

УДК 656.051, 004.023, 519.876.5

Є.Ю. Формальчик,

І.А. Могила

Національний університет «Львівська політехніка»

Вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

ihor.mohyla@gmail.com

ПРОБЛЕМА З ВИБОРОМ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ У НЕЧІТКИХ АЛГОРИТМАХ КЕРУВАННЯ РУХОМ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

Наведено аналіз нечітких алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях та теоретичних основ вибору та налаштування параметрів функцій належності у нечітких алгоритмах керування. Показано, що використання існуючих методів оптимізації є неможливим для алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях. За результатами моделювання роботи регульованого перехрестя з нечітким алгоритмом керування рухом встановлено, що параметри функцій належності істотно впливають на ефективність роботи перехрестя.

Ключові слова: регульоване перехрестя, імітаційне моделювання, нечіткий алгоритм керування рухом, параметри функцій належності

Вступ. У сучасних системах керування дорожнім рухом на регульованих перехрестях застосовують алгоритми з багатооб'єктними системами, клітинковими автоматами, нечіткою логікою, нейронними мережами та генетичними алгоритмами. При цьому актуальним завданням є не лише розроблення нових підходів до підвищення ефективності функціонування регульованих перехресть, але і вдосконалення існуючих. Найбільш поширеним з перелічених підходів є нечітка логіка, яка формалізує здатність людини до неточних чи наближених роздумів і дає змогу адекватно описувати та приймати рішення в ситуаціях з невизначеністю. При цьому прозорість та інтуїтивна природа бази правил і вхідних змінних у нечітких алгоритмах керування рухом роблять їх відносно простими у розробленні, тестуванні та модифікуванні (вдосконаленні).

Аналіз існуючих нечітких алгоритмів керування рухом. У 1977 р. Паппіс та Мамдані вперше запропонували використовувати нечітку логіку для керування рухом на перехрестях [1]. З того часу і до сьогодні розробляються різні варіанти систем керування рухом, які використовують для оптимізації керування нечітку логіку.

В загальному випадку структура нечіткої системи керування рухом на ізолюваному перехресті є типовою для адаптивних систем керування рухом (рисунок 1). На вхід нечіткої системи керування надходять дані з детекторів транспорту. На виході формується множина значень вихідних змінних (керуючі змінні), які подаються на контролер, в результаті чого змінюються тривалості горіння сигналів світлофора. Це в результаті впливає на покращення умов руху.

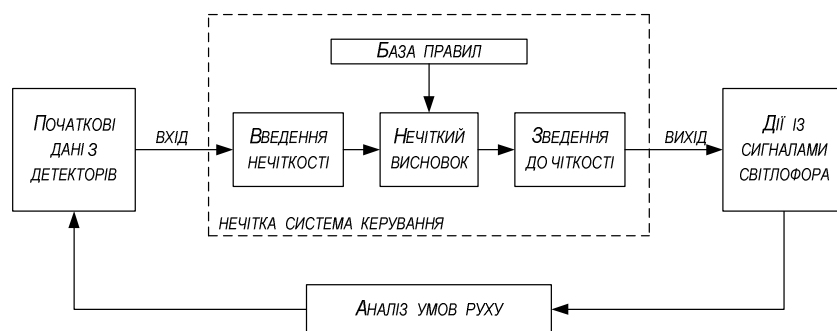


Рисунок 1 – Структура нечіткої системи керування рухом на ізолюваному перехресті

Основними вхідними параметрами нечітких систем керування рухом на регульованих перехрестях є:

- 1) інтенсивність прибуття автомобілів до перехрестя;
- 2) довжина черги перед перехрестям (середня і максимальна);
- 3) поточне значення тривалості дозвільного сигналу;
- 4) тривалість заборонного сигналу;
- 5) середній інтервал між автомобілями, що проїжджають на дозвільний сигнал;
- 6) швидкість руху на підходах до перехрестя.

Типові керуючі впливи:

- 7) встановлення тривалості дозвільного сигналу;
- 8) рішення про продовження або припинення горіння дозвільного сигналу;
- 9) рішення про величину продовження або скорочення дозвільного сигналу;
- 10) вибір наступної фази;
- 11) визначення умов руху на перехресті.

Застосування нечіткої логіки дає змогу покращити ефективність роботи регульованого перехрестя. При цьому дослідники використовують різні підходи до побудови нечіткої системи керування рухом, зокрема, різні вхідні параметри та керуючі впливи, різноманітні функції належності, розглядаються як уявні перехрестя, так і існуючі тощо. З наведеного видно, що постійно триває пошук такого нечіткого алгоритму керування, який забезпечуватиме ефективне функціонування перехрестя у конкретних умовах.

Функції належності та методи їх побудови. Нечітка логіка використовує поняття і означення теорії нечітких множин. Нечіткою множиною \tilde{A} на універсальній множині U називається сукупність пар $(\mu_A(u), u)$, де $\mu_A(u)$ – ступінь належності елемента $u \in U$ нечіткій множині \tilde{A} [2]. Ступінь належності – це число з діапазону $[0,1]$, причому чим більший ступінь належності, тим в більшій мірі елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої множини \tilde{A} .

Практичне використання теорії нечітких множин передбачає наявність функцій належності – функцій, які використовуються для визначення ступеня належності довільного елемента універсальної множини до нечіткої множини [2]. При цьому функціями належності описуються терми лінгвістичних змінних, такі як «коротка черга», «значна інтенсивність», «довгий сигнал» тощо, які використовуються для створення алгоритму керування рухом.

Для побудови функцій належності використовуються два методи. За прямого методу експерт задає для кожного u значення $\mu_A(u)$. Прямі методи задавання функцій належності використовуються, як правило, для таких понять як швидкість, час, відстань, тиск, температура тощо. Підвидом прямого методу є групові прямі методи, коли групі експертів задається питання з полярною відповіддю. Тоді кількість позитивних відповідей, поділена на кількість експертів, дає значення функції належності. Непрямі методи визначення функцій належності використовуються у разі, коли нема елементарних властивостей, які можна виміряти. Найбільш поширеним непрямым методом є метод попарного порівняння [2-3].

Функції належності задаються найчастіше у параметричній формі. В цьому разі задача побудови функцій належності зводиться до визначення її параметрів, якими є її форма та числові значення, які характеризують розташування нечіткої множини на універсальній множині. Найбільш поширеними є трикутна, трапецієподібна, гаусова, сигмоїдна та синглтонна функції належності, які характеризуються 2-4 числовими значеннями [2].

Аналіз методів навчання нечітких алгоритмів. Ідентифікування нелінійних залежностей – встановлення закономірностей між входами X та виходом y , є важливою задачею. Нехай існує певна нелінійна залежність $y = f(X)$, яка описується нечіткою базою знань Мамдані. Крім цього, є навчальна вибірка з M пар експериментальних даних (X_r, y_r) , де $X_r = (x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rm})$ – вхідний вектор в r -тій парі навчальної вибірки, y_r – відповідний вихід. Нехай P – вектор параметрів функцій належності термів вхідних та вихідних змінних, W – вектор вагових коефіцієнтів правил бази знань, $F(P, W, X_r)$ – результат виводу за нечіткою базою знань Мамдані з параметрами (P, W) за значення входів X_r . Навчання нечіткого алгоритму передбачає знаходження таких параметрів функцій належності, які мінімізують розбіжність між фактичними даними та результатами моделювання. Відповідно до методу найменших квадратів, налаштування нечіткої бази знань Мамдані зводиться до задачі математичного програмування [2]: знайти такий вектор (P, W) , щоб

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (y_r - F(P, W, X_r))^2} \rightarrow \min. \quad (1)$$

У цій задачі оптимізації на керовані змінні P накладають обмеження, які забезпечують лінійну впорядкованість елементів терм-множин. Такі обмеження не дають змоги алгоритмам оптимізації

зробити, наприклад, нечітку множину «короткий» більшою, ніж «довгий». При цьому забезпечується «прозорість» нечіткої бази знань після налаштування. Координати вектора W повинні бути в межах $[0, 1]$. Задачу (1) можна розв'язати різними алгоритмами оптимізації, проте найчастіше використовуються метод найшвидшого спуску, квазіньютонівські методи та генетичні алгоритми [2-4].

У разі, якщо певна залежність описується нечіткою базою знань Сугено, то її налаштування зводиться до задачі математичного програмування [2]: знайти такий вектор (P, B) , щоб

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (y_r - F(P, B, X_r))^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де B – вектор коефіцієнтів лінійних функцій у висновках правил бази знань Сугено.

На практиці задачу (2) розв'язують як стандартним алгоритмами оптимізації (наприклад, Левенберга-Марквардта), так і спеціально розробленими швидкими алгоритмами на основі фільтра Калмана і методу зворотного поширення похибки. Алгоритм на основі фільтра Калмана оптимізує лише лінійні параметри нечіткої бази знань – коефіцієнти у висновках правил, а ANFIS-алгоритм оптимізує як лінійні, так і нелінійні параметри [2].

З наведеного випливає, що існує можливість налаштування параметрів функцій належності нечіткого алгоритму керування, проте для цього потрібна навчальна вибірка, яка містить значення виходу для конкретних значень входу. Припустимо, що існує ідеальне регульоване перехрестя з таким адаптивним алгоритмом керування, що за будь-якої інтенсивності прибуття автомобілів до перехрестя встановлюється така тривалість дозвільних сигналів та циклу, що середні та загальні затримки головного або усіх потоків є найменшими. У такому разі, виміривши на цьому перехресті інтенсивність прибуття автомобілів до нього, довжини черг перед стоп-лініями тощо, можна сформулювати вхідний вектор X_r , а виміривши тривалості дозвільних сигналів (або циклу) – відповідні значення виходу y_r . Проте на реальному перехресті чітко встановити такий взаємозв'язок неможливо. Зокрема, якщо вхідними параметрами є інтенсивність прибуття автомобілів до перехрестя та довжина черги перед стоп-лінією, то важко ствердувати, що тривалість дозвільного сигналу для якого-небудь напрямку як вихідна змінна повинна мати певне значення. Критеріями ефективності роботи алгоритму є затримки в русі, довжини черг, швидкість та рівномірність руху тощо [5], а вони в свою чергу залежать і від тривалості дозвільного сигналу, і від поточної фази на перехресті. Тобто, для адаптивних алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях нема можливості провести навчання, оскільки неможливо отримати навчальну вибірку. Це вказує на те, що потрібно шукати інші способи налаштування параметрів функцій належності.

Аналіз відомих підходів з обґрунтування параметрів функцій належності. У більшості робіт з розроблення нечітких алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях параметри функцій належності обираються дослідником на основі власних припущень про поведінку нечіткої системи, що не суперечить теоретичним положенням нечітких множин та нечіткої логіки [6]. З іншого боку, параметри функцій належності, як і база правил, можуть бути некоректними, і дослідники не пропонують жодного способу їх коригування. Частина дослідників відповідним чином обґрунтовує параметри функцій належності вхідних та вихідних змінних нечіткого алгоритму керування рухом.

У роботі [7] запропоновано формувати функції належності деяких вхідних змінних (довжини черги та інтенсивності) на основі даних натурних спостережень. При цьому визначаються математичне сподівання μ та середньоквадратичне відхилення σ вимірної величини. Функції належності лінгвістичних змінних «довжина черги» та «інтенсивність» наведено на рисунку 2.

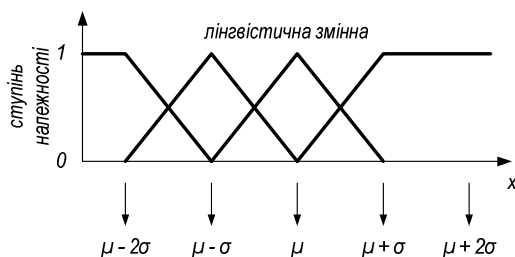


Рисунок 2 – Функції належності лінгвістичних змінних «довжина черги» та «інтенсивність»

У роботі [8] для вхідних змінних (кількості автомобілів на кожному напрямку та тривалості дозвільного сигналу) пропонуються терми «нуль», «мало», «середньо» та «багато», вихідної (зміна тривалості сигналу) – «від’ємна», «нульова», «позитивна». При цьому функції належності можуть бути синглтоном, трикутного або трапецієподібного виду. Їх вид залежить від значень чисел R_1 , R_2 , R_3 та R_4 , які задають ліві нижню та верхню і праві нижню та верхню межі (рисунок 3). У цій роботі вказується, що вибір параметрів функцій належності обумовлюється реальними характеристиками перехрестя (шириною дороги, інтенсивністю дорожнього руху тощо), і в загальному випадку вони є унікальними для кожного перехрестя. Один із пропонуваних у [8] наборів лінгвістичних змінних для деякого перехрестя наведено на рисунку 4.

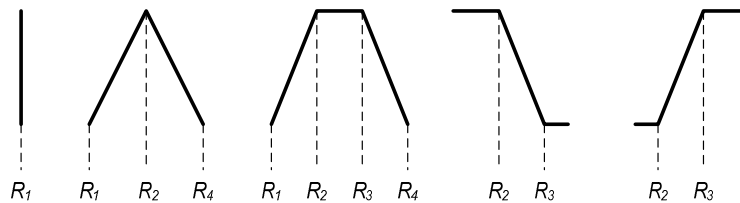


Рисунок 3 – Можливі функції належності нечітких змінних

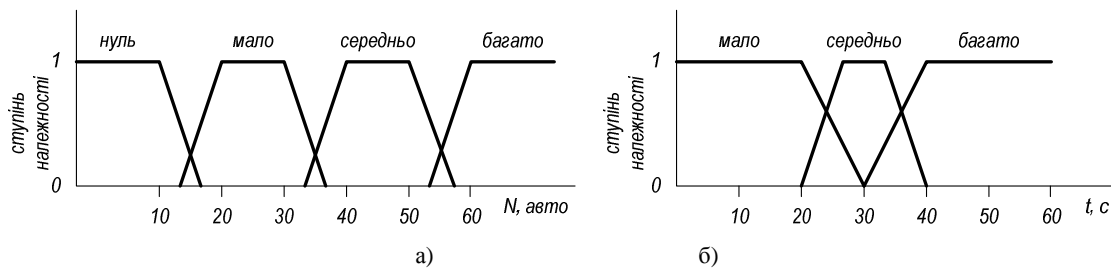


Рисунок 4 – Приклади функцій належності:

а – для кількості автомобілів перед стоп-лінією; б – для тривалості дозвільного сигналу

Проте у перелічених працях не показано, що такий вибір параметрів функцій належності забезпечує ефективне керування рухом на регульованих перехрестях за обраним критерієм.

Аналіз результатів моделювання роботи перехрестя з нечітким алгоритмом керування. Авторами було розроблено нечіткий алгоритм керування, керуючим рішенням у якому є встановлення тривалості дозвільного сигналу. За вхідні лінгвістичні змінні прийнято інтенсивність прибуття транспортних засобів та довжину черги на відповідному напрямку руху. Для них введено нечіткі змінні «мала», «середня», «велика» та «дуже велика», для тривалості сигналу – «дуже короткий», «короткий», «середній», «довгий» і «дуже довгий». База правил складається з шістнадцяти нечітких висловлювань. Для нечіткого висновку використовується метод Мамдані, для зведення до чіткості – центроїдний метод. Докладний опис цього алгоритму наведено у [9].

Дослідження роботи цього алгоритму протягом години та протягом дня показали, що його використання є ефективнішим, ніж жорсткого керування на перехресті [9-10]. Проте у цих роботах не розглядався вплив параметрів функцій належності вхідних та вихідної змінних.

З метою встановлення такого впливу на ефективність роботи перехрестя, було змінено відповідні параметри для довжини черги та тривалості дозвільного сигналу (рисунок 5). Кількість та назви нечітких змінних, а також база правил при цьому не змінювались.

Для дослідження використано імітаційну модель ізольованого регульованого перехрестя вул. Левицького – вул. Дороша – вул. Тершаковців (м. Львів), розроблену у MATLAB. Докладну характеристику цієї моделі викладено в [11]. Результатом моделювання є кількість автомобілів, які проїжджають перехрестя у кожному з напрямків, та середні і максимальні довжини черг на кожній смузі руху. Встановлено, що розроблена імітаційна модель адекватна, оскільки розбіжності між отриманими результатами та результатами натурних досліджень, а також з результатами моделювання роботи цього перехрестя у VISSIM мінімальні [11].

Моделювання роботи перехрестя протягом однієї години проводилось для двох значень інтенсивності руху: 700 авто/год по вул. Левицького і 300 авто/год по вул. Тершаковців та 1200 авто/год і 600 авто/год відповідно. Робота перехрестя досліджувалась для алгоритму керування без змін у параметрах функцій належності, для алгоритму із зміненими параметрами та для жорсткого керування, що існує на перехресті.

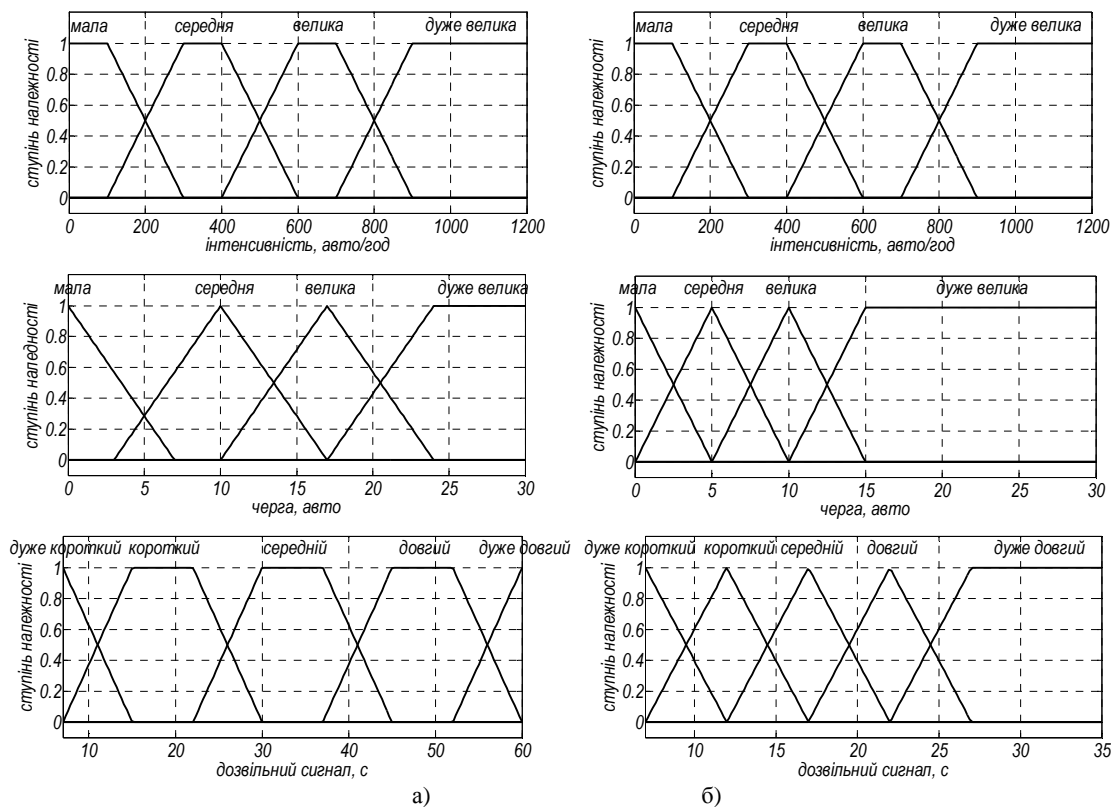


Рисунок 5 – Вхідні та вихідні змінні у нечіткому алгоритмі керування рухом:
а) – без змін параметрів функцій належності; б) – зі змінами

Встановлено (таблиця 1), що за менших значень інтенсивності руху за першого варіанту параметрів функцій належності (без змін) покращення порівняно з жорстким керуванням існує, проте не є істотним (середня черга коротша на 0,4 автомобілі). При цьому за другого варіанту (із змінами параметрів функцій належності) покращення роботи перехрестя є відчутнішим – середня черга є коротшою більш ніж на 1 автомобіль, максимальна – на 1-2. Однак за більших значень інтенсивності руху застосування нечіткого алгоритму керування з першим варіантом параметрів функцій належності призведе до погіршення роботи перехрестя (черги збільшуються), в той час як за другого варіанту параметрів функцій належності – до покращення (черги зменшуються).

Таблиця 1 – Результати моделювання роботи перехрестя

Інтенсивність прибуття автомобілів перехрестя	Тип системи керування	Довжина черги в момент ввімкнення дозвольного сигналу, авто					
		вул. Левицького (права смуга)		вул. Левицького (ліва смуга)		вул. Тершаковців	
		середня	макс.	середня	макс.	середня	макс.
вул. Левицького – 700 авто/год; вул. Тершаковців – 300 авто/год	жорстка	2,61	8	3,15	8	2,80	8
	нечітка (варіант 1)	2,22	8	2,69	9	2,22	8
	нечітка (варіант 2)	1,52	6	1,90	7	1,40	6
вул. Левицького – 1200 авто/год; вул. Тершаковців – 600 авто/год	жорстка	4,52	12	5,45	13	6,23	20
	нечітка (варіант 1)	7,85	16	9,49	19	8,77	17
	нечітка (варіант 2)	3,52	11	4,13	12	3,90	12

Отримані результати вказують на те, що параметри функцій належності впливають на ефективність роботи перехрестя. При цьому їх вибір не є простим завданням. Можна, наприклад, підібрати найкращі параметри для певних значень інтенсивності транспортних потоків або для всього діапазону її зміни з урахуванням в першу чергу ранкових та вечірніх пікових періодів.

Висновок. Під час створення нечітких алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях важливим є підбір вхідних та вихідних змінних, а також нечітких змінних та відповідних їм параметрів

функцій належності. При цьому використання відомих методів оптимізації цих параметрів неможливе, оскільки вихідна змінна (тривалість дозвільного сигналу або циклу) у більшості випадків не може бути критерієм ефективності керування рухом на перехресті, а лише одним із чинників, які на цей критерій впливають. Тому під час розроблення нечіткого алгоритму керування рухом потрібно відповідним чином підбирати параметри функцій належності. Як показують результати дослідження, навіть за тих же вхідних та вихідних змінних з однаковими термами та базою правил зміна параметрів функцій належності може призвести як до покращення, так і до погіршення ефективності роботи перехрестя. Отримані результати вказують на потребу в обґрунтуванні параметрів функцій належності лінгвістичних змінних нечіткого алгоритму керування рухом на регульованих перехрестях.

Бібліографічний список використаної літератури:

1. Pappis C. A fuzzy logic controller for a traffic junction / C. Pappis, E. Mamdani // IEEE transactions on systems, man and cybernetics. – 1977. – Vol. SMC, № 10. – pp. 707–717.
2. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Штовба С.Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB / С.Д. Штовба // Математика в приложениях. – 2003. – № 2 (2). – С. 9–15.
5. Пономаренко Л.А. Управління нестационарними транспортними потоками на регульованих перехрестях: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Любов Анатоліївна Пономаренко. – К.: НТУ, 2006. – 145 с.
6. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 220 с.
7. Murat Y. Sazi. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions / Y. Sazi Murat, Ergun Gedizlioglu // Transportation Research, Part C. – 2005. – Vol. 13. – pp. 13–36.
8. Славич В.П. Методи і моделі системи автоматизованого управління транспортними потоками міста: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / В'ячеслав Петрович Славич. – Херсон: ХНТУ, 2009. – 193 с.
9. Могила І.А. Нечіткий алгоритм керування дорожнім рухом на регульованому перехресті / І.А. Могила // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2011. – № 19 (39) – С. 79–89.
10. Stotsko Z. Simulation of signalized intersection functioning with fuzzy control algorithm / Z. Stotsko, Ye. Fornalchuk, I. Mohyla // Transport Problems. – 2013. – Volume 8. – Issue 1. – P. 5–16.
11. Форнальчик Є.Ю. Моделювання роботи регульованого перехрестя з використанням MATLAB та VISSIM / Є.Ю. Форнальчик, І.А. Могила // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2011. – 5 (159), частина 1. – С. 232–242.

Надійшла до редакції 03.06.2013 р.

Форнальчик Е.Ю., Могила И.А. Проблема выбора параметров функций принадлежности в нечетких алгоритмах управления движением на регулируемых перекрестках

Приведено анализ нечетких алгоритмов управления движением на регулируемых перекрестках и теоретических основ выбора и настройки параметров функций принадлежности в нечетких алгоритмах управления. Показано, что использование существующих методов оптимизации невозможно для алгоритмов управления движением на регулируемых перекрестках. За результатами моделирования работы регулируемого перекрестка с нечетким алгоритмом управления движением установлено, что параметры функций принадлежности существенно влияют на эффективность работы перекрестка.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, имитационное моделирование, нечеткий алгоритм управления движением, параметры функций принадлежности.

Fornalchuk Ye., Mohyla I. A problem of choosing of membership function parameters for fuzzy traffic control algorithm at signalized intersections

The analysis of fuzzy traffic control algorithms at signalized intersections and the theoretical basis of choosing and adjustment of membership function parameters for fuzzy control algorithm are given. It is shown that the usage of existing optimization methods is impossible for traffic control algorithms at signalized intersections. Based on results of simulation of functioning of signalized intersection with fuzzy traffic control algorithm, it is determined that membership function parameters have considerable impact on the efficiency of intersection functioning.

Keywords: signalized intersection, simulation test, fuzzy traffic control algorithm, parameters of membership functions.