

УДК 004.932

АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ

І. Оленич

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна
iolenych@gmail.com*

Запропоновано адаптивну систему керування транспортним потоком на основі контролера нечіткої логіки. Завдяки відображенню вхідних даних за допомогою лінгвістичної змінної і закладених у базі нечітких продукційних правил для поточних значень завантаженості перехрестя визначено оптимальні параметри світлофорного циклу. Застосування апарату нечіткої логіки дає змогу врахувати динаміку транспортних потоків і підвищити ефективність функціонування регульованого перехрестя.

Ключові слова: адаптивна система керування, транспортний потік, контролер нечіткої логіки, продукційні правила.

Моніторинг і контроль дорожнього руху є однією з найважливіших складових життя міста. Унаслідок щораз більшої кількості транспортних засобів на вулично-дорожній мережі великих міст ефективне керування інтенсивним транспортним потоком стає серйозною проблемою в багатьох країнах. Утворення заторів призводить до зниження інтенсивності дорожнього руху, додаткових витрат часу, збільшення вартості поїздки та негативного впливу на екологію. Зазвичай, ефективність транспортної інфраструктури залежить від двох основних параметрів: пропускної спроможності дороги, яка визначена кількістю смуг для руху, якістю дорожнього покриття, наявністю різких поворотів тощо, та ефективності проїзду перехресть.

Основним об'єктом для керування дорожнім рухом є перехрестя. Оптимізація систем керування транспортними потоками на регульованому перехресті полягає в налаштуванні параметрів роботи світлофорної сигналізації з урахуванням інтенсивності руху автотранспортних засобів. Інтенсивність та пріоритетний напрям руху автомобілів можуть суттєво змінюватися впродовж доби і залежно від дня тижня. Оскільки транспортні потоки в містах є нестационарними, то необхідно адаптувати світлофорне керування перехрестям до параметрів потоків завдяки використанню автоматизованих систем керування.

У більшості випадків регулювання перехресть виконується за допомогою дорожніх контролерів, які перемикають сигнали світлофорів за заданою програмою, причому вибір програм координації відбувається за запитом оператора автоматизованої системи керування або автоматично залежно від часу доби [1–3]. В окремих випадках використовують диспетчерське керування режимами роботи світлофорів. У цьому разі об'єктом

керування є тривалість дозвільних сигналів світлофорів для кожного напрямку транспортного потоку. Недолік таких систем керування полягає в тому що немає засобів, які дають змогу вносити корективи в програми в режимі реального часу. Ефективність проїзду перехрестя можна підвищити за допомогою адаптивних систем керування і алгоритмів, які керують тривалістю фаз робочого циклу світлофорів залежно від інтенсивності руху транспортних засобів на під'їздах до перехрестя для кожного напрямку руху. В адаптивних системах керування дорожнім рухом використовують різні підходи й алгоритми, які оптимізують цикл світлофорного регулювання для зменшення затримок на перехрестях, зокрема, методи імітаційного моделювання та нечіткої логіки [2,4]. Вибір алгоритму залежить від конкретних умов дорожнього руху.

Останнім часом посилюється науковий інтерес до методів нечіткого логічного висновку для підвищення ефективності регулювання транспортних потоків [4–6]. Нечітка логіка формалізує здатність людини до наближених міркувань і допускає відмінні від бінарного значення істинності нечітких висловлювань. Нечітке моделювання є класичною технологією штучного інтелекту, яку успішно застосовують у багатьох системах керування промисловими та побутовими пристроями, де традиційні методи моделювання та контролери, зазвичай, не забезпечують необхідного рівня ефективності чи продуктивності. Зокрема, нечіткі контролери застосовують у робототехніці, авіації, автомобілебудуванні, системах клімат-контролю та системах керування освітленням [7–9]. Використання лінгвістичних змінних в описі складних процесів, а також можливість виконувати формальний опис нечітких правил робить нечіткі алгоритми керування технічними системами порівняно простими в розробленні та тестуванні. Тому наша мета полягала в модифікації системи керування транспортними потоками на основі нечіткого логічного висновку для підвищення пропускної спроможності перехрестя.

Розглянемо модель транспортного перехрестя, регульованого за допомогою світлофора (рис. 1), причому світлофор А працює синхронно з В, а світлофор С – синхронно з D. Стан дорожнього руху характеризують динамічні параметри транспортного потоку, оптимізація яких полягає в розрахунку і реалізації програм керування за допомогою засобів нечіткої логіки.

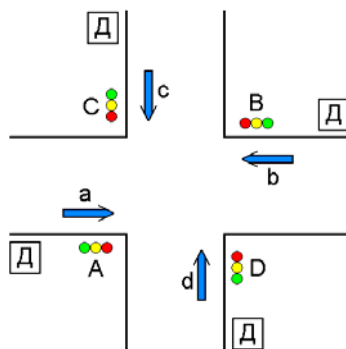


Рис. 1. Модель транспортного перехрестя.

Завантаженість перехрестя залежить від співвідношення фактичної інтенсивності руху автомобілів на підходах до перехрестя, яку визначають на підставі даних транспортних датчиків Д (див. рис. 1), і максимально можливої пропускної здатності перехрестя.

Зазначимо, що інтенсивність руху та, у багатьох випадках, пропускну здатність перехрестя потрібно розглядати окремо для кожного напрямку руху. Однак, на відміну від інтенсивності транспортного потоку λ , пропускну здатність μ є сталою в часі. Відповідно до моделі автомобільний рух у кожному з a, b, c і d напрямів має інтенсивність потоку

$$\begin{aligned}\lambda_a &= \frac{N_a}{t}; \\ \lambda_b &= \frac{N_b}{t}; \\ \lambda_c &= \frac{N_c}{t}; \\ \lambda_d &= \frac{N_d}{t},\end{aligned}\tag{1}$$

де N_a, N_b, N_c, N_d – кількість транспортних засобів, які рухаються в напрямках a, b, c і d , відповідно; t – тривалість повного циклу роботи світлофора $t = t^G + t^R + t^Y$, який складається з тривалості кожної фази циклу – зеленого t^G , червоного t^R і жовтого t^Y світла. З урахуванням синхронної роботи світлофорів А і В, а також С і D можна записати

$$t = t_{ab}^G + t_{ab}^R + t^Y = t_{cd}^R + t_{cd}^G + t^Y = t_{ab}^G + t_{cd}^G + t^Y.\tag{2}$$

У такому випадку збільшення тривалості дозвільного сигналу t_{ab}^G світлофорів А і В на інтервал часу Δt зумовлює зменшення на такий же інтервал часу дозвільного сигналу t_{cd}^G світлофорів С і D.

Ефективність роботи світлофора в разі регулювання транспортних потоків на дорожньому перехресті визначена часом затримки автотранспорту, який пропорційний до кількості автомобілів у черзі на проїзд перехрестям. Довжина черги в кожному напрямі руху, тобто кількість транспортних засобів, які очікують на проїзд перехрестям наприкінці i -го циклу роботи світлофора $Q^{(i)}$ визначена тривалістю дозвільного сигналу $t^{G(i)}$ та інтенсивністю транспортного потоку в цьому ж напрямі та циклі, а також довжиною черги наприкінці попереднього циклу $Q^{(i-1)}$:

$$\begin{aligned}Q_a^{(i)} &= \max\left\{\left(Q_a^{(i-1)} + \lambda_a^{(i)} t - \mu_a t_{ab}^{G(i)}\right), 0\right\}; \\ Q_b^{(i)} &= \max\left\{\left(Q_b^{(i-1)} + \lambda_b^{(i)} t - \mu_b t_{ab}^{G(i)}\right), 0\right\}; \\ Q_c^{(i)} &= \max\left\{\left(Q_c^{(i-1)} + \lambda_c^{(i)} t - \mu_c t_{cd}^{G(i)}\right), 0\right\}; \\ Q_d^{(i)} &= \max\left\{\left(Q_d^{(i-1)} + \lambda_d^{(i)} t - \mu_d t_{cd}^{G(i)}\right), 0\right\}.\end{aligned}\tag{3}$$

Отже, тривалість дозвільного сигналу в наступному $i + 1$ циклі буде функцією довжини черги, інтенсивності транспортних потоків і тривалості дозвільного сигналу в i -му циклі роботи світлофора. Контролер нечіткої логіки застосовують саме для визначення тривалості сигналів зеленого t^G та червоного t^R світла в кожному циклі. Вираз (3) також враховує випадок, коли пропускну здатність перехрестя переважає інтенсивність транспортного потоку. Оскільки, згідно з запропонованою моделлю, світлофори на зустріч-

них напрямках руху автотранспорту (ab чи cd) працюють синхронно, то для подальших розрахунків можна скористатись виразами

$$\begin{aligned} Q_{ab}^{(i)} &= \max \{ Q_a^{(i)}, Q_b^{(i)} \}; \\ Q_{cd}^{(i)} &= \max \{ Q_c^{(i)}, Q_d^{(i)} \}, \end{aligned} \quad (4)$$

а для визначення тривалості дозвільних сигналів світлофорів у наступному $i + 1$ циклі порівнювати кількість автомобілів у черзі у взаємно перпендикулярних напрямках:

$$\Delta Q^{(i)} = Q_{ab}^{(i)} - Q_{cd}^{(i)}. \quad (5)$$

Як наслідок, для реалізації адаптивної системи керування транспортним потоком використовували контролер нечіткої логіки з одним входом і одним виходом, у якому вхідною змінною слугувала різниця ΔQ , а вихідною – зміна тривалості дозвільного сигналу світлофора Δt . Зазначимо, що у випадку низької інтенсивності транспортних потоків, коли

$$Q_{ab}^{(i)} = Q_{cd}^{(i)} = 0, \quad (6)$$

для визначення вхідної змінної контролера нечіткої логіки можна використати порівняння інтенсивності транспортних потоків у взаємно перпендикулярних напрямках:

$$\begin{aligned} \lambda_{ab}^{(i)} &= \max \{ \lambda_a^{(i)}, \lambda_b^{(i)} \}; \\ \lambda_{cd}^{(i)} &= \max \{ \lambda_c^{(i)}, \lambda_d^{(i)} \}, \end{aligned} \quad (7)$$

або задати однакову тривалість дозвільних сигналів $t_{ab}^{G(i+1)} = t_{cd}^{G(i+1)}$.

Архітектура контролера нечіткої логіки, який використовують у системі керування транспортними потоками, складається з давачів вхідної інформації (детекторів транспорту), блоку фазифікації, бази нечітких продукційних правил і блоку дефазифікації, який формує вихідний сигнал для керування сигналом світлофора (рис. 2).



Рис. 2. Схема системи керування транспортним потоком на основі контролера нечіткої логіки.

Для реалізації адаптивної системи керування перехрестям застосовували алгоритм нечіткого логічного висновку, розроблений Мамдані (Mamdani) [10]. У випадку запро-

понованої моделі алгоритм передбачає формування бази нечітких продукційних правил $R^{(k)}$ у вигляді ЯКЦО (умова) – ТО (дія), фазифікацію вхідних значень ΔQ , активізацію висновків на основі знайдених значень істинності кожної з умов нечітких продукційних правил і процес дефазифікації, який формує значення тривалості кожної з фаз робочого циклу світлофорів.

Використання вхідної лінгвістичної змінної “завантаженість перехрестя” = {“значно переважає транспортний потік ab ” ($Q_{ab} \gg Q_{cd}$), “переважає транспортний потік ab ” ($Q_{ab} > Q_{cd}$), “транспортні потоки однакові” ($Q_{ab} \approx Q_{cd}$), “переважає транспортний потік cd ” ($Q_{ab} < Q_{cd}$), “значно переважає транспортний потік cd ” ($Q_{ab} \ll Q_{cd}$)} і вихідної лінгвістичної змінної “зміна тривалості дозвільного сигналу світлофора” = {“значно зменшити t_{ab}^G ”, “зменшити t_{ab}^G ”, “залишити незмінним t_{ab}^G ”, “збільшити t_{ab}^G ”, “значно збільшити t_{ab}^G ”} забезпечує можливість регулювання тривалості сигналів світлофора у реальному режимі часу. Функції належності нечітких множин, які характеризують терми вхідної змінної “завантаженість перехрестя” і вихідної змінної “зміна тривалості дозвільного сигналу світлофора” задані кусково-лінійними або сплайн-функціями, як це показано на рис. 3.

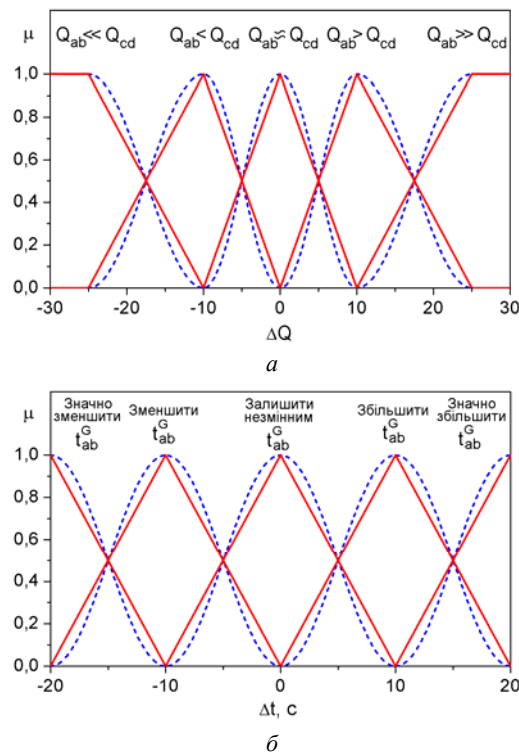


Рис. 3. Функції належності нечітких множин, які характеризують вхідну змінну “завантаженість перехрестя” (а) і вихідну змінну “зміна тривалості дозвільного сигналу світлофора” (б).

Визначення вихідної лінгвістичної змінної на множині $[-20, 20]$ зумовлене повною тривалістю циклу роботи світлофора, а також мінімально та максимально можливою тривалістю дозвільного сигналу і дає змогу регулювати його тривалість у межах ± 20 с від середнього значення.

Механізм отримання нечітких логічних висновків ґрунтується на інформації різного походження, зокрема, експериментальних даних, результатах імітаційного моделювання та висновках експертів, яку подають у вигляді нечітких продукційних правил $R^{(k)}$:

- $R^{(1)}$: IF ΔQ is " $Q_{ab} \gg Q_{cd}$ " THEN Δt is "значно збільшити t_{ab}^G ";
 $R^{(2)}$: IF ΔQ is " $Q_{ab} > Q_{cd}$ " THEN Δt is "збільшити t_{ab}^G ";
 $R^{(3)}$: IF ΔQ is " $Q_{ab} \approx Q_{cd}$ " THEN Δt is "залишити незмінним t_{ab}^G ";
 $R^{(4)}$: IF ΔQ is " $Q_{ab} < Q_{cd}$ " THEN Δt is "зменшити t_{ab}^G ";
 $R^{(5)}$: IF ΔQ is " $Q_{ab} \ll Q_{cd}$ " THEN Δt is "значно зменшити t_{ab}^G ".

Істинність висновків кожного з продукційних правил визначено за допомогою процедури *min*-активізації висновків [11]. Причому враховано тільки активні правила нечітких продукцій, тобто ступінь істинності умов яких відмінний від нуля. Висновки продукційних правил акумулювали *max*-об'єднанням нечітких множин, які відповідають термам отриманих висновків для вихідної змінної. Дефазифікацію вихідної змінної виконували методом центру ваги [12].

Результати тестування автоматизованої системи керування дорожнього руху на перехресті на основі нечіткого логічного висновку наведені в таблиці.

Параметри світлофорного циклу, отримані за допомогою контролера нечіткої логіки

Завантаженість перехрестя (ΔQ)	Кусково-лінійні функції належності нечітких множин		Сплайн-функції належності нечітких множин	
	t_{ab}^G , с	t_{cd}^G , с	t_{ab}^G , с	t_{cd}^G , с
-22	16,5	43,5	14,8	45,2
-17	19,0	41,0	18,7	41,3
-8	22,4	37,6	21,3	38,7
0	30,0	30,0	30,0	30,0
3	33,3	26,7	32,4	27,6
13	40,2	19,8	40,1	19,9
20	42,2	17,8	43,3	16,7
25	46,7	13,3	47,0	13,0

Розрахунки засвідчують, що контролер нечіткої логіки забезпечує збільшення на Δt тривалості дозвільного сигналу світлофора t_{ab}^G і зменшення на стільки ж сигналу t_{cd}^G у випадку, коли довжина черги (або інтенсивність транспортного потоку) в напрямі *ab* переважає аналогічні параметри в напрямі *cd*. І навпаки, більша завантаженість перехрестя у напрямі *cd* зумовлює збільшення тривалості сигналу t_{cd}^G і зменшення t_{ab}^G . Вихідний сигнал керування Δt на підставі інформації від транспортних детекторів у поточному циклі визначає тривалість світлофорних сигналів наступного циклу.

$$\begin{aligned}t_{ab}^{G(i+1)} &= t_{ab}^{G(i)} \pm \Delta t; \\t_{cd}^{G(i+1)} &= t_{cd}^{G(i)} \mp \Delta t.\end{aligned}\tag{8}$$

Зазначимо, що простежуються близькі значення вихідного сигналу керування в разі використання кусково-лінійних або сплайн-функцій для визначення функцій належності нечітких множин, які характеризують лінгвістичні змінні контролера нечіткої логіки.

Отже, розглянутий спосіб регулювання транспортного перехрестя за допомогою дорожніх контролерів на основі нечіткого логічного висновку дає змогу отримати для поточних значень завантаженості перехрестя кількісні значення тривалості сигналів світлофора в наступному циклі його роботи. Запропонований алгоритм не потребує складних обчислень. Це зумовлює спрощення процесу керування транспортним потоком у режимі реального часу і підвищення ефективності проїзду перехрестя.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Капитанов В. Т.* Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е. Б. Хилажев. – М. : Транспорт, 1985. – 94 с.
2. *Буслаев А. П.* Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автотранспортного движения / А. П. Буслаев, А. В. Новиков, В. М. Приходько [и др.] ; под ред. В. М. Приходько. – М. : Мир, 2003. – 368 с.
3. *Могила І. А.* Адаптивний алгоритм керування рухом на регульованому Т-подібному перехресті та його ефективність / І. А. Могила, М. А. Дяк, І. Є. Шварик // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2013. – № 1. – С. 61–68.
4. *Niittymaki J.* Traffic signal control on similarity logic reasoning / J. Niittymaki, E. Turunen // Fuzzy Sets and Systems. – 2003. – Vol. 133. – P. 109–131.
5. *Kaedi M.* Traffic signal timing using two-dimensional correlation, neuro-fuzzy and queuing based neural networks / M. Kaedi, N. Movahhedinia, K. Jamshidi // Neural Computing and Applications. – 2008. – Vol. 17, N 2. – P. 193–200.
6. *Молодецька К. В.* Модель підсистеми підтримки прийняття рішень з управління рухом транспорту на регульованих перехрестях на базі апарату нечіткої логіки / К. В. Молодецька, І. І. Сугоняк, М. М. Шевчук // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – № 2(34). – С. 128–131.
7. *Kumar V.* Fuzzy logic controller based operating room air condition control system / V. Kumar, S. Kumar, H. Kansal // International J. of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering. – 2014. – Vol. 2. – P. 510–514.
8. *Panjaitan S. D.* A lighting control system in buildings based on fuzzy logic / S. D. Panjaitan, A. Hartoyo // Telkomnika. – 2011. – Vol. 9. – P. 423–432.
9. *Sobhy S. M.* Developing of fuzzy logic controller for air condition system / S. M. Sobhy, W. M. Khedr // International J. of Computer Applications. – 2015. – Vol. 126. – P. 1–8.
10. *Mamdani E. H.* Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1974. – Vol. 121. – P. 1585–1588.
11. *Besedin P. V.* Fuzzy inference technique in the task of sludge batching management / P. V. Besedin, S. V. Andrushhak, V. K. Kozlov // International J. of Soft Computing. – 2015. – Vol. 10. – P. 415–419.

12. *Bai Y.* Fundamentals of fuzzy logic control – fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications. Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications / Y. Bai, D. Wang. – Springer, 2006.

Стаття: надійшла до редакції 10.03.2017,
доопрацьована 17.03.2017,
прийнята до друку 22.03.2017.

ADAPTIVE TRAFFIC CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY INFERENCE

I. Olenych

*Ivan Franko National University of Lviv,
50 Drahomanov St., UA–79005 Lviv, Ukraine
iolenych@gmail.com*

Efficiency of transport systems in large cities is to a large extent dependent on the efficient crossroad traffic management. Intellectual traffic lights control systems are in focus of great interest these days as they can manage intensive traffic in the real-time. In this paper the adaptive traffic control system on fuzzy logic controller is proposed. The traffic controller based on fuzzy inference forms the set of fuzzy production rules, fuzzification of input values, aggregation of truth sub conditions for each rule, activation of conclusions and defuzzification procedure that generates an output signal to control the traffic light. Optimal parameters of traffic lights cycle are determined using linguistic variable as an input data and applying fuzzy production rules for current crossroad traffic intensity stored in the database. Using fuzzy logic allows to take into account the dynamic of vehicles and to increase the efficiency of controlled crossroad operation.

Key words: adaptive control system, vehicle traffic, fuzzy logic controller, production rules.