

НЕЧІТКИЙ АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ РУХОМ НА РЕГУЛЬОВАНОМУ ПЕРЕХРЕСТІ

Анотація: Запропоновано нечіткий алгоритм керування рухом та змодельовано роботу регульованого перехрестя із системою керування, що використовує цей алгоритм. Встановлено, що застосування алгоритму дозволить підвищити якість та ефективність функціонування перехрестя.

Ключові слова: регульоване перехрестя, адаптивне керування рухом, нечіткий алгоритм керування.

Формулювання проблеми

Світлофорна сигналізація є основним засобом керування дорожнім рухом у містах. Для того, щоб регулювання потоків було ефективним, потрібно обґрунтувати режими роботи світлофornoї сигналізації з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів. Це вказує на потребу вдосконалення існуючих або розроблення нових адаптивних систем керування рухом на регульованих перехрестях. При цьому першочерговим у створенні таких систем є питання вибору алгоритму (сукупності алгоритмів) керування світлофornoю сигналізацією [1].

Принципи адаптивного керування

Адаптивне керування рухом – це концепція, коли за певним алгоритмом прогнозується поведінка транспортного потоку та приймаються відповідні керуючі впливи на основі інформації, що надходить з детекторів, розташованих у різних точках мережі [2].

За адаптивного керування відповідно до поточних умов руху транспортних потоків коригуються параметри світлофornoго циклу. При цьому використання адаптивних систем керування дає змогу [1–3]:

1. збільшити пропускну здатність перехрестя;
2. зменшити затримки транспортних потоків;
3. підвищити середню швидкість руху по вулично-дорожній мережі;
4. перерозподілити транспортні потоки при заторах;
5. зменшити витрати палива і забруднення довкілля.

Дослідження показують, що застосування адаптивних систем керування покращує показники роботи перехрестя в середньому на 10%, а в деяких випадках – до 50% і більше [2]. Відомо, що інтенсивність руху змінюється протягом дня, а також має випадкові коливання, тому для певних періодів доцільно використовувати адаптивне, а не жорстке керування [2]. При цьому багатопрограмне жорстке керування може бути

адекватним для добових коливань інтенсивності, але не бути оптимальним для різких її змін [3].

Алгоритм керування – це набір однозначних правил для опрацювання інформації про параметри реальних транспортних потоків на перехресті, в результаті чого виробляється та чи інша керуюча дія [1].

В загальному випадку процес керування рухом є процесом із зворотнім зв'язком, блок-схема якого наведена на рис. 1 [1]. Оптимізація керування за тим чи іншим алгоритмом означає пошук таких значень керуючих впливів β_j , за яких вибраний критерій якості керування Q є мінімальним для умов руху, що визначаються параметрами транспортного потоку α_i .

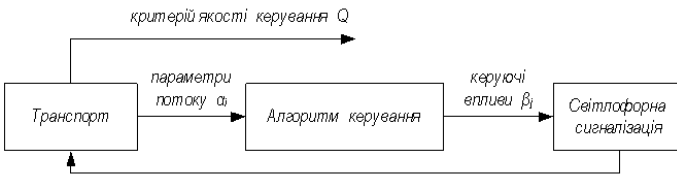


Рис. 1 – Блок-схема процесу керування із зворотнім зв'язком: α_i – параметри потоку, що характеризують умови руху; β_j – керуючі впливи

За способом опрацювання інформації, що надходить в керуючий пристрій від транспортних детекторів, алгоритми із зворотнім зв'язком для керування рухом на ізольованих перехрестях поділяють на три групи, найпоширенішими з яких є алгоритми першої групи [1,3]:

- алгоритми, в яких питання про потребу перемикання сигналу вирішується за інформацією про стан перехрестя в даному циклі регулювання;
- алгоритми статистичної оптимізації;
- алгоритми випадкового пошуку керування, що найкраще відповідає умовам руху.

Нечіткі алгоритми керування рухом на регульованих перехрестях

Останнім часом в системах керування дорожнім рухом починають застосовуватись алгоритми, які використовують нечітку логіку. Перші відомі спроби застосувати нечітку логіку для регулювання руху зроблені *Pappis* та *Mamdani* у 1977 р. [4]. Вони моделювали роботу нечіткого контролера на ізольованому перехресті (2 смуги руху, рух односторонній, без поворотних потоків). В дослідженні *Pappis* та *Mamdani* порівнювали нечіткий алгоритм керування з алгоритмом пошуку розриву. Для формулювання стратегії використано 25 правил, які встановлювали зв'язок між часом T , інтенсивністю прибуття N , довжиною черги L та тривалістю сигналу E . Правила забезпечували втручання на 7-й, 17-й, 27-й, 37-й та 47-й секундах.

Niittyymaki (1998) розробив нечіткий контролер FUSICO (Fuzzy Signal Control) для двофазного ізолюваного перехрестя [5]. Нечіткий алгоритм керування працює на двох рівнях. На вищому рівні відбувається визначення поточних умов руху (нормальні чи перевантаження) на основі значення інтенсивності в попередні 5 хв. та завантаження детектора протягом останніх 5 хв. (вхідні змінні). Метою нижчого рівня є коригування тривалості дозвільних сигналів (завершити чи подовжити). Моделювання роботи перехрестя з контролером, що працює за створеним алгоритмом, проводилось з використанням HUTSIM-симулятора, розробленого Гельсінкським Технологічним університетом. Встановлено, що ефективність контролера FUSICO є кращою на 10-20% порівняно з роботою контролера, який використовує алгоритм пошуку розриву у транспортному потоці.

Madhavan та *Cai* (2007) розробили нечіткий контролер для ізолюваного регульованого Х-подібного перехрестя [6]. Кількість фаз на перехресті – 4, послідовність ввімкнення фаз не змінюється.

Вхідними змінними системи керування є:

- довжина черги на напрямку з червоним сигналом;
- кількість автомобілів, що прибувають на дозвільний сигнал;
- частка дозвільного сигналу, що залишився;
- середній інтервал між автомобілями, що проїжджають перехрестя на дозвільний сигнал

Вихідною змінною (керуючим впливом) є рішення щодо впливу на дозвільний сигнал (дуже зменшити, зменшити, залишити без змін, збільшити, дуже збільшити).

Модель системи керування створено в середовищі MATLAB з використанням Fuzzy Logic Toolbox. Встановлено, що використання нечіткого контролера призводить до зменшення затримок порівняно з контролером, що використовує алгоритм пошуку розриву у транспортному потоці, особливо при виникненні нетипових ситуацій поблизу перехрестя (часткове або повне блокування смуги руху, зниження швидкості через погані дорожні умови тощо). Проте створений нечіткий контролер не враховує руху пішоходів через перехрестя.

Вовк (2002) у роботі [7] запропонувала алгоритм роботи світлофора, що використовує нечітку логіку, на Х-подібному регульованому перехресті (поворотні потоки на перехресті відсутні). Вхідними змінними нечіткої системи керування є кількість автомобілів, середня швидкість та відстань до перехрестя на вулицях Північ-Південь та Захід-Схід, вихідними змінними – тривалість дозвільного сигналу та вертикальній та горизонтальній вулицях. Для нечіткої системи керування створено базу знань, яка налічує 144 правила.

В загальному випадку передбачається, що базова тривалість світлофорного циклу становить 60 с (тобто, по 30 с дозвільного сигналу на кожному з напрямків). За 3 с до закінчення заборонного сигналу на певній вулиці розраховується керуючий вплив на базове значення тривалості

дозвільного сигналу (дуже зменшити, зменшити, трохи зменшити, не змінювати, трохи збільшити, збільшити, дуже збільшити). Процес роботи світлофора з нечіткою логікою змодельовано в середовищі MATLAB в пакеті SIMULINK. Недоліком цієї моделі є те, що вона є повністю теоретичною, і не проведено порівняння роботи такої системи з іншими системами керування роботою світлофорів.

Славич (2008) розробив модель системи керування транспортними потоками на регульованих перехрестях на основі нечіткої логіки [8]. Структура цієї системи є типовою для систем керування, які використовують нечітку логіку. У роботі передбачається наявність системи перехресть, тривалість світлофорних циклів на яких є однаковою із зсувом t_c . Система керування транспортними потоками регулює зсув t_c так, щоб мінімізувати суму тривалості очікування потоків, що прибувають до перехресть:

$$t_{ou} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 t_{ij}, \quad (1)$$

де t_{ij} – час очікування автомобілів потоку p_{ij} , $i, j = \overline{1, 3}$.

У запропонованій системі керування з нечіткою логікою вхідними лінгвістичними змінними є поточне значення часу синхронізації t_c та кількість автомобілів k_{ij} , що проїдуть на дозвільний сигнал у напрямку p_{ij} . Вихідною лінгвістичною змінною є зміна часу синхронізації Δt_c . Система для певного набору значень величини k_{ij} повинна видавати таке значення Δt_c , яке наближає час синхронізації t_c до оптимального значення.

Наведена модель керування режимами світлофорної сигналізації на системі перехресть, що побудована з використанням апарату нечіткої логіки, дозволяє вибрати оптимальні варіанти регулювання сигналів світлофора на перехресті так, щоб автомобілі перебували в мережі якнайменше. В свою чергу це дозволить знизити затримки транспорту та зменшити затори [8].

В загальному випадку структура нечіткої системи керування рухом на ізольованому перехресті є типовою для адаптивних систем керування рухом (рис. 2). 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 сигнали світлофора. Це впливає на покращення умов руху.

Типовими керуючими впливами у системах керування рухом, що використовують нечітку логіку, є:

1. встановлення тривалості дозвільного сигналу;
2. рішення про продовження або припинення горіння дозвільного сигналу;
3. рішення про величину продовження або скорочення дозвільного сигналу;
4. вибір наступної фази;

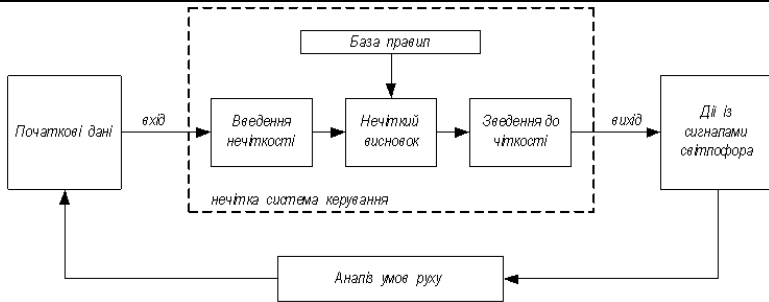


Рис. 2 – Структура нечіткої системи керування рухом на ізольованому перехресті

5. визначення умов руху на перехресті.

Основні завдання у керуванні рухом на регульованих перехрестях з використанням нечіткої логіки:

- підвищення безпеки перехрестя;
- збільшення пропускної здатності перехрестя;
- мінімізація затримок;
- зниження забруднення довкілля;
- вплив на вибір маршруту руху.

Характеристика розробленого алгоритму

Автором вдосконалено нечіткий алгоритм керування, характеристику якого наведено у [9]. Керуючим рішенням у цьому алгоритмі є встановлення тривалості дозвільного сигналу. Вхідними лінгвістичними змінними є інтенсивність прибуття транспортних засобів та довжина черги на відповідному напрямку.

Для інтенсивності прибуття автомобілів та довжини черги введено нечіткі змінні “мала”, “середня”, “велика” та “дуже велика”, для тривалості сигналу - “дуже короткий”, “короткий”, “середній”, “довгий” і “дуже довгий”. Вигляд і параметри функцій належності для інтенсивності та черги наведено на рис. 3, для тривалості сигналу - на рис. 4. База правил складається з шістнадцяти нечітких висловлювань (табл. 1).

Нечіткий алгоритм керування рухом реалізовано в середовищі MATLAB з використанням пакета Fuzzy Logic Toolbox в інтерактивному режимі за допомогою графічних засобів редагування і візуалізації всіх компонентів системи нечіткого висновку.

Залежність тривалості дозвільного сигналу від довжини черги та інтенсивності прибуття (поверхню відгуку) наведено на рис. 5, з якого видно, що із збільшенням інтенсивності прибуття автомобілів до перехрестя та довжини черги тривалість дозвільного сигналу зростає.

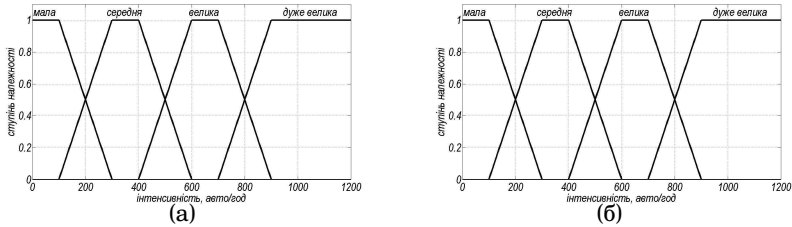


Рис. 3 – Вигляд і параметри функцій належності входних змінних: інтенсивності прибуття (а) та черги (б)

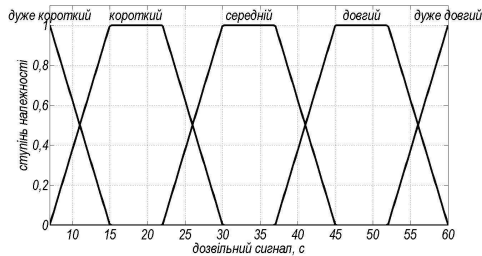


Рис. 4 – Вигляд і параметри функцій належності тривалості дозвільного сигналу

Таблиця 1

База правил			
з/п	Інтенсивність	Черга	Дозвільний сигнал
1	мала	мала	дуже короткий
2	мала	середня	короткий
3	мала	велика	короткий
4	мала	дуже велика	середній
5	середня	мала	короткий
6	середня	середня	середній
7	середня	велика	середній
8	середня	дуже велика	довгий
9	велика	мала	середній
10	велика	середня	довгий
11	велика	велика	довгий
12	велика	дуже велика	дуже довгий
13	дуже велика	мала	середній
14	дуже велика	середня	довгий
15	дуже велика	велика	дуже довгий
16	дуже велика	дуже велика	дуже довгий

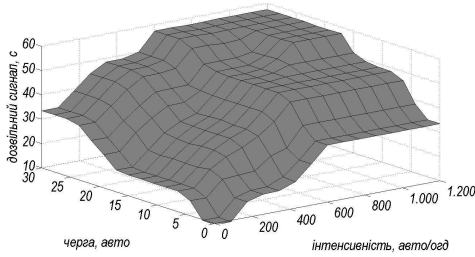


Рис. 5 – Залежність тривалості дозвільного сигналу від інтенсивності прибуття та довжини черги на підході до перехрестя

Звертання до нечіткого алгоритму керування для визначення тривалості дозвільного сигналу відбувається безпосередньо перед його ввімкненням для певного напрямку.

Дослідження роботи перехрестя з нечіткою системою керування

Для дослідження функціонування перехрестя з нечітким алгоритмом керування рухом вибрано модель регульованого перехрестя вул. Левицького – вул. Тершаковців – вул. Дороша (м. Львів), створену у середовищі MATLAB. Схему пофазного роз’їзду на перехресті наведено на рис. 6. У моделі перехрестя закладено розподіл автомобілів за напрямками, встановлений під час натурних досліджень. Тривалість перехідного сигналу становить 3 с. У цій моделі не враховується склад транспортного потоку, а також пішохідний рух через перехрестя (вважається, що пішоходам достатньо часу для переходу проїзної частини впродовж горіння дозвільного сигналу відповідної фази). Детальну характеристику цієї моделі наведено у [10].

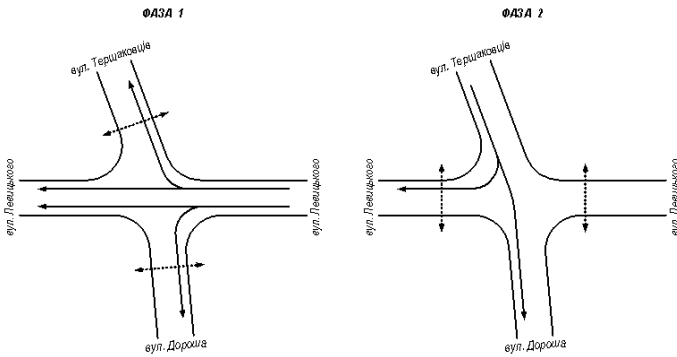


Рис. 6 – Схема пофазного роз’їзду автомобілів на перехресті

Перехрестя вул. Левицького – вул. Тершаковців – вул. Дороша є ізольованим, (відстань до найближчого попереднього регульованого перехрестя по вул. Левицького становить 700 м, по вул. Тершаковців – 420 м). Це зумовлює випадкове прибуття автомобілів до нього. Встановлено, що найкращі результати моделювання досягаються за гамма-розподілу інтервалів між автомобілями, які прибувають до перехрестя [10]. Тому цей розподіл вибрано для подальших досліджень.

Робота системи керування, що використовує нечіткий алгоритм (нечітка система керування), порівнювалась із роботою жорстких систем керування: існуючої на перехресті та розрахованої за методикою, наведеною в [11]. Розглянуто 7 можливих ситуацій на перехресті:

- інтенсивність потоків протягом години незмінна (ситуація 1);
- один з потоків має незначне зростання інтенсивності протягом 30 хв. (ситуація 2 та 4);
- один з потоків має різке зростання інтенсивності протягом 30 хв. (ситуація 3 та 5);
- два потоки мають незначне зростання інтенсивності протягом 30 хв. (ситуація 6);
- два потоки мають різке зростання інтенсивності протягом 30 хв. (ситуація 7)

Інтенсивність транспортних потоків, які прибувають до перехрестя протягом години, наведено інтервалами по 10 хв. (табл. 2).

Таблиця 2

Інтенсивність потоків на підходах до перехрестя

Ситуація	Потік на вул. Левицького, авто/год	Потік на вул. Тершаковців, авто/год
1	700-700-700-700-700-700	300-300-300-300-300-300
2	700-700- 1000-1000-1000 -700	300-300-300-300-300-300
3	700-700- 1500-1500-1500 -700	300-300-300-300-300-300
4	700-700-700-700-700-700	300-300- 500-500-500 -300
5	700-700-700-700-700-700	300-300- 800-800-800 -300
6	700-700- 1000-1000-1000 -700	300-300- 500-500-500 -300
7	700-700- 1500-1500-1500 -700	300-300- 800-800-800 -300

Результати моделювання роботи перехрестя протягом години (кількість імітацій для кожної ситуації – 100) з різними системами керування наведено у табл. 3 та табл. 4.

Аналіз отриманих результатів

З табл. 3 видно, що тип системи керування не впливає на кількість автомобілів, що проїжджають перехрестя. Проте він нього залежить якість та ефективність роботи перехрестя. Так, за незмінної інтенсивності прибуття автомобілів до перехрестя найкраще використовувати жорстку систему керування, розраховану на ці умови руху (табл. 4). Використання

Дослідження кількості автомобілів, що проїхали перехрестя

Ситуація	Модель	Кількість автомобілів, що проїхали перехрестя			
		на вул. Тер-шаковців	на вул. Левицького (права смуга)	на вул. Левицького (ліва смуга)	на вул. Дороша
1	2	3	4	5	6
1	існуюча	222,23	249,85	317,09	181,54
	розрахована	222,14	251,48	320,09	180,33
	нечітка	228,72	250,72	326,82	183,43
2	існуюча	271,29	264,84	385,98	189,55
	розрахована	271,33	264,48	385,25	192,17
	нечітка	269,27	267,21	386,87	193,10
3	існуюча	350,88	292,92	495,68	210,31
	розрахована	345,76	292,87	495,43	209,97
	нечітка	349,62	295,53	495,93	211,35
4	існуюча	222,77	303,92	318,59	222,71
	розрахована	222,90	302,86	320,88	222,39
	нечітка	223,48	302,45	317,51	222,64
5	існуюча	224,45	383,53	321,39	282,10
	розрахована	223,49	383,59	317,37	285,66
	нечітка	222,59	381,88	316,91	285,27
6	існуюча	270,20	320,31	387,43	234,02
	розрахована	271,53	324,17	390,53	234,96
	нечітка	271,09	320,33	385,62	235,51
7	існуюча	349,21	427,24	500,14	315,39
	розрахована	345,50	426,37	499,86	314,40
	нечітка	348,34	431,17	498,59	314,05

іншої жорсткої або нечіткої системи призводить до більших значень середньої та максимальної черги. При незначному збільшенні інтенсивності руху робота жорсткої системи керування, розрахованої на певні умови руху, є задовільною (для наведених значень інтенсивності потоків прибуття для всіх систем керування значення середньої довжини черги становить 1,5... 4 автомобілі, максимальної – 8... 14 автомобілів). Проте за значного зростання інтенсивності (навіть короткочасного), застосування жорсткої системи є недоцільним, оскільки при цьому різко збільшуються значення середньої та максимальної довжини черги. При цьому нечітка система добре адаптується до умов руху на перехресті та при незначному збільшенні черги (тобто, збільшенні тривалості заборонного сигналу) на одному напрямку, досягаються менші значення довжини черги на іншому (раціональніше розподіляється тривалість дозвільних сигналів в циклі). Оскільки інтенсивність реальних транспортних потоків не є постійною, то використання нечіткої системи керування дозволить покращити якість та ефективність роботи перехрестя.

Дослідження черги автомобілів

Ситуація	Модель	Довжина черги, авто					
		вул. Левицького, права смуга		вул. Левицького, ліва смуга		вул. Тершаковців, права смуга	
		сер.	мах.	сер.	мах.	сер.	мах.
1	існуюча	2,61	8	3,15	9	2,77	9
	розрахована	1,33	6	1,61	6	1,34	6
	нечітка	2,22	8	2,69	9	2,22	8
2	існуюча	3,15	9	3,83	11	2,78	8
	розрахована	1,74	8	2,04	10	1,34	6
	нечітка	2,66	9	3,23	11	2,63	8
3	існуюча	4,53	22	5,67	24	2,80	8
	розрахована	17,04	71	16,79	81	1,33	5
	нечітка	3,45	14	4,14	17	2,97	10
4	існуюча	2,58	7	3,19	9	3,77	12
	розрахована	1,34	6	1,61	6	1,80	8
	нечітка	2,58	9	3,13	11	2,96	10
5	існуюча	2,61	8	3,17	10	21,32	86
	розрахована	1,32	6	1,60	6	12,21	69
	нечітка	3,02	11	3,69	12	4,14	17
6	існуюча	3,16	11	3,85	11	3,73	12
	розрахована	1,77	9	2,07	9	1,84	8
	нечітка	3,26	13	3,99	14	3,61	14
7	існуюча	4,49	20	5,82	26	21,35	101
	розрахована	16,21	78	17,95	95	12,22	77
	нечітка	5,23	30	6,80	33	6,87	57

Висновки

Інтенсивність транспортних потоків впродовж доби не є постійною, вона має відповідні коливання та збурення. При цьому алгоритми адаптивного керування дорожнього руху дають можливість коригувати параметри світлофорного циклу відповідно до поточних умов руху. Автором розроблено та реалізовано в середовищі MATLAB адаптивний алгоритм керування дорожнім рухом на регульованому перехресті, що використовує нечітку логіку. Моделювання роботи перехрестя за різних можливих ситуацій показало, що застосування цього алгоритму дає змогу покращити якість та ефективність роботи перехрестя за рахунок раціональнішого розподілу тривалості дозвільних сигналів у циклі регулювання, що в кінцевому результаті мінімізує довжини черг на підходах до перехрестя.

Література

1. Брайловский Н.О. Управление движением транспортных средств / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М.: Транспорт, 1975. – 112 с.

2. Traffic Signal Timing Manual / P. Koonce [and others] – McLean: US Department of Transportation, 2008. – 264 p.
3. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения: Учебник для вузов / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2005. – 280 с.
4. 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.
5. Niittymäki J. Fuzzy traffic signal control. Principles and applications: Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / Jarkko Niittymäki. – Helsinki University of Technology, 2002. – 71 p.
6. Madhavan Nair B. A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered / B. Madhavan Nair, J. Cai // Proceedings of 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. – 2007. – pp. 1229-1233.
7. Вовк О.Л. Исследование алгоритмов нечеткого вывода в системах управления трудноформализуемыми объектами [Электронный ресурс] / О.Л. Вовк, О.И. Федяев: Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/publ2002/fvti/vovk.pdf>
8. Славич В.П. Модель автоматизованої системи управління потоками транспортних засобів / В.П. Славич // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні системи та комплекси. – 2008. - 1(21). – С. 20-23.
9. Могила І.А. Нечітка модель керування рухом на ізольованому перехресті / І.А. Могила, А.Б. Білоус // Східноєвропейський журнал передових технологій. – Харків: НВП “Технологічний центр”, 2010. – 5/3 (47). – С. 28-31.
10. Могила І.А. Моделювання роботи регульованого перехрестя з використанням MATLAB та VISSIM / І.А. Могила, Є.Ю. Форнальчик // Вісник СХУ ім. В. Даля, 2011. – 5 (159), ч. 1. – С. 232-242.
11. Tepley S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Third Edition / S. Tepley, D. I. Allingham, D. B. Richardson, B. W. Stephenson. – Toronto: Institute of Transportation Engineers, District 7, 2008. – 230 p.

Отримано 11.12.2011 р.