

УДК 656.11

## ВИЗНАЧЕННЯ МОДЕЛІ ДОВЖИНИ ЧЕРГИ ПЕРЕД ПЕРЕХРЕСТЯМ

Канд. техн. наук Я.В. Санько

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛИ ДЛИНЫ ОЧЕРЕДИ ПЕРЕД ПЕРЕКРЕСТКОМ

Канд. техн. наук Я.В. Санько

## DEFINITION MODEL QUEUE LENGTH BEFORE THE CROSSROADS

Ph. D. Ia. Sanko

*Проведено аналіз причинно-наслідкових факторів утворення черг перед перехрестями. Результатом досліджень є запропонована математична модель визначення довжини черги перед перехрестям, яка залежить від інтенсивності руху транспортних засобів на підходах до перехресть, кількості смуг руху, часу горіння червоного сигналу світлофора та співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу.*

**Ключові слова:** затримка руху, черга, регульоване перехрестя, інтенсивність руху, світлофорна сигналізація, цикл регулювання.

*Проведен анализ причинно-следственных факторов образования очередей перед перекрестками. Результатом исследований является предложенная математическая модель определения длины очереди перед перекрестком, которая зависит от интенсивности движения транспортных средств на подходах к перекресткам, количества полос движения, времени горения красного сигнала светофора и соотношения времени горения зеленого сигнала к времени цикла.*

**Ключевые слова:** задержка движения, очередь, регулируемый перекресток, интенсивность движения, светофорная сигнализация, цикл регулирования.

*The analysis of the causal factors of the formation of queues before intersections. During experimental studies was defined parameters of traffic and traffic lights signaling modes of traffic at intersections and long queues of vehicles before the intersection. The result of research is the mathematical model to determine the length of the queue intersection, depending on the traffic of vehicles on the approaches to intersections, the number of lanes, time burning red light and the ratio of time burning green signal to the cycle time. The regularities queue length depending on the selected options.*

**Keywords:** delay traffic, turn, controlled intersections, traffic, traffic light signaling cycle regulation.

**Вступ.** Основним завданням організації дорожнього руху є фізичне, психологічне та візуальне відокремлення пішохідних потоків від транспортних. При формуванні шляхів сполучення необхідно прагнути до послідовного розподілу транспортних та пішохідних потоків. Ця мета обумовлена необхідністю забезпечити безпеку пішоходів та належний

екологічний стан навколишнього середовища, що особливо є важливим для місць перетинання потоків, що відрізняються надмірною концентрацією транспортних засобів та пішоходів [1-3].

Цієї вимоги необхідно дотримуватися в будь-якому варіанті перетинання транспортних та пішохідних потоків, але на регульованих та нерегульованих

перехрестях вона потребує особливої уваги, враховуючи високу щільність конфліктуючих потоків та особливий характер пішохідного руху.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Розділення транспортних та пішохідних потоків у часі досягається світлофорним регулюванням, що надає частину часу для транспортного, а другу частину – для перетинаючого пішохідного потоку [4-6].

Залежно від можливостей розділення пішохідного і транспортного руху та існуючих між ними зв'язків застосовуються такі види організації руху [6]:

а) повне відокремлення пішохідного руху від інших видів руху в часі та просторі;

б) пішохідний рух допускає наявність транспортних засобів на загальній з пішоходами площі;

в) пішохідний рух дозволяє використовувати транспортні засоби на загальній з пішоходами площі, але з обмеженнями у визначений час;

г) пішохідний рух допускає застосування масового транспорту загального користування загальноміського чи міського значення на окремо виділеній території;

д) пішохідний рух передбачає використання додаткових транспортних засобів на загальній з пішоходами чи окремій площі;

е) організація пішохідного руху в різних способах з іншими учасниками руху.

Але будь-яка схема розподілення транспортних та пішохідних потоків

передбачає існування затримок у русі як транспорту, так і пішоходів. Мінімізація цих затримок є пріоритетним напрямком удосконалення організації дорожнього руху. Саме затримки транспортних засобів перед перехрестями є вагомими складовими економічних, соціальних та екологічних втрат суспільства. Тому вирішення питання скорочення затримок шляхом зменшення черг перед перехрестями є актуальним на сьогоднішній день.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Безпека руху і пропускна спроможність перехресть залежать від чіткості організації на них руху. Оптимальним є планувальне рішення, що забезпечує для кожного напрямку руху окрему проїжджу частину, ширина якої визначається інтенсивністю руху [7-9].

З огляду на це розділення транспортних потоків є головною умовою забезпечення безпеки дорожнього руху. У роботі [7] виділено такі способи розділення транспортних потоків:

- 1) у просторі;
- 2) у часі.

Розділення руху в просторі є основним методом створення сприятливих і безпечних умов руху транспортних засобів. Цей метод організації дорожнього руху має на увазі розділення транспортних, а також пішохідних потоків за напрямками по найбільш сприятливій і безпечній траєкторії.

Основні заходи реалізації розділення руху в просторі можна розділити на три групи (рис. 1) [10].

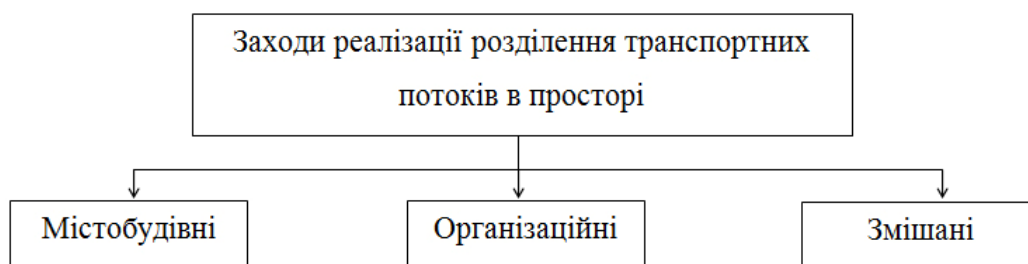


Рис. 1. Заходи реалізації розділення транспортних потоків в просторі

До містобудівних заходів розділення руху належать повне розділення руху потоків за допомогою розв'язок, розділення зустрічних смуг, облаштування велосипедних доріжок і пішохідних переходів у різні рівні [1, 5, 8].

До організаційних заходів розділення руху належить маршрутне орієнтування, що дає змогу розділити рух різних типів транспортних засобів по різних дорогах [4].

До змішаних заходів розділення руху належать каналізування руху і організація одностороннього руху [1, 4-9].

Але наслідком будь-якої схеми організації дорожнього руху є виникнення затримок у місцях розділення потоків. Основною метою заходів щодо зменшення величини затримок є зменшення довжини черг перед перехрестями.

Відомо, що для математичного прогнозування характеристик черг необхідно мати такі параметри системи [1, 4, 7, 11-12]:

1) характеристики типу прибуття, включаючи середню інтенсивність прибуття і статистичний розподіл часу між моментами прибуття;

2) характеристики обслуговування, у тому числі середні значення темпу обслуговування та розподіл і кількість користувачів, які можуть бути обслужені

одночасно, або число доступних каналів обслуговування;

3) параметри дисципліни обслуговування, подібні способом вибору чергового користувача, що підлягає обслуговуванню.

З діаграми виникнення черг перед регульованим перехрестям (рис. 2), видно, що верхня (суцільна) сторона представляє функцію прибуття, а дві інші (штрихові) – функцію обслуговування (відправлення). Кожен трикутник на рис. 2, що зображує один цикл, дає змогу визначити тривалості існування черги – з моменту початку періоду червоного сигналу до моменту її повного розсіювання [1, 4, 13]. Ця величина варіюється між часом ефективного червоного і тривалістю циклу:

$$v \cdot t_Q = S \cdot (t_Q - r), \quad (1)$$

або

$$t_Q = \frac{S \cdot r}{S - v}, \quad (2)$$

де  $t_Q$  – тривалість існування черги, с;

$v$  – середня інтенсивність прибуття, авто/год;

$S$  – середній темп обслуговування, авто/год;

$r$  – час ефективного червоного сигналу, с.

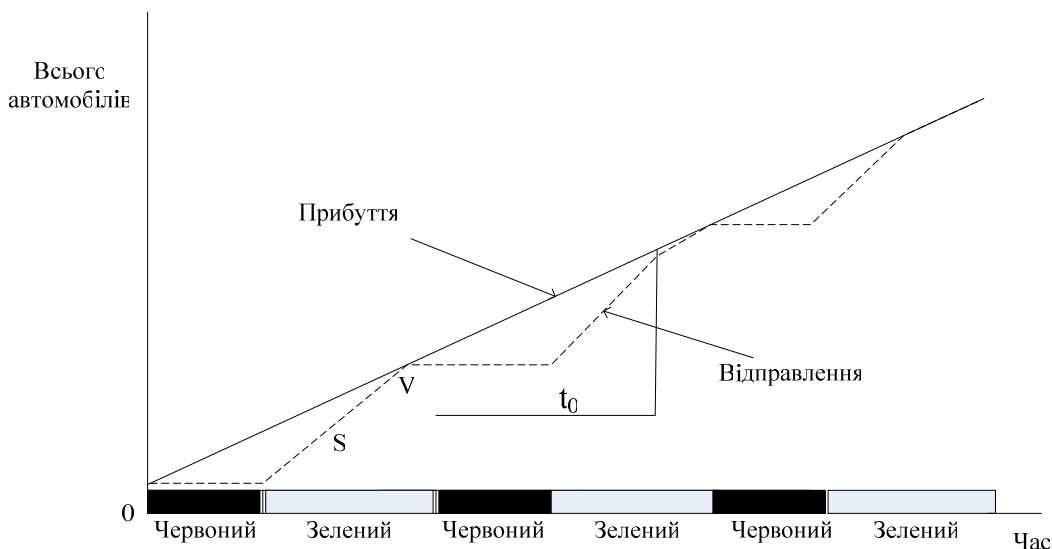


Рис. 2. Діаграма виникнення черг перед регульованим перехрестям [13]

Також довжину черги можна оцінити для цілей планування, прийнявши значення щільності в накопичувачі (середньої щільності автомобілів у черзі) і потім використовуючи таке співвідношення [13]:

$$QL = \frac{T \cdot (v - c)}{N \cdot d_s}, \quad (3)$$

де  $QL$  – довжина черги, км;

$T$  – тривалість періоду аналізу, год.;

$v$  – запит на трафік, авто/год;

$c$  – пропускна здатність, авто/год;

$N$  – кількість смуг;

$d_s$  – щільність у накопичувачі, авто/км/смугу.

Аналіз літературних джерел надав можливість виявити, що серед існуючих методів визначення черг перед регульованим перехрестям більшість визначає характеристики за усередненими залежностями при рівномірному розподілі інтенсивності транспортного потоку в часі. Характер руху транспортних засобів по транспортній мережі свідчить про зворотне. Нерівномірний вибір режимів руху окремих транспортних засобів у потоці, наявність різнопланових характеристик мережі та застарілі засоби організації світлофорного регулювання лише підтверджують думку про стохастичний розподіл черг перед перехрестями. Тому необхідним є проведення досліджень з виявлення характеристик транспортного

потоку та параметрів світлофорної сигналізації на утворення черг перед перехрестями.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою даної статті є визначення закономірностей утворення черг перед перехрестями.

Для досягнення цієї мети були вирішені такі завдання:

- проведення натурних досліджень щодо визначення розподілу характеристик транспортного потоку та параметрів світлофорної сигналізації в місцях утворення черг;

- розроблення математичної моделі визначення довжини черги.

**Визначення розподілу характеристик транспортного потоку та параметрів світлофорної сигналізації в місцях утворення черг.** Для проведення натурних досліджень було обрано декілька перехресть у м. Харків, які відображають усю гаму перетинань, а саме: кількості смуг руху на головній та другорядній дорозі; кількості фаз регулювання; параметрів світлофорної сигналізації; характеристик інтенсивності транспортних потоків; довжин черг перед перехрестями.

У межах експериментальних досліджень на обраних перехрестях було зібрано такі дані (табл. 1): інтенсивність руху транспортних засобів на підходах до перехресть; тривалості тактів та часу циклу; кількість транспортних засобів, що перебувають у черзі.

Таблиця 1

Результати натурних досліджень

Номер досліді	Інтенсивність руху, авто/год	Кількість смуг руху	Тривалість часу, с				Кількість транспортних засобів, що перебувають у черзі в момент часу $t$				
			Циклу	Зеленого сигналу	Червоного сигналу	Суми проміжних тактів	20	40	60	80	100
1	1230	2	58	20	30	8	6	3	5	6	7
2	2260	3	53	25	16	12	3	2	3	3	4
3	1350	2	49	15	28	6	8	4	6	7	9
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
50	3146	3	63	36	18	9	6	3	3	8	3

Сформований масив даних дає змогу отримати додаткові параметри утворення черг шляхом розрахунку таких відношень (табл. 2): інтенсивність руху транспортних засобів, що припадає на одну смугу руху; інтенсивність руху транспортних засобів,

що припадає на одну секунду руху; кількість циклів регулювання у годині; співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу; середня довжина черги (виражена у кількості транспортних засобів).

Таблиця 2

Результати натурних досліджень

Номер досліджу	Інтенсивність руху, що припадає на 1 смугу руху, авто/год	Інтенсивність руху, що припадає на 1 секунду руху, авто/год	Кількість циклів регулювання у годині	Співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу	Середня довжина черги, авто	
					розрахункова	експериментальна
1	615	0,171	62	0,345	5	5
2	753	0,209	67	0,472	3	3
3	675	0,188	73	0,306	5	7
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
50	1049	0,291	57	0,571	5	5

Для виявлення характеру та напрямку дії основних факторів на довжину черги було побудовано відповідні розподіли залежної змінної. Так, на рис. 3-4 наведено розподіл довжини черги залежно від інтенсивності руху, де видно, що чіткої залежності між експериментальними

даними довжини черги та інтенсивності руху не прослідковується. Натомість отриманий розподіл довжини черги залежно від інтенсивності руху, що припадає на 1 смугу руху, показує на чітку залежність (рис. 5).

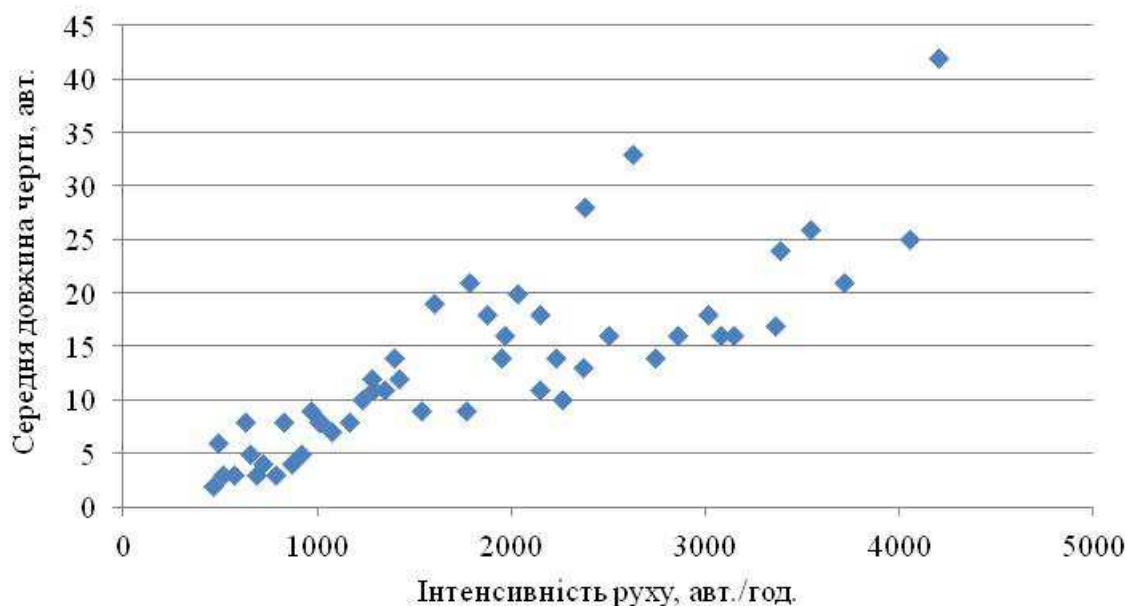


Рис. 3. Розподіл середньої довжини черги залежно від інтенсивності руху

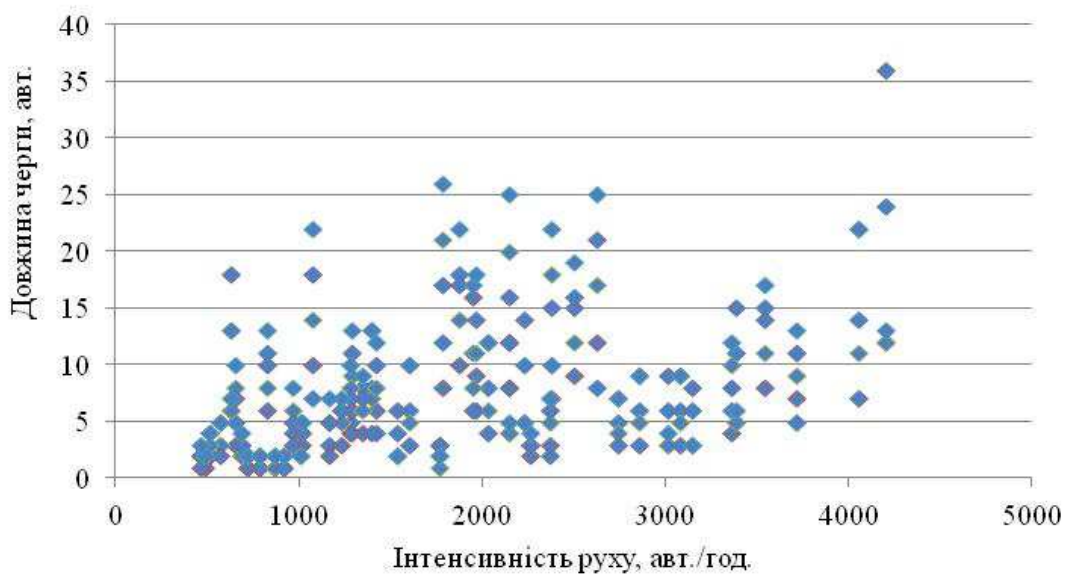


Рис. 4. Розподіл довжини черги (експериментальні дані) залежно від інтенсивності руху

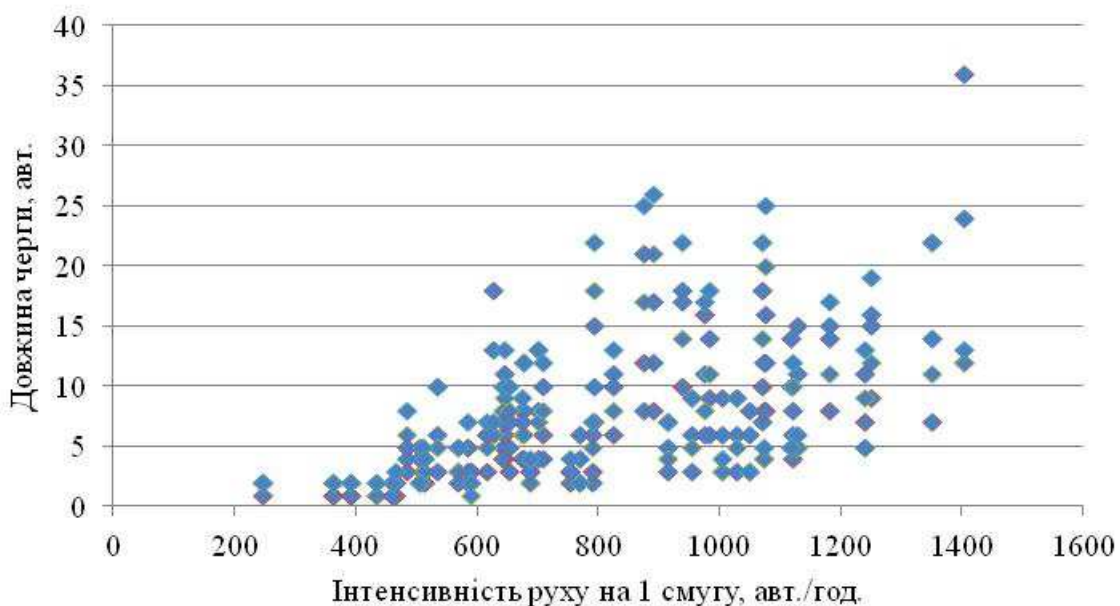


Рис. 5. Розподіл довжини черги залежно від інтенсивності руху, що припадає на 1 смугу руху

Отримані розподіли (рис. 3-5) характеризують утворення черг, тобто їх накопичення. З іншого боку, оцінити пропускну спроможність підходу можливо

розглянувши розподіл довжини черги залежно від співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу (рис. 6).

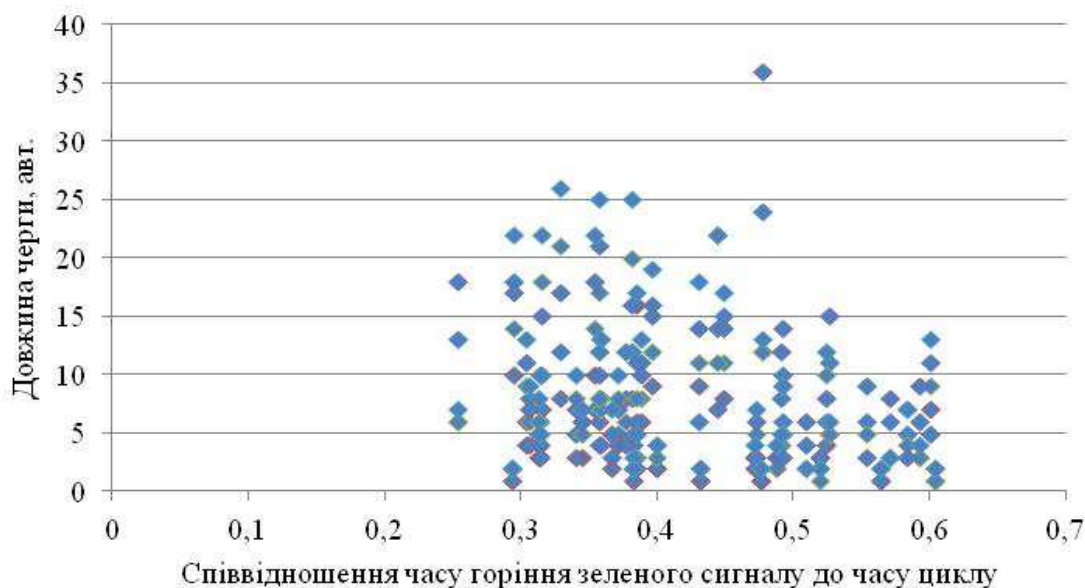


Рис. 6. Розподіл довжини черги залежно від співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу

Як бачимо, існує коридор варіювання довжини черги залежно від співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу, але загальна тенденція веде до зменшення черги. Це пояснюється більшим часом на пропускання транспортних засобів протягом часу циклу.

Отже, наведені розподіли довжини черги залежно від досліджених факторів необхідно перевірити за допомогою статистичного аналізу на вагомість їх впливу.

**Математична модель визначення довжини черги.** Для визначення виду функції від перелічених факторів було використано експериментальні дані та

програмний продукт Statistica. Для визначення залежності між факторами та функцією було обрано лінійний вид, що має такий вигляд:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n, \quad (4)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_n$  – коефіцієнти моделі;

$x_1, x_2, x_n$  – змінні фактори.

Використовуючи дані табл. 1-2 та програмний продукт Statistica 6.0, було отримано коефіцієнти моделі й побудовано лінійну математичну модель довжини черги:

$$Ql_{черг} = 6,1810 + 0,0061 \cdot N - 5,2706 \cdot n + 0,2124 \cdot t_ч - 10,5381 \cdot \frac{t_з}{T_ц}, \quad (5)$$

де  $Ql_{черг}$  – довжини черги, авто;

$N$  – інтенсивність руху транспортних засобів на підходах до перехресть, авто/год;

$n$  – кількість смуг руху;

$T_ц, t_ч, t_з$  – час циклу, час горіння червоного та зеленого сигналів світлофора відповідно, с.

Під час обробки результатів у програмі Statistica були отримані коефіцієнти значимості факторів моделі (табл. 3), де видно, що всі змінні є значимими, що відповідає проведеним дослідженням.

Таблиця 3

Коефіцієнти значимості факторів математичної моделі (5)

Фактор	Значення коефіцієнта
Інтенсивність руху транспортних засобів на підходах до перехресть, $N$ , авто/год	1,281577
Кількість смуг руху, $n$	-0,759006
Час горіння червоного сигналу світлофора, $t_u$ , с	0,375638
Співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу, $\frac{t_z}{T_u}$	-0,305427

Для перевірки отриманої моделі на адекватність як критерій було обрано показник середньої помилки апроксимації:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^m - y_i^{\phi}}{y_i^{\phi}} \right| \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $N$  – кількість спостережень, од.;

$y_i^m, y_i^{\phi}$  – відповідно розраховане за моделлю та фактичне значення залежної змінної.

Виконавши попередні підрахунки відхилень фактичних даних від експериментальних, розрахований показник середньої помилки апроксимації склав:

$$\varepsilon = \frac{1}{250} \cdot 10,11 \cdot 100\% = 4,04\%.$$

Отримане значення середньої помилки апроксимації 4,04 % свідчить про адекватність розробленої моделі визначення довжини черги й дає змогу використовувати її в практичних розрахунках.

Додатковим підтвердженням є адекватні значення інших оціночних показників, отриманих у програмі Statistica. А саме критерій Фішера та множинний коефіцієнт кореляції, значення яких наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Оцінка адекватності моделі (5)

Критерій адекватності	Значення критерію
Показник середньої помилки апроксимації, $\varepsilon$	4,04%
Критерій Фішера, $F$ – розрахунковий	34,915
– табличний	2,65
Множинний коефіцієнт кореляції, $R^2$	0,8696

Таким чином, отримана математична модель визначення довжини черги (5) є адекватною до умов руху на вулично-дорожній мережі й може застосовуватися для практичних розрахунків при розробленні заходів з удосконалення організації дорожнього руху.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** В результаті експериментальних досліджень на вулично-дорожній мережі м. Харків було визначено такі дані: інтенсивність руху транспортних засобів на підходах до перехресть;



тривалості тактів та часу циклу; кількість транспортних засобів, що перебувають у черзі. Аналіз цих даних надав змогу сформуванню уявлення про розподіл довжини черги перед перехрестям залежно від досліджених факторів.

Таким чином, було отримано математичну модель визначення довжини черги перед перехрестям, яка залежить від інтенсивності руху транспортних засобів на підходах до перехресть, кількості смуг руху, часу горіння червоного сигналу світлофора та співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу. Так, видно, що інтенсивність руху транспортних засобів на підходах до перехресть та час горіння червоного сигналу світлофора збільшують довжину черги, а кількість

смуг руху та співвідношення часу горіння зеленого сигналу до часу циклу, навпаки, зменшують її значення.

При перевірці на адекватність було отримано значення середньої помилки апроксимації  $\varepsilon = 4,04\%$ , що свідчить про адекватність розробленої моделі довжини черги й дає можливість використовувати її в практичних розрахунках. Додатково було отримано значення множинного коефіцієнта кореляції  $R^2 = 0,8696$  та розрахункове значення критерію Фішера  $F_{розр} = 34,915$ , яке менше табличного  $F_{табл}(p=0,05) = 2,65$ , що свідчить про значимість отриманої регресії.

#### Список використаних джерел

1. Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху [Текст] / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля [та ін.]; за ред. М.Ф. Дмитриченка. – К.: Знання України, 2007. – 452 с.
2. Dewar R. Human Factors in Traffic Safety, 2nd edition / R. Dewar, P. Olsen. – Lawyers and Judges Publishing Company, Inc., 2007. – 549 p.
3. Shinar D. Traffic Safety and Human Behavior / D. Shinar. – Elsevier, 2007. – 776 p.
4. Поліщук, В.П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху [Текст] / В.П. Поліщук, О.П. Дзюба. – К.: Знання України, 2008. – 175 с.
5. Leutzbach W. Introduction to the theory of traffic flow / W. Leutzbach. – Berlin: Springer-Verlag, 1988. – 204 p.
6. Markowski M.J. Modeling behavior in vehicular and pedestrian traffic flow / M.J. Markowski. – New York: Umi, 2008. – 162 p.
7. Пугачев, И.Н. Организация и безопасность движения [Текст] / И.Н. Пугачёв. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2004. – 232 с.
8. Яркин, Е.К. Планировочная организация движения транспорта в городах [Текст] / Е.К. Яркин, Е.В. Харченко. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. – 365 с.
9. Пальчик, А.М. Транспортні потоки [Текст] / А. М. Пальчик. – К.: НТУ, 2010 – 171 с.
10. Глик, Ф. Г. Обследование транспортных потоков и прогнозирование нагрузки сети городских улиц и дорог [Текст] / Ф.Г. Глик // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов. – Екатеринбург, 1998. – 105 с.
11. Sacks G. Impact of front-of-pack 'traffic-light' nutrition labelling on consumer food purchases in the UK / G. Sacks, M. Rayner, B. Swinburn // Health promotion international. – 2009. – Vol. 24, Issue 4. – P. 344–352.
12. Tubaishat M. Adaptive traffic light control with wireless sensor networks / M. Tubaishat, Y. Shang, H. Shi // Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2007. – P. 187-191.

13. Branston D. Some factors affecting the capacity of signalized intersection / D. Branston // Traffic Engineering and Control, 1979. – P. 390-396.

Рецензент д-р техн. наук, професор В.К. Доля

---

Санько Ярослав Володимирович, канд. техн. наук, докторант кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.  
Тел.: (057) 707-32-61. E-mail: yron08@rambler.ru.

Sanko Iaroslav Vladimirovich, Ph. D., doctoral student department of transport systems and logistics O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-32-61. E- mail: yron08@rambler.ru.

Принята 22.03.2016 р.