифікатор — перетворює числові значення у нечіткі лінгвістичні змінні: *Low*, *Medium*, *High*. Для $x_i(t)$ і $\eta_i(t)$ використано тригонометричні функції належності з перекриттям 20...30 % для плавного переходу між станами.

3. База правил — реалізує 9 базових правил, сформованих комбінаціями рівнів навантаження та пріоритету. Наприклад, IF (v is Medium) AND (η is High) THEN (u = Long).

4. Дефазифікатор — застосовує центр мас для обчислення тривалості зеленої фази $u_i(t)$ у секундах.

Модуль підключається до симуляційного середовища та може бути розгорнутий у реальному часі через зовнішній API. Для експериментів використовувалось середовище MATLAB, що дозволяє реалізувати нечіткі системи безпосередньо через FIS-структури.

Результати сценаріїв з різним навантаженням

Сценарій	Середній час очікування, с	Середнє запізнення ГТ, с	Кількість фаз за 1 год
Базовий	22,1	—	120
Навантаження у годину пік	48,7	—	140
Громадський транспорт із запізненням	35,6	15,8	150
Конфлікт інтересів	51,3	19,2	180
Відсутність адаптації	63,8	34,5	160

Інтерпретація результатів

У першому сценарії система поводить себе подібно до класичного адаптивного контролера. У другому — демонструє збільшення фази для розвантаження. У третьому — активує механізм пріоритету: система подовжує зелений для ГТ, зменшуючи запізнення до 15,8 секунд за незначно-

го зростання середнього очікування.

Найбільший ефект зафіксовано у порівнянні з неадаптивною моделлю. Запізнення ГТ зменшилось на 50 %, середній час очікування — на 12,5 секунд. Система виявилась здатною зберігати стабільність: кількість фаз зростає помірно, без надлишкових перемикачів.

Обговорення

Децентралізований характер моделі, у якій кожне перехрестя функціонує як незалежний агент, забезпечує значно меншу затримку реакції порівняно з централізованими підходами. Кожний агент ухвалює рішення на основі власного стану та інформації від суміжних вузлів, що дозволяє створити локально узгоджену мережу регулювання. За необхідності така структура може масштабуватись до мережевого рівня, формуючи маршрутну систему підтримки пріоритету для громадського транспорту. Це особливо важливо для тролейбусних або трамвайних маршрутів з кількома критичними перехрестями.

У центрі логіки пріоритетного регулювання — індекс $\eta_i(t)$, який враховує як ступінь запізнення, так і вагу транспортного засобу. Завдяки цьому трамвай з великим пасажиропотоком отримує перевагу перед маршрутним мікроавтобусом, навіть якщо обидва транспортні засоби спізнюються. Такий підхід відповідає принципу соціальної справедливості в транспортному плануванні, надаючи пріоритет не окремим одиницям, а потокам пасажирів.

Порівняння з іншими підходами

Порівняння з альтернативними підходами підтверджує практичність запропонованої моделі. Так, модель IntelliLight, запропонована Х. Веєм, Г. Чженом та ін., базується на навчанні з підкріпленням і демонструє хорошу ефективність, проте вимагає тривалого періоду тренування та складної процедури початкового налаштування [8]. Натомість розроблений нечіткий регулятор готовий до використання одразу після визначення правил керування.

Робота С. Арагі, А. Хосраві та Д. Крейтона висвітлює переваги контролерів другого типу нечіткої логіки, зокрема в умовах високого рівня шумів [2]. Проте такі системи є суттєво складнішими у реалізації. У запропонованій моделі використано нечітку логіку першого типу, яка забезпечує достатній рівень адаптивності за мінімізації обчислювальних витрат, що дозволяє інтегрувати її у типові програмні забезпечення світлофорного контролера.

Ще одним прикладом альтернативного підходу є модель С. Лю та колег, в якій використано GPS-дані для визначення точного положення транспортних засобів [4]. Такий метод вимагає високої точності синхронізації даних і складної інфраструктури. У розробленій системі достатньо отримати лише інтервал відхилення від розкладу, що значно знижує вимоги до апаратного забезпечення та дозволяє впроваджувати систему в містах з обмеженими ресурсами.

Базові складники системи — використання мін- t -норми для злиття передумов, «підрізання» наслідків правил та дефазифікація методом центра мас — належать до усталених рішень у нечіткому керуванні і вважаються загальновідомими. Відмінність запропонованої схеми полягає у специфікації функцій належності для η і v , у виборі асиметричних вихідних термів та у зафіксованій процедурі агрегування з явним визначенням $\mu_U(z)$. Такі уточнення забезпечують керовану чутливість до громадського транспорту та знижують імовірність «фліп-флоп» між Short/Long за близьких до порогів значень.

Висновки

Запропоновано адаптивну систему керування світлофорами на основі нечіткої логіки, що враховує запізнення громадського транспорту через спеціально розроблений індекс пріоритету. Система:

- дозволяє динамічно змінювати тривалість зеленої фази;
- реагує на змінне навантаження та відхилення від розкладу;
- мінімізує затримки для ГТ без шкоди для загального трафіку.

Запропонована параметризація термів η і v разом із асиметричними вихідними термами та явною побудовою $\mu_U(z)$ перед дефазифікацією формує відтворювану конфігурацію FIS, що підвищує чутливість до пріоритету громадського транспорту без втрати стабільності перемикачів.

У критичних сценаріях модель зберігала стабільність. Розрахунок проводився для випадків за-

пізнення транспорту та одночасного підвищення навантаження. У цих умовах система продовжувала реагувати послідовно. В середньому час затримки для автобусів і трамваїв зменшувався на 12...18 %. Більше того, знижувався загальний час очікування на перехрестях. Регулятор розподіляв фази без створення додаткових заторів. Вплив нечіткої логіки проявився у здатності реагувати не на одне значення, а на сукупність змін. Усі рішення враховували щільність потоку, рівень запізнення, тип транспортного засобу.

Перспективи розвитку

Подальше вдосконалення моделі передбачає кілька кроків. Один з них — перехід до мережевої взаємодії між перехрестями. У цьому випадку підтримка пріоритету може охоплювати цілий маршрут, а не лише одну точку. Ще один напрям — залучення зв'язку між інфраструктурою і транспортом. Дані з борту автобуса можуть передаватись безпосередньо. Це спростить прийняття рішень і скоротить затримку. Також потрібне випробування у великих симуляційних середовищах, таких як SUMO або AIMSUN. У них можна перевірити систему в умовах повного міста.

Окрема увага — до врахування інших учасників руху. Сюди входять пішоходи, велосипедисти, пасажери з обмеженою мобільністю. Для цього знадобиться адаптація структури правил. Останній напрям — поєднання нечіткої логіки з самонавчальними моделями. До прикладу, ANFIS дає змогу системі поступово змінювати поведінку. Це підвищить її чутливість до змін середовища і структури потоків.

Отже, запропоноване рішення дає змогу впроваджувати гнучке керування світлофорами. Система не потребує складної централізації, але здатна враховувати і соціальні, і технічні чинники. Таке поєднання дозволяє наблизитись до моделі транспорту, що реагує не на жорсткі правила, а на реальний стан вулиць.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Koukol, I. L. Zajíčková, L. Marek, and P. Tuček, "Fuzzy logic in traffic engineering: A review on signal control," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 493-501, 2015. <https://doi.org/10.15598/aeec.v13i5.1457>.
- [2] S. Araghi, A. Khosravi, and D. Creighton, "A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 1538-1550, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.010>.
- [3] N. B. T. Nguyen, T. M. Hoang, and D. Q. Pham, "Intelligent traffic signal control using deep reinforcement learning with fuzzy logic integration," *Procedia Computer Science*, vol. 218, pp. 1545-1552, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.320>.
- [4] N. Liu, Y. Chen, and Z. Li, "Adaptive traffic signal control using fuzzy logic and V2I communication," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 3457-3469, 2022. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3102950>.
- [5] Y. Zhang, D. Liu, and N. Wang, "Multi-agent traffic signal control based on fuzzy logic and reinforcement learning," *Sensors*, vol. 20, no. 8, article 2233, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20082233>.
- [6] Yu. M. Shmelov, "Zastosuvannia intelektualnykh system na transporti," (*Application of intelligent systems in transport*), *Transportni systemy i tekhnologii perevezhen*, no. 30, pp. 112-117, 2017.
- [7] V. V. Tatarinov, *Suchasni intelektualni tekhnologii v systemakh upravlinnia (Modern Intelligent Technologies in Control Systems)*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2013.
- [8] H. Wei, G. Zheng, H. Yao, and Z. Li, "IntelliLight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control," in *Proc. 24th ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2018, pp. 2496-2505. <https://doi.org/10.1145/3219819.3220104>.

Рекомендована кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.09.2025

Гандрибіда Владислав Олександрович — аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com ;

Севаст'янов Володимир Миколайович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: sevastyanov.vladimir@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. O. Gandrybida¹
V. M. Sevastyanov¹

Adaptive Traffic Light Control Based on Fuzzy Logic with Consideration of Public Transport Priority

¹Vinnytsia National Technical University

Adaptive traffic light control taking into account the priority of public transport requires a combination of technological flexibility and social sensitivity. The article analyzes the possibilities of using fuzzy logic as a basis for constructing regulators capable of responding to traffic changes without rigid boundaries and fixed rules. Control using fuzzy rules enables to take into account transport delays, flow density, passenger capacity, and also minimize delays without disturbing the overall balance. Special attention is paid to the multi-agent approach, in which each intersection acts as an independent control unit capable of making decisions, based on local data and interaction with neighboring nodes. Such an architecture allows creating the adaptive control network where the priority for public transport is provided not episodically, but systematically — along the entire route. The article considers hybrid models where fuzzy logic is combined with elements of reinforcement learning and infrastructure communication (V2I). The effectiveness of the approach in reducing the delay time for transport by 12...18 % compared to non-adaptive methods is demonstrated. The formula for the priority index is described, enabling to integrate the factors of delay and vehicle weight. The comparison is made with other models, in particular of type 2 and learning based on GPS data. The conclusion is made about the suitability of the proposed approach for the implementation both at individual intersections and city-wide. In future, simulation testing, scaling to a multi-agent architecture and integration with barrier-free requirements and neural networks are considered. The proposed model not only improves transport efficiency, but also contributes to the formation of a socially-oriented infrastructure sensitive, to the needs of passengers.

Keywords: fuzzy logic, traffic light control, public transport priority, multi-agent system, adaptive controller, priority index, V2I communication.

Gandrybida Vladyslav O. — Post-Graduate Student of the Chair of Automation and Intelligent Information Technologies, e-mail: vlad.gandrybida@gmail.com ;

Sevastyanov Volodymyr M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automation and Intelligent Information Technologies, e-mail: sevastyanov.vladimir@vntu.edu.ua