

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСУ ВИПЕРЕДЖЕННЯ (ЗСУВУ)
ВКЛЮЧЕННЯ ЗЕЛЕНОГО СИГНАЛУ СВІТЛОФОРУ НА ЧЕРГОВОМУ
КООРДИНОВАНОМУ ПЕРЕХРЕСТІ**

П.Ф. Горбачов, д.т.н., професор

Є.В. Любий, к.т.н., доцент

К.В. Діденко, здобувачка магістратури

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Метою експериментального дослідження часу випередження (зсуву) включення зеленого сигналу світлофору на черговому координованому перехресті є перевірка точності аналітичних моделей визначення часу випередження. У роботі розглядаються дві моделі визначення часу випередження:

- з урахуванням середнього значення прискорення першого автомобіля з пачки зеленої хвилі (ЗХ) від першого перехрестя в плані координації (ПК) [1];
- з урахуванням лінійноспадаючого характеру зміни прискорення автомобіля при русі з місця [2].

Згідно роботи [1] час випередження включення зеленого сигналу світлофору на черговому координованому перехресті розраховується за наступною залежністю:

$$\Delta t_a = \frac{V}{2a} + \frac{L}{V} + T_s, \quad (1)$$

де V – швидкість руху пачки ЗХ, м/с; a – середнє значення прискорення першого автомобіля з пачки ЗХ, м/с²; L – середня довжина додаткового ТЗ, м; T_s – часовий інтервал безпеки руху, тобто проміжок часу, необхідний для подолання дистанції безпеки на поточній швидкості, с.

Слід розуміти, що лінійноспадаюче прискорення впливає і на час розгону першого автомобіля з пачки ЗХ, і на сам час випередження включення дозвільного сигналу світлофора, й згідно з дослідженнями Г. Лонга [2], воно може бути представлене наступним чином:

$$a(t) = A + b \cdot v(t), \quad (2)$$

де $a(t)$ – прискорення автомобіля в момент часу t , м/с²; A – максимальне прискорення автомобіля при старті з місця, м/с²; $v(t)$ – швидкість автомобіля в момент часу t , м/с; b – параметр, який приймає від'ємне значення і представляє швидкість зменшення прискорення зі збільшенням швидкості, с⁻¹.

За аналогією з залежністю (1) і за умов виконання відповідних математичних дій залежність для визначення часу випередження з урахуванням лінійноспадаючого характеру прискорення матиме наступний вигляд:

$$\Delta t_a = \frac{1}{b} \left[\ln \left(\frac{bV}{A} + 1 \right) \left(1 + \frac{A}{bV} \right) - 1 \right] + \frac{L}{V} + T_s. \quad (3)$$

За об'єкт для проведення експериментальних досліджень обрано односмугову ділянку міської магістралі (ММ) з двома регульованими перехрестями обладнаним світлофорами. Також на ділянці ММ (перед другим перехрестям) передбачено можливість виїзду на неї додаткових автомобілів (ДА), які рухаються в тому ж напрямку, що й основний потік (пачка автомобілів ЗХ). Схема об'єкту експериментальних досліджень представлена на рисунку 1.

Для проведення експериментального дослідження використовуються можливості спеціалізованого програмного забезпечення VISSIM. У ньому автомобілі стартують з 1-го

перехрестя та їдуть до контрольної точки В за перехрестям 2, на якому щоразу на них чекає ДА. Контрольна точка В розташовується так далеко від Б, щоб за максимального часу випередження і будь-якої довжини перегону А-Б автомобіль з А не наздоганяв ДА і ДА проїжджав точку В на своїй максимальній (крейсерській) швидкості. Виїзд ДА на ММ здійснюється за рахунок моделювання в VISSIM другорядної дороги за 100 м від перехрестя 2. Сама подача ДА на магістраль і їх кількість регулюються СО, що встановлено при виїзді ДА з другорядної дороги. Відстань від місця виїзду ДА на магістраль і перехрестям 2 суттєвої ролі не грає, оскільки СО 1 і 2 є скоординованими і ДА, що виїжджає з другорядного напрямку стає на червоне світло світлофора на перехресті 2.

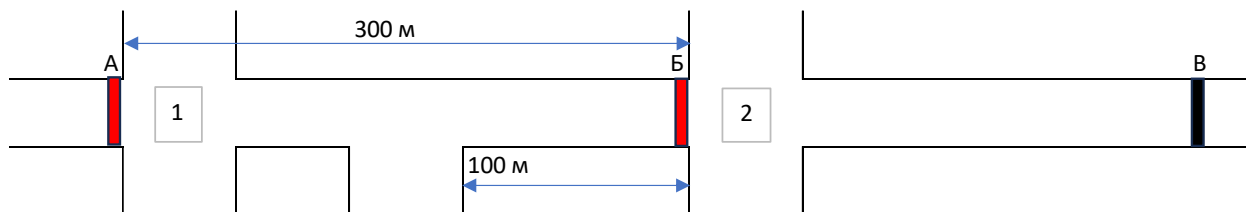


Рис.1. Ділянка для проведення експерименту в VISSIM (стартовий варіант)

У рамках цього дослідження одним із питань є обґрунтування довжини ділянки А-Б, тобто довжини фрагменту ММ між світлофорами 1 і 2. З цього приводу слід зазначити, що у дослідників з проблематики організації роботи скоординованих систем світлофорними об'єктами (СО) думки щодо ефективного їх розміщення відносно один одного розходяться. З цього приводу в українській нормативній літературі лише вказано, що «Відстань між транспортними розв'язками з пересіченням потоків має забезпечувати зручність для користувачів і визначається виходячи з існуючих транспортних схем. Доцільно такі розв'язки влаштовувати: на магістральних дорогах та магістральних вулицях безперервного руху – не рідше ніж через 1500 м, для інших магістральних вулиць – не рідше ніж через 500 м» [3]. Ці дані напряму не пов'язані з питанням розміщення світлофорних засобів регулювання дорожнім рухом, але їх можна вважати певним в цьому напрямі орієнтиром.

Українські дослідники [4, 5] в своїх роботах зазначають, що відстань між регульованими перехрестями не повинна перевищувати 800 м, оскільки в протилежному випадку пачка автомобілів 3Х розсипається. Інформація з робіт закордонних авторів [6, 7] і різноманітних настанов державних установ [8-10] говорить, що раціональна відстань між регульованими перехрестями на ММ повинна бути в діапазоні 800-1200 м.

Якщо ж звернути свою увагу на ділянки ММ українських міст, де було впроваджено координацію, то слід відзначити, що реальні відстані між регульованими перехрестями в плані координації (ПК) суттєво відрізняються від зазначених у вище наведених джерелах. Так, наприклад, в місті Рівне [11] на ділянці по проспекту Миру середнє значення довжини перегону між СО в ПК складає близько 245 м; в місті Харкові по проспекту Науки – 348 м; в місті Дніпро по вулиці Набережна Перемоги – 421 м; в місті Чернігів по вулиці Героїв Чорнобиля – 372 м.

Відштовхуючись від зазначеної вище інформації цілком можна стверджувати, що для проведення експериментальних досліджень моделей розрахунку часу випередження включення дозвільного сигналу на черговому регульованому перехресті в ПК, доцільно використовувати інтервал зміни довжини перегонів між двома суміжними СО в межах 300-800 м з кроком зміни в 100 м. Нижня межа цього діапазону відповідає наявній ситуації з розташуванням СО на ділянках ММ українських міст, де впроваджено координацію, а верхня межа у 800 м прийнята як така, за якою пачка автомобілів у ПК з високою ймовірністю може розсипатися.

Для проведення експериментальних досліджень використано імітаційну модель побудовану з використанням VISSIM. За параметри, що варіюються в імітаційній моделі

прийнято: довжину ділянки А-Б; час випередження включення дозвільного сигналу на перехресті 2; стартове випадкове число (налаштування VISSIM).

Послідовність імітації руху транспортних потоків у розробленій моделі наступна:

1. На першому етапі проводяться базові налаштування моделі: налаштовуються СО (час циклу, тривалість проміжних і основних тактів) на перехрестях 1 і 2, а також на другорядній дорозі для випуску на ММ ДА; підбираються параметри транспортних потоків, що рухаються координованою ділянкою ММ, і другорядною дорогою. Другорядний напрямок налаштовується таким чином, щоб за дозвільний сигнал світлофору випускати лише один ДА.

2. На другому етапі моделюється рух пачки автомобілів ЗХ за умов її вільного руху (безперешкодний рух пачки автомобілів ЗХ ділянкою між перехрестям 1 і 2, за умови старту від стоп-лінії перехрестя 1). Отримане значення часу руху ділянкою А-Б використовується для налаштування СО на перехресті 1. Також фіксується максимальна швидкість руху автомобіля ділянкою і його прискорення при старті від стоп-лінії перехрестя 1.

3. На третьому етапі проводиться моделювання руху пачки автомобілів ЗХ координованою ділянкою ММ, яка зустрічається з ДА біля стоп-лінії перехрестя 2 за умов призначення різних значень часу випередження (зсуву) включення дозвільного сигналу світлофора на перехресті 2. При цьому фіксується час руху пачки автомобілів ЗХ ділянки А-Б і А-В. Результати імітації руху транспортних потоків у розробленій моделі наведено в таблицях 1, 2.

Таблиця 1 – Результати визначення часу випередження з використанням VISSIM (довжина ділянки А-Б 300 м, стартове випадкове число 1) – імітація 1 (фрагмент)

Номер заміру	Величина зсуву, с	Час подолання ділянки між СО першим автомобілем із пачки ЗХ у VISSIM			Час проїзду першого автомобіля із пачки ЗХ від перехрестя 1 до контрольної точки у VISSIM (за 20 м після другого СО)		
		початок імітації	закінчення імітації	результат, с	початок імітації	закінчення імітації	результат, с
1	0	8,943	34,298	25,355	8,943	36,729	27,786
2	1	8,562	33,024	24,462	8,562	35,083	26,521
...
9	8	15,077	37,993	22,916	15,077	39,415	24,338
10	9	14,679	37,404	22,725	14,679	38,995	24,316
11	10	14,679	37,404	22,725	14,679	38,995	24,316

Таблиця 2 – Результати експериментальної перевірки моделей визначення часу зсуву (довжина ділянки 300 м)

Номер імітації	Час зсуву в імітації, с	Середнє прискорення			Лінійноспадяюче прискорення		
		час зсуву, с	відносне відхилення	абсолютне відхилення, с	час зсуву, с	відносне відхилення	абсолютне відхилення, с
1	9	9,30	-3,33%	-0,3	8,71	3,22%	0,29
2	9	9,73	-8,11%	-0,73	9,10	-1,11%	-0,1
3	8	8,58	-7,25%	-0,58	8,07	-0,88%	-0,07
4	8	7,73	3,37%	0,27	7,30	8,75%	0,7
5	8	8,56	-7,00%	-0,56	8,05	-0,63%	-0,05
6	7	8,21	-17,29%	-1,21	7,73	-10,43%	-0,73
7	8	8,43	-5,38%	-0,43	7,93	0,88%	0,07
8	8	8,49	-6,13%	-0,49	7,99	0,12%	0,01
9	8	8,79	-9,87%	-0,79	8,25	-3,13%	-0,25
10	8	8,29	-3,62%	-0,29	7,81	2,38%	0,19

Середнє значення	8,10	8,61	-6,46%	-0,51	8,09	-0,08%	0,01
------------------	------	------	--------	-------	------	--------	------

Аналіз результати експериментальної перевірки моделей визначення часу випередження включення дозвільного сигналу на черговому СО свідчить про більш високу точність моделі, що враховує лінійноспадаючий характер зміни прискорення автомобіля при русі від стоп-лінії попереднього перехрестя в ПК. Коефіцієнт кореляції, в цьому випадку становить 0,77, що свідчить про наявність тісного статистичного зв'язку між часом зсуву, отриманим з використанням імітаційної моделі, та часом зсуву розрахованим за формулою (3).

Подальшим напрямом досліджень є розширення результатів експерименту за рахунок імітації руху на ділянках між СО з іншою довжиною та за інших варіантів стартового випадкового числа.

Література:

1. Горбачов П.Ф., Любий Є.В. Методика оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. 22, с. 81-91. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2>
2. Long, G. Acceleration Characteristics of Starting Vehicles. *Transportation Research Record*. 1737(1), p. 58–70 (2000). <https://doi.org/10.3141/1737-08>.
3. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів Зміна № 1. <http://surl.li/mrqyk>
4. Ройко Ю.Я., Грицунь О.М. Підвищення ефективності функціонування ділянок вулично-дорожньої мережі в умовах координованого регулювання. *Наукові нотатки*. 2014. 45, с. 472-476.
5. Хітров І.О., Цьонь О.П., Кристопчук М.Є., Почужевський О.Д. Аналіз транспортних затримок в центральній частині міста та шляхи їх зниження. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. 2(14), с. 131-139. : <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-131-139>.
6. Bastable, A.J. The economic and social impact of dynamic signal co-ordination in Sydney. *Australian Road Research Board conference*, 10th, Sydney, New South Wales, Australian Road Research Board, Vermont South, Vic, 1980. vol. 10, no. 4, pp. 245-51.
7. Joubert, A.J., Burnett, S.L., & Ueckermann, T.M. (2000). Lynnwood road arterial study : the effect of intersection spacing on arterial operation. <http://surl.li/mrqyx>
8. Austroads, 2019. *Guide to Traffic Management Part 9: Traffic Operations*, Ed. 3.1, Austroads Publication No. AGTM09-19. Austroads, Sydney. 260 p.
9. Genesee transportation council The Metropolitan Planning Organization for the Genesee-Finger Lakes Region <http://surl.li/mrqzd>
10. Weld County Government <http://surl.li/mrqzt>
11. Кристопчук М.Є., Хітров І.О., Цьонь О.П., Почужевський О.Д. Дослідження координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. 1(16), с. 82-90. DOI 10.36910/automash.v1i16.511