

П. Ф. Горбачов<sup>1</sup>  
О. В. Макарічев<sup>2</sup>  
Є. В. Любий<sup>1</sup>

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСУ ВИПЕРЕДЖЕННЯ ВКЛЮЧЕННЯ ДОЗВІЛЬНОГО СИГНАЛУ СВІТЛОФОРА В ПЛАНІ КООРДИНАЦІЇ НА МІСЬКИХ МАГІСТРАЛЯХ

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

<sup>2</sup>Херсонський національний технічний університет

Подано результати оцінювання точності аналітичних моделей визначення часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора на черговому перехресті в плані координації, які базуються на припущеннях про постійне та лінійно спадне прискорення транспортних засобів під час руху з місця від стоп-лінії перехрестя. Як інструмент порівняння аналітичних моделей з фактичними характеристиками процесу руху транспортних засобів використано засоби мікромоделювання дорожнього руху, а саме PTV VISSIM. Результати експериментальних досліджень свідчать про достатню точність отриманих аналітичних моделей визначення часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора на черговому в координації перехресті та можливість їхнього використання для розрахунку раціональних параметрів світлофорного управління на скоординованих ділянках міських магістралей. Кількісне і якісне порівняння точності розроблених аналітичних моделей розрахунку часу випередження, з використанням результатів імітаційного моделювання у PTV VISSIM, продемонстрували перевагу моделі, що засновується на припущенні про лінійно спадний характер прискорення транспортних засобів зі зростанням швидкості. Результати імітаційного експерименту є основою для формування методики визначення часу зсуву включення дозвільного сигналу світлофора на черговому в плані координації перехресті, яка потребуватиме своєї перевірки на більшій кількості сукупності додаткових транспортних засобів, що стають перешкодою на шляху руху скоординованої пачки автомобілів. Збільшення кількості додаткових транспортних засобів на шляху руху пачки зеленої хвилі суттєво впливатиме на ефективність її просування скоординованою ділянкою та буде призводити до зростання затримок на другорядних напрямках і, як наслідок, зниження пропускної здатності перехрестя в координації.

**Ключові слова:** зелена хвиля, імітаційне моделювання, міська магістраль, організація дорожнього руху, прискорення, світлофорні об'єкти, час випередження, PTV VISSIM.

### Вступ і постановка проблеми

Ефективна організація дорожнього руху (ОДР) в містах є предметом постійної уваги державної влади, органів місцевого самоврядування і фахівців (експертів) як в Україні, так і в більшості країн світу. Ключовими і найчисленнішими елементами міських систем ОДР є перетини вулиць в одному рівні, які концентрують у собі основні проблеми управління рухом, оскільки вони не в змозі надати можливості для одночасного руху на них всім конкуруючим транспортним і пішохідним потокам. На найзавантаженіших х перетинах вулиць основним засобом ОДР є світлофорне регулювання, а якщо світлофори розташовані неподалік один від одного, то ефективною практикою стає впровадження координованої роботи таких світлофорів з метою організації максимально безперешкодного проїзду транспортних засобів (ТЗ) в одному або декількох напрямках руху — «зелена хвиля» (ЗХ).

Варто розуміти, що наявні методики координації не повною мірою враховують особливості транспортного процесу під час руху учасників дорожнього руху міськими магістралями (ММ). До

таких особливостей можна віднести: групове прибуття ТЗ до чергового перехрестя в плані координат (ПК); взаємодію основного транспортного потоку (ТП) з ТЗ другорядних напрямків, які стають перешкодами на шляху його прямування; гармонізацію швидкості руху ТЗ на координованих ділянках ММ та інші. Врахування цих особливостей дозволить фахівцям з ОДР створити нові підходи до формування ПК, використання яких може привести до забезпечення рівномірного (гармонізованого) руху всіх учасників транспортного процесу на координованих ділянках ММ.

Час завчасного ввімкнення зеленого сигналу світлофора (час випередження або час зсуву) є одним з найважливіших параметрів, що впливає на ефективність координованого управління світлофорами. Він використовується для забезпечення безперервного руху пачки ЗХ на координованих ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Час випередження — це той час, який дозволяє першому ТЗ пачки ЗХ, що рухається з вибраною швидкістю просування, досягти останнього ТЗ з черги в момент, коли останній сягає швидкості просування. Номер останнього ТЗ в черзі на наступному перехресті може бути різним, і від нього залежить час від загоряння зеленого сигналу світлофора до моменту, коли цей ТЗ досягне швидкості проїзду перехрестя. Тому час випередження, необхідний для забезпечення безперешкодного просування, значною мірою залежить від кількості додаткових ТЗ на кожній смужі скоординованої магістралі.

Висока актуальність завдання пошуку оптимальних значень часу випередження в процесі роботи координованих систем світлофорним об'єктом (СО) на ММ полягає в тому, що він враховується в:

- тривалості світлофорного циклу. Цей час додається до основного циклу світлофора, утворюючи фактичну тривалість циклу. Це необхідно для того, щоб додатковий автомобіль зміг розігнатися до швидкості пачки ЗХ, що відбувається вже за СО. Включення часу випередження в цикл зменшить пропускну здатність координованого перехрестя, оскільки більшу частину часу випередження воно буде вільним від ТЗ. Проте, загальноприйняті методи розрахунку тривалості циклу не дозволяють врахувати час випередження, оскільки вони базуються на постійному потоці насиченості. Це вказує на доцільність розгляду інших методів визначення тривалості циклу, ніж ті, що базуються на загальноприйнятій формулі Вебстера;

- часі зсуву початку світлофорного циклу. Час зсуву — це часовий інтервал між моментом ввімкнення дозвільного сигналу для пачки ЗХ на поточному і попередньому перехрестях в координаті. А оскільки за початок циклу в координаті зазвичай береться саме початок основного такту, призначеного для ЗХ, то він також визначає різницю між моментами початку циклу на цих перехрестях. Цей зсув має суттєве значення для оптимізації роботи світлофорних систем, впливає на плавність руху автомобілів, зменшує кількість заторів і покращує розподіл трафіку на перехрестях й ділянках доріг.

Основною метою дослідження є оцінка точності раніше розроблених аналітичних моделей, що дозволяють встановити значення часу випередження включення зеленого сигналу світлофора на черговому перехресті в ПК.

Оскільки для такої оцінки необхідне створення досить специфічних умов проведення експерименту, які в реальному транспортному процесі виникають вкрай рідко, для досягнення мети необхідним є використання засобів мікросимуляції руху ТП координованою ділянкою ММ. Інструментом для розробки імітаційної моделі обрано спеціалізований програмний продукт PTV VISSIM, який має всі необхідні можливості для отримання надійних результатів моделювання обраного об'єкта експериментальних досліджень.

У дослідженні проведено оцінювання двох аналітичних моделей визначення часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора в ПК, які базуються на врахуванні:

- середнього значення прискорення першого ТЗ з пачки ЗХ від стоп-лінії перехрестя в ПК [1];
- лінійно спадного характеру зміни прискорення автомобіля при русі ТЗ з місця [2].

Згідно з [1] час випередження включення зеленого сигналу світлофора на черговому координованому перехресті за постійного прискорення розраховується за залежністю

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

де  $V$  — швидкість руху пачки ЗХ, м/с;  $a$  — середнє значення прискорення першого автомобіля з пачки ЗХ, м/с<sup>2</sup>;  $L$  — середня довжина додаткового ТЗ, м;  $T_s$  — часовий інтервал безпеки руху, тобто проміжок часу, необхідний для подолання дистанції безпеки на поточній швидкості, с.

Модель лінійно спадного прискорення є спробою адекватнішого, ніж постійне прискорення, опису закономірностей розгону автомобілів. Згідно з дослідженнями Г. Лонга [2], для водіїв з по-

мірним стилем водіння, вона виглядає таким чином:

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

де  $a(t)$  — прискорення автомобіля в момент часу  $t$ , м/с<sup>2</sup>;  $A$  — максимальне прискорення автомобіля на старті з місця, м/с<sup>2</sup>;  $V(t)$  — швидкість автомобіля в момент часу  $t$ , м/с;  $b$  — параметр, який набуває від'ємного значення і є швидкістю зменшення прискорення зі збільшенням швидкості, с<sup>-1</sup>.

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

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

Враховуючи раніше отримані результати [1] оцінки нижньої межі часу випередження за двох розроблених моделях для одного додаткового ТЗ, що перешкоджає руху пачці автомобілів ЗХ, встановлено, що величина часу зсуву включення зеленого сигналу світлофора на черговому координованому перехресті залежатиме як від характеристик ділянки ММ, так і від характеристик ТЗ, що рухаються нею. Так, до перших можна віднести довжину ділянки ММ між СО в ПК, кількість смуг руху на ділянці тощо, до других — величину і характер зміни прискорення автомобіля на старті з місця (від стоп-лінії перехрестя), швидкість тощо.

## Результати дослідження

### Опис об'єкта експериментальних досліджень

Оскільки в рамках цього дослідження зроблено лише першу спробу оцінювання часу випередження на прикладі впливу на пачку автомобілів ЗХ одного додаткового ТЗ, то за об'єкт для проведення експериментальних досліджень доцільно вибрати односмугову ділянку ММ з двома регульованими перехрестями обладнаним світлофорами. Це дозволить детально проаналізувати вплив додаткового ТЗ на рух пачки ЗХ координованою ділянкою ММ без взаємного впливу автомобілів з пачок ЗХ, які б могли рухатися іншими смугами ММ. Також на ділянці ММ (перед другим перехрестям) передбачено можливість виїзду на неї додаткових ТЗ, які рухаються в тому ж напрямку, що й основний потік (пачка автомобілів ЗХ). Схема об'єкта експериментальних досліджень показана на рис. 1.

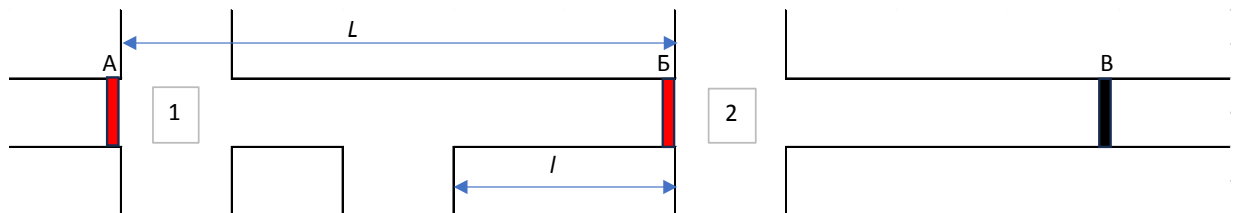


Рис. 1. Схема ділянки ММ для проведення експерименту в VISSIM:  $L$  — відстань між стоп-лініями перехрестя 1 і 2, м;  $l$  — відстань між місцем виїзду додаткових ТЗ на ділянку ММ і стоп-лінією перехрестя 2, м; А, Б — відповідно місця розташування стоп-ліній перехрестя 1 і 2; В — контрольна точка для заміру часу проїзду автомобілів з пачки ЗХ

### Обґрунтування величини діапазону зміни довжини ділянки ММ між СО для проведення імітаційного експерименту

Варто розуміти, що в рамках цієї частини експериментальних досліджень, ще до початку безпосереднього моделювання руху ТЗ, одним з до кінця не вирішених питань є обґрунтування діапазону змін довжини ділянки ММ між світлофорами (перехрестями) 1 і 2 (рис. 1). З цього приводу варто зазначити, що у дослідників з проблематики організації роботи скоординованих систем СО думки щодо ефективного їхнього розміщення один відносно одного розходяться. Так, наприклад, в [4] зазначається, що не існує універсального формального правила щодо мінімальної відстані між сусідніми перехрестями в ПК, а автори [5] зазначають, що оптимальна відстань між регульованими перехрестями залежить від швидкості, інтенсивності транспортного потоку та планувальних характеристик перехрестя.

Щодо цього питання в українській нормативній літературі лише вказано, що «Відстань між транспортними розв'язками з пересіченням потоків має забезпечувати зручність для користувачів і

визначається з наявних 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» [6]. Ці дані безпосередньо не пов'язані з питанням розміщення світлофорних засобів регулювання дорожнім рухом, але їх можна вважати певним орієнтиром в цьому напрямі.

Більше інформації щодо питання обґрунтування відстаней між СО міститься в іноземних настановах з ОДР, а також наукових звітах і статтях, стислі результати аналізу яких подані в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати аналізу джерел щодо питання вибору та обґрунтування довжини ділянок між СО в ПК**

Джерело	Довжина між СО	Коментар
Austroroads 2019 [7]	Більше 1 км	Координація дає переваги, коли світлофори встановлені на послідовних перехрестях
A. J. Bastable [8]	Менше 500 м	За такої відстані між СО скорочення затримок і зупинок зазвичай перевищує 20 %
The Metropolitan Planning Organization for the Genesee-Finger Lakes Region [9]	2640 футів $\approx$ 800 м (ідеальна відстань) 1600 м і більше (магістраль-магістраль) 800 м і більше (магістраль-не магістраль)	Коли відстань між СО стає меншою за чверть милі (1320 футів $\approx$ 400 м), транспортний потік вздовж ММ може бути порушений
Control Plan for I-25 Parallel Arterial Study [10], TRB 2003 [11]	Не менше 800 м	Враховується рівень трафіку на ММ
SETRA 2002 [4]	Мінімальна відстань 250 м	Така відстань може бути прийнятною, за умови якщо характеристики цієї ділянки дозволяють рухатися пачці ТЗ без перешкод
FHWA 2013 [12]	Більше 300 м	Менша відстань між СО не сприяє отриманню ефекту від введення координації
R. D. Henry [13]	1200 м	За умов розміщення СО на такій відстані координація є особливо ефективною
Ю. Я. Ройко, О. М. Грициунь [14], І. О. Хітров та ін. [15]	Не більше 800 м	За відстані більше ніж 800 м пачка ТЗ в 3Х розпадається
Е. В. Гаврилов та ін. [16]	100...300 м	Відстань між регульованими перехрестями на ММ
В. Д. [Кондрашова 17]	Не більше 1000 м	У разі введення магістральної координації
J. Gluck, H. S. Levinson, V. Stover [18]	330 м (час циклу 60...70 с) більше 600 м (час циклу більше 100 с)	За умов забезпечення швидкості руху пачки ТЗ на рівні 50 км/год. Висувається припущення про те, що кожен додатковий СО (більше ніж два на милію) призводить до зростання часу в дорозі на 7 %
A. J. Joubert, та ін. [19]	600 м	За такої відстані між СО забезпечується майже оптимальна мобільність під час пікових навантажень в умовах, пов'язаних з високими ТП
Jiawen Wang та ін. [20]	Середня відстань 189 м	Розглядаються питання оптимізації транспортних і пішохідних потоків на близько розташованих один з одним перехрестях. Побудовано оптимізаційну модель затримок, використання якої дозволяє досягти суттєвого скорочення затримок транспорту і пішоходів
M. M. Nesheli та ін. [21]	780 м	Результати моделювання в TRANSYT7F показують, що після координації затримки, час у дорозі та черги зменшуються

Результати аналізу нормативних і наукових літературних джерел, щодо питань визначення ефективної відстані між СО в ПК, свідчать про те, що основний вплив на довжину ділянок ММ у разі координації здійснюють: інтенсивність, швидкість ТП і час циклу — це як за умов, більшою мірою, формування нової ВДМ, так і функціонування існуючої. Тут постає питання. А що робити коли вже мережа доріг складена і потрібно вирішувати проблеми ОДР на реальній ММ? Варто зазначити, що в такому випадку доцільно користуватися засобами мікромоделювання дорожнього руху, результати використання яких, свідчать про можливість отримання ефекту навіть для об'єктів, на яких СО розташовані дуже близько один до одного [22]—[24]. Але потрібно розуміти, що отримані в цих роботах результати потребують ретельної перевірки на реальних об'єктах.

До того ж варто також зазначити суттєву різницю в оцінці граничних значень діапазону змін

довжин ділянок ММ в ПК у вітчизняних (300...400 м) і закордонних (600 м Європа (з виключеннями), 800...1200 м США, Австралія) дослідників. Основною причиною цього є наявні планувальні характеристики елементів ВДМ та підходи до транспортного планування в містах.

Враховуючи викладену інформацію, для отримання точніших меж діапазону зміни відстаней між СО доцільним буде проаналізувати наявні приклади впровадження ПК в містах України.

Звертаючи свою увагу на ділянки ММ українських міст, де впроваджено координацію або здійснено спроби впровадження, варто зазначити, що реальні відстані між регульованими перехрестями в ПК суттєво відрізняються від зазначених у вищезгаданих іноземних джерелах. Так, наприклад, в місті Рівне [25] на ділянці по проспекту Миру середнє значення довжини перегону між СО в ПК становить близько 245 м; в місті Харкові по проспекту Науки — 348 м [26]; в місті Дніпро по вулиці Набережна Перемоги — 421 м [27]; в місті Чернігів по вулиці Героїв Чорнобиля — 372 м [28]; в місті Вінниця на трьох магістральних вулицях: Київська (9 світлофорів), Брацлавська (5 об'єктів) і Немирівське шосе (8 світлофорів) — 456 м [29].

Для отримання точніших орієнтирів щодо меж діапазону можливих відстаней між СО вже впроваджених ПК міст України проведемо статистичний аналіз вищеподаної інформації про довжини ділянок ММ між СО в ПК, яку розширено за рахунок використання даних, отриманих від КП «ХАРКІВ-СИГНАЛ» по місту Харкову, а саме:

– відстані перегонів між СО по вул. Ак. Павлова: провулок Боткіна — вул. Салтівське Шосе 613 м, вул. Салтівське Шосе — провулок Салтівський 496 м, провулок Салтівський — вул. Камишева 511 м, вул. Камишева — вул. Тюринська 770 м, вул. Тюринська — просп. Ювілейний 356 м, просп. Ювілейний — вїзд І. Зарудного 349 м, вїзд І. Зарудного — ОККО 431 м, ОККО — вул. В. Стуса 412 м, вул. В. Стуса — вул. Пешкова 568 м, вул. Пешкова — вул. Валентинівська 530 м, вул. Валентинівська — вул. Героїв Праці 929 м;

– відстані перегонів між СО по просп. Героїв Харкова — від просп. П. Григоренко до вул. В. Мельникова 344 м, від вул. В. Мельникова до вул. Харківських Дивізій — 530 м;

– відстані перегонів між СО по просп. Гагаріна (в зворотному напрямку): від вул. Аерофлотської до просп. Л. Ландау 508 (547) м, від просп. Л. Ландау до вул. Південнопроектна — 861 (814) м, від вул. Південнопроектна до вул. Пильчикова — 1070 (1040) м, від вул. Пильчикова до просп. Героїв Сталінграду — 684 (723) м, від просп. Героїв Сталінграду до Сільпо — 385 (347) м, від Сільпо до вул. Зернова — 265 (307) м, від вул. Зернова до вул. Азербайджанська 471(485) м, від вул. Азербайджанська до вул. Сидоренківська — 604 (550) м, від вул. Сидоренківська до провул. Золотий — 640 (690) м, від провул. Золотий до Холідей — 625 (578) м, від Холідей до вул. Молочна — 747 (783) м;

– відстані перегонів між СО по вул. Клочківська (в зворотному напрямку): від узвіз Клочківський до Церква 221 (170) м, від Церква до проїзд Рогатинський 250 (323) м, від проїзд Рогатинський до вул. П. Григоренка — 474 (387) м;

– відстані перегонів між СО по вул. Полтавський Шлях (в зворотному напрямку): від вул. Дудинської до ТЦ Атлас 528 (510) м, від ТЦ Атлас до Рост 215 (220) м, від Рост до вул. П. Болбочана — 141 (164) м, від вул. П. Болбочана до вул. Кандаурова — 315 (270) м.

Обробка вхідної інформації надала масив даних, який складається з 66 значень довжин ділянок між СО. В результаті їхньої статистичної обробки в програмі STATISTICA 10 встановлено основні характеристики варіаційного ряду, які подані в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики варіаційного ряду значень довжин ділянок між СО на ММ

Характеристика вибірки	Значення
Обсяг вибірки, од.	66
Мінімальне значення відстані між СО, м	153
Максимальне значення відстані між СО, м	1055
Середнє значення відстані між СО, м	459,3
Стандартне відхилення, м	210,4
Мода, м	декілька з частотою 2 290; 286; 431; 530
Медіана, м	409,5

Отримані результати не дають однозначної відповіді про граничні значення меж діапазону зміни довжин ділянок між СО в ПК, які можна використовувати для імітаційного експерименту. Але з урахуванням практичного досвіду авторів щодо розробки ПК, а також, враховуючі результати проведеного аналізу наукових і практичних робіт, де викладені дані про вибір і обґрунтування довжини ділянок між регульованими перехрестями, можна зазначити, що верхню межу пошукового діапазону можна вибрати на рівні 800 м, як таку, за якої пачка ТЗ в ЗХ з високою ймовірністю розсипається. Щодо пошуку нижньої межі діапазону, то тут необхідно відзначити доцільність використання такої характеристики варіаційного ряду як мода. Мода, на відміну від статичних (простих) середніх, що значною мірою є абстрактною характеристикою сукупності, виступає як конкретна величина, що збігається з певними варіантами складових сукупності та відображає реальний характер випадкової величини.

Отримані результати статистичного аналізу варіаційного ряду не дають однозначної відповіді щодо конкретного значення моди по вибірці даних, тому доцільним буде її визначення по розподілу довжин ділянок між СО на ММ. При цьому на першому етапі доцільно визначити необхідну кількість інтервалів, для чого використовується загальновідома формула Sturges [30]. За обсягу вибірки 66 одиниць отримаємо значення кількості інтервалів, що дорівнює 8. Для такої кількості інтервалів наявного варіаційного ряду з використанням STATISTICA 10 побудовано розподіл довжин ділянок між СО на ММ (рис. 2).

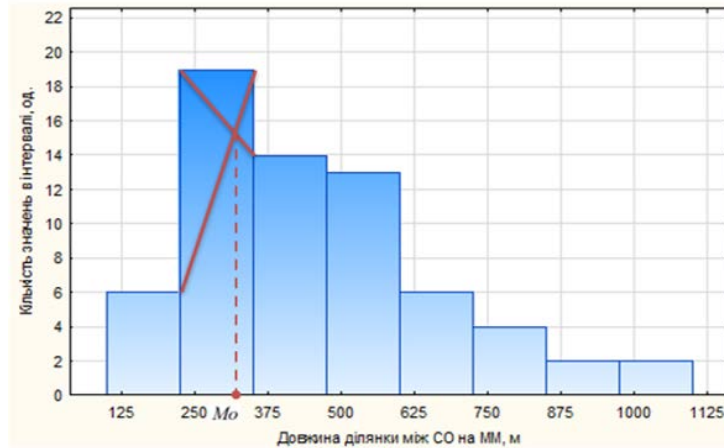


Рис. 2. Розподіл значень довжин ділянок між СО на ММ в ПК по інтервалах

Для визначення величини моди скористаємось формулою (4) і графічно візуалізуємо розрахунок цього показника (рис. 2)

$$Mo = \frac{f_{mo} - f_{mo-1}}{(f_{mo} - f_{mo-1}) + (f_{mo} - f_{mo+1})} \cdot i_{mo} + x_{mo}, \quad (4)$$

де  $x_{mo}$  — нижня межа модального інтервалу, м;  $i_{mo}$  — ширина модального інтервалу, м;  $f_{mo}$  — частота модального інтервалу, од.;  $f_{mo-1}$ ,  $f_{mo+1}$  — частота попереднього і наступного інтервалу відносно модального, од.

$$Mo = \frac{(19 - 6)}{(19 - 6) + (19 - 14)} \cdot 125 + 225 = 315,3 \text{ м.}$$

Отримане значення моди може відповідати орієнтури нижньої межі діапазону зміни довжин ділянок між СО на ММ, що використовуватиметься для проведення імітаційного експерименту у VISSIM.

Враховуючи зазначену інформацію, можна стверджувати, що для проведення експериментальних досліджень моделей розрахунку часу випередження включення дозвільного сигналу на черговому регульованому перехресті в ПК, доцільно використовувати діапазон зміни довжини перегонів між двома суміжними СО в межах 300...800 м з кроком зміни в 100 м. Варто розуміти, що нижня межа цього діапазону відповідає наявній ситуації з розташуванням СО на ділянках ММ українських міст, де впроваджено координацію, а верхня межа у 800 м взята як така, за якою пачка автомобілів у ПК з високою ймовірністю може розсипатися.

## Результати імітації руху ТП на вибраному для експериментальних досліджень об'єкті

Пошук оптимальних значень часу випередження є доволі специфічною задачею, яка характеризується впливом великої кількості випадковостей: характер прискорення ТЗ; швидкість ТЗ; поведінка і реакція водія; транспортна ситуація та ін. До цього варто також додати й відсутність практичних і ґрунтовних методик щодо його визначення і врахування під час обчислення тривалості часу циклу в ПК. Основною практикою натеper щодо перевірки і апробації результатів впровадження ПК є засоби мікромоделювання, які, на жаль, не мають відповідних інструментів для безпосереднього визначення часу випередження, це стосується і програмного забезпечення VISSIM. Тому для визначення часу випередження необхідне створення специфічних умов руху ТЗ на ділянці ММ в VISSIM, які будуть описані нижче.

Загальний процес формування моделі в VISSIM складається з таких етапів [31]:

- моделювання відрізків ВДМ;
- розміщення і моделювання СО;
- моделювання вхідних потоків (задано інтенсивність, склад ТП і поточкорозподіл за напрямками);
- моделювання маршрутів руху ТЗ;
- моделювання конфліктних зон з зазначенням правил пріоритету;
- безпосередньо сама імітація руху ТЗ.

Безпосередньо сам процес імітації руху ТЗ в моделі передбачає те, що автомобілі з пачки ЗХ стартують від стоп-лінії 1-го перехрестя та йдуть до контрольної точки В за перехрестям 2, на якому щоразу на них чекає один додатковий ТЗ.

Контрольна точка В розташовується так далеко від Б, щоб за максимального часу випередження і будь-якої довжини ділянки А–Б автомобіль, рушивши від стоп-лінії 1-го перехрестя, не наздоганяв додатковий ТЗ і додатковий ТЗ проїжджав точку В на своїй максимальній (крейсерській) швидкості. Відстань, яку проходить додатковий ТЗ від стоп-лінії 2-го перехрестя до точки В, не залежить від довжини ділянки А–Б, довжина ділянки Б–В залежатиме від потужнісних якостей додаткового ТЗ, характеру поведінки водія та значення часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора на перехресті 2. Цікавість до знання довжини ділянки Б–В з погляду проведення імітаційного експерименту полягає в тому, що можна відслідковувати місце злиття пачки автомобілів у ЗХ і додаткового ТЗ за різних значень часу випередження в кожній серії дослідів.

Зі свого боку, поява додаткового ТЗ на ММ здійснюється за рахунок створення в VISSIM другорядної дороги за 100 м від перехрестя 2. Відстань, в цьому випадку, не принципова, головне щоб до моменту наближення автомобілів з пачки ЗХ до другого перехрестя додатковий ТЗ займав статичну позицію перед стоп-лінією 2-го перехрестя. Сама подача додаткових ТЗ на магістраль і їхня кількість регулюються СО, що встановлено під час виїзду додаткового ТЗ з другорядної дороги.

За параметри, що варіюються в імітаційній моделі взято: довжину ділянки між СО А–Б (довжина змінюється від 300 м до 800 м з кроком 100 м); час випередження включення дозвільного сигналу на перехресті 2 (змінюється в діапазоні від 0 с до 10 с); стартове випадкове число (налаштування VISSIM, що впливає на формування складу і інтервалу подачі ТП в імітаційній моделі).

Послідовність імітації руху ТЗ у розробленій моделі така:

1. На першому етапі проводяться базові налаштування моделі: визначаються параметри роботи СО (тривалість циклу, його проміжних і основних тактів) на перехрестях 1 і 2, а також на другорядній дорозі для випуску на ММ додаткових ТЗ; підбираються параметри ТП, що рухаються координованою ділянкою ММ, і другорядною дорогою; визначається модель руху ТЗ (манера водіння), за якою забезпечується рівномірний рух пачки ЗХ за досягнення в імітації своєї крейсерської швидкості (в рамках цього експерименту використовується модель «Wiedemann 99» [31]). Другорядний напрямок налаштовується таким чином, щоб за дозвільний сигнал світлофора випускати лише один додатковий ТЗ. Обмеження щодо швидкості руху відповідають умовам руху ТЗ в умовах міста.

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, після старту від стоп-лінії перехрестя 1). Отримане значення часу руху ділянкою А–Б використовується для налаштування СО на перехресті 1 як час зсуву включення дозвільного сигналу світлофора на перехресті 1. Також фіксується максимальна швидкість руху автомобіля ділянкою і його прискорення на старті від стоп-лінії перехрестя 1. Результати імітації руху ТЗ у розробленій моделі за умов вільного руху для ділянки ММ довжиною 300 м подано в табл. 3.

Таблиця 3

**Результати визначення часу проїзду першого автомобіля з пачки ЗХ за умов вільного руху ділянкою А–Б довжиною 300 м**

Стартове випадкове число	Час подолання ділянки між СО першим автомобілем з пачки ЗХ у разі вільного руху у VISSIM, с		
	початок імітації	закінчення імітації	результат
1	65,274	87,899	22,625
2	7,285	31,188	23,903
3	17,5	41,09	23,59
4	17,57	41,305	23,735
5	6,857	30,104	23,247
6	41,631	63,869	22,238
7	15,451	38,082	22,631
8	58,723	80,988	22,265
9	15,045	36,332	21,287
10	27,787	51,536	23,749

3. На третьому етапі проводиться моделювання руху пачки автомобілів ЗХ координованою ділянкою ММ, яка зустрічається з додатковим ТЗ біля стоп-лінії перехрестя 2 за умов призначення різних значень часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора на перехресті 2. При цьому фіксується час руху пачки автомобілів ЗХ ділянками А–Б і А–В. В кожній серії дослідів вибирається одне значення часу випередження, що відповідає мінімальному значенню часу подолання ділянки А–Б автомобілями з пачки ЗХ, тобто за умов безперешкодного руху ділянкою (коли скоординовані ТЗ не скидають швидкість на підході до 2-го перехрестя). Результати імітації руху ТЗ у розробленій моделі та вибору величини часу випередження для ділянки ММ довжиною 300 м подано в табл. 4.

Таблиця 4

**Фрагмент результатів визначення часу подолання ділянки А–Б довжиною 300 м**

Номер серії дослідів / Стартове випадкове число (Random seed increment)	Номер дослідів	Величина часу випередження, с	Час подолання ділянки між СО першим автомобілем з пачки ЗХ у VISSIM		
			початок	закінчення	результат
1	1	0	8,943	34,298	25,355
	2	1	8,562	33,024	24,462
	.....	.....	.....	.....	.....
	8	7	12,441	35,463	23,022
	9	8	15,077	37,993	22,916
	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>14,679</b>	<b>37,404</b>	<b>22,725</b>
2	11	10	14,679	37,404	22,725
	12	0	8,017	34,289	26,272
	13	1	8,06	33,35	25,29
	.....	.....	.....	.....	.....
	19	7	14,434	38,571	24,137
	20	8	14,625	38,755	24,13
<b>21</b>	<b>9</b>	<b>13,761</b>	<b>37,877</b>	<b>24,116</b>	
22	10	13,761	37,877	24,116	
.....	.....	.....	.....	.....	
9	89	0	8,757	32,26	23,503
	90	1	9,354	32,365	23,011
	.....	.....	.....	.....	.....
	96	7	12,33	33,636	21,306
	<b>97</b>	<b>8</b>	<b>12,364</b>	<b>33,657</b>	<b>21,293</b>
	98	9	12,364	33,657	21,293
99	10	12,364	33,657	21,293	
10	100	0	7,746	34,016	26,27
	101	1	5,326	30,901	25,575
	.....	.....	.....	.....	.....
	107	7	4,157	28,736	24,579
	<b>108</b>	<b>8</b>	<b>1,666</b>	<b>25,515</b>	<b>23,849</b>
	109	9	1,666	25,515	23,849
110	10	1,666	25,515	23,849	



Проведення описаного імітаційного експерименту передбачає реалізацію 60 серій дослідів, в кожній з яких буде по 11 імітацій.

### Результати оцінки точності розрахунку часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора в ПК за розробленими аналітичними моделями

Вибрані за результатами імітаційного експерименту значення часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора на перехресті 2 для розгону додаткового ТЗ є основою для оцінювання точності розроблених аналітичних моделей (1) і (3). Для проведення такого оцінювання в кожній серії дослідів необхідно вибрати час випередження включення дозвільного сигналу світлофора, якому відповідає перше мінімальне значення часу подолання ділянки А–Б першим автомобілем з пачки ЗХ і розрахувати на основі параметрів, що характеризують вибрану імітацію, складові формул (1) і (3). Вибрані імітації позначено напівжирним написом в табл. 4.

До прикладу, розрахунок часу випередження для моделей (1) і (3) для першої серії десятого дослідів

$$V = \frac{53,55}{3,6} = 14,88 \text{ м/с}; \quad a = \frac{2,51}{2} = 1,255 \text{ м/с}^2; \quad \Delta t_d = \frac{14,88}{2 \cdot 1,255} + \frac{5,5}{14,88} + 3 = 9,30 \text{ с};$$

$$b = \frac{1,255}{14,88} = 0,0844; \quad A = 0,0844 \cdot 2 - \left( \frac{0,0844 \cdot (0 + 14,88)}{2} \right) = 1,8825 \text{ м/с}^2;$$

$$\Delta t_d = \frac{1}{-0,0844} \left[ \ln \left( \frac{-0,0844 \cdot 14,88}{1,8825} + 1 \right) \cdot \left( 1 + \frac{1,8825}{-0,0844 \cdot 14,88} \right) - 1 \right] + \frac{5,5}{14,88} + 3 = 8,71 \text{ с}.$$

Для інших серій імітацій розрахунки часу випередження за аналітичними моделями проводяться аналогічно. Для оцінки точності результатів розрахунку часу випередження моменту включення дозвільного сигналу на черговому перехресті в координаті використано стандартні статистичні показники, результати визначення яких для ділянки А–Б довжиною 300 м подано в табл. 5.

Таблиця 5

Результати експериментальної перевірки аналітичних моделей визначення часу випередження для ділянки А–Б довжиною 300 м

Серія імітації/ стартове випадкове число	Час зсуву в імітації, с	Формула (1)			Формула (3)		
		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	8,1	8,61	-6,46	-0,51	8,09	-0,08	0,01

Аналіз результатів експериментальної перевірки моделей визначення часу випередження включення дозвільного сигналу на черговому СО в ПК свідчить про вищу точність моделі, що враховує лінійно спадний характер зміни прискорення автомобіля під час руху автомобіля від стоп-лінії попереднього перехрестя в плані координаті (рис. 3).

$$n = \left( \frac{s \cdot z}{E} \right)^2; \quad (5)$$

$$n = \left( \frac{s \cdot z}{\mu \cdot \varepsilon} \right)^2, \quad (6)$$

де  $n$  — мінімальна кількість прогонів (імітацій), од.;  $z$  — квантиль стандартного нормального розподілу, що відповідає заданій довірчій ймовірності (при довірчій ймовірності 0,95 ця величина дорівнює 1,96);  $s$  — стандартне відхилення генеральної сукупності;  $E$  — прийнята помилка розрахунку в абсолютних одиницях (0,5 с);  $\mu$  — середнє значення генеральної сукупності;  $\varepsilon$  — допустиме відхилення оцінки середнього значення ( $\varepsilon = 0,05$ ).

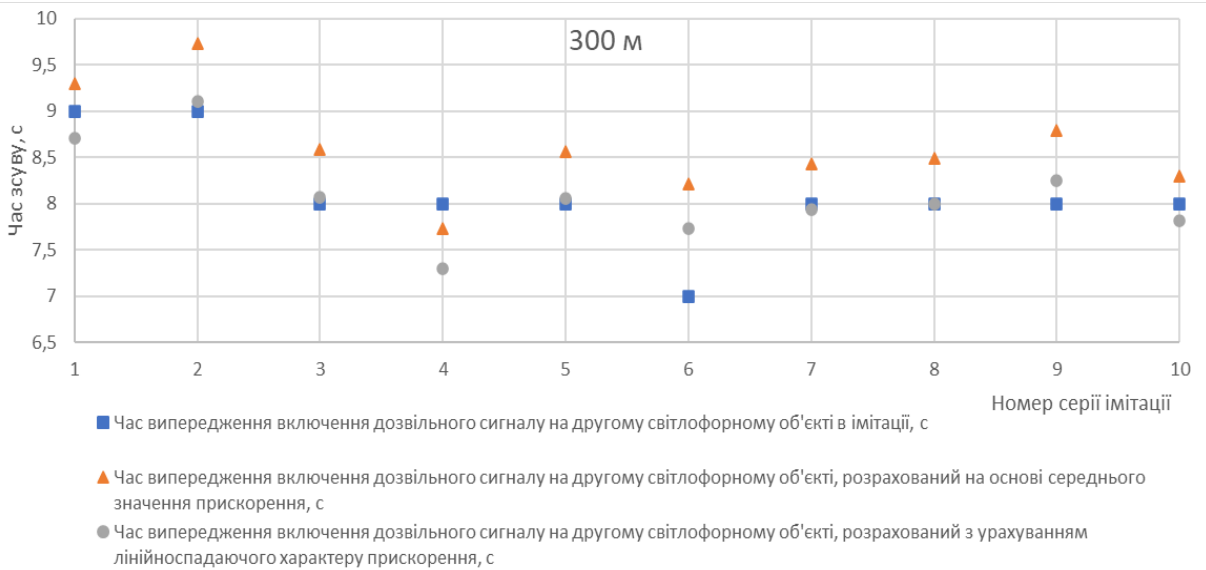


Рис. 3. Порівняння результатів визначення часу випередження на прикладі ділянки довжиною 300 м

Результати розрахунків необхідної кількості імітацій в кожній серії за формулами (5) і (6) подано в табл. 6.

Таблиця 6

Результати визначення необхідного обсягу прогонів імітаційної моделі в кожній серії

Довжина ділянки А–Б, м	Необхідна кількість прогонів моделі в VISSIM	
	формула (5)	формула (6)
300	5	8
400	7	10
500	4	5
600	3	4
700	3	4
800	5	8

Отримані результати переконливо свідчать про достатню точність отриманих аналітичних моделей визначення часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора на черговому перехресті і можливість їхнього використання для розрахунку раціональних параметрів світлофорного управління в ПК. Результати кількісної і якісної оцінки точності результатів розрахунку часу випередження з використанням результатів імітаційного моделювання у VISSIM підтверджують перевагу моделі, яка враховує лінійно спадний характер зміни прискорення ТЗ.

### Висновки

Час випередження завчасного включення дозвільного сигналу світлофора є важливим параметром для налаштування ефективного управління СО на скоординованих ділянках ММ, оскільки його використання дозволяє забезпечити безперешкодний рух пачки ТЗ у ЗХ. Сучасні настанови з ОДР не містять інформації щодо вибору і обґрунтування величини часу випередження, а лише містять деякі рекомендації щодо визначення величини зсувів включення дозвільного сигналу світлофора на черговому в ПК перехресті, при цьому, не деталізуючи час випередження.

Завдання пошуку часу випередження є доволі специфічним і для свого вирішення потребує створення особливих умов для руху ТЗ на вибраному для дослідження об’єкті, які майже неможливо відтворити і забезпечити на реальній ділянці ВДМ, тому за основний інструмент моделюван-

ня часу випередження доцільно використовувати засоби мікромоделювання дорожнього руху, до прикладу, VISSIM.

Результати експериментальної оцінки аналітичних моделей визначення часу випередження свідчать про їхню достатньо високу точність. Серед двох порівняних моделей найближчою за результатами імітації руху ТЗ на вибраному об'єкті є аналітична модель, яка враховує лінійно спадний характер зміни прискорення ТЗ під час руху координованою ділянкою ММ, відхилення середнього значення часу випередження за її використання на ділянках ММ, довжина яких змінюється в діапазоні 300...800 м, становить 0,04 с (у порівнянні з моделлю, що враховує середнє значення прискорення ТЗ, відхилення становить 0,57 с).

Прагнення забезпечити абсолютно безперешкодне просування пачки автомобілів за наявності декількох додаткових ТЗ на наступному перехресті призведе до значно більшої частки неефективно використаного часу циклу (принаймні через обмеження руху другорядних вулиць), суттєвого зменшення пропускної здатності координованого перехрестя, швидкого збільшення насиченості другорядних вулиць і, як наслідок, суттєвого збільшення затримок на другорядних під'їздах до перехрестя. Ці наслідки можуть стати занадто високою ціною за комфорт пересування по координованій магістралі, оскільки координація повинна враховувати час у дорозі для всіх користувачів. Тому, за наявності додаткових ТЗ, введення часу випередження в часовому ПК є актуальним лише за низької інтенсивності руху на під'їздах до другорядних вулиць.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] П. Ф. Горбачов, і С. В. Любий, «Методика оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі,» *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, № 22, с. 81-91, 2022. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2> .
- [2] G. Long, "Acceleration Characteristics of Starting Vehicles," *Transportation Research Record*, no. 1737(1), pp. 58-70, 2000. <https://doi.org/10.3141/1737-08> .
- [3] П. Ф. Горбачов, С. В. Любий, і К. В. Діденко, «Експериментальні дослідження часу випередження (зсуву) включення зеленого сигналу світлофора на черговому координованому перехресті,» *Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології*, матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Харків: ХНАДУ, 2023, с. 104-107.
- [4] SETRA. *The design of interurban intersections on major roads*, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes Centre de la Sécurité et des Techniques Routières, Bagneux Cedex, France, 2002, 133 p.
- [5] T. F. Fwa, *The Handbook of Highway Engineering*. CRC Press, London, UK, 2005, 888 p.
- [6] ДБН В.2.3-5:2018, *Вулиці та дороги населених пунктів Зміна № 1*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/mrqyk> .
- [7] Austroads. *Guide to Traffic Management Part 9: Traffic Operations*, Ed. 3.1, Austroads Publication, no. AGTM09-19. Austroads, Sydney, 2019, 260 p.
- [8] A. J. Bastable, "The economic and social impact of dynamic signal coordination in Sydney," in *10th Australian Road Research Board conference*, Sydney, New South Wales, Australian Road Research Board, Vermont South, Vic, 1980. vol. 10, no. 4, pp. 245-51.
- [9] *Genesee transportation council*. The Metropolitan Planning Organization for the Genesee-Finger Lakes Region [Electronic resource]. Available: <https://www.gtcmppo.org/sites/default/files/pdf/2007/IntersectionSpacing-TrafficSignalSpacing.pdf> .
- [10] *Weld County Government*. [Electronic resource]. Available: <https://www.weld.gov/files/sharedassets/public/departments/public-works/documents/nipa-access-control-plan-memo-051320.pdf>
- [11] TRB. *Access Management Manual*, Transportation Research Board Committee on Access Management, National Research Council, Washington, DC, 2003, 125 p.
- [12] FHWA. *Signalized Intersections: An Informational Guide*, Federal Highway Administration, FHWA-13-027, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2013, 323 p.
- [13] RD. Henry, "Signal timing on a shoestring," Report. Washington, DC: US Department of Transportation Federal Highway Administration; Mar. Report no.: FHWA-HOP-07-006, 2005, 54 p.
- [14] Ю. Я. Ройко, і О. М. Грицунь, «Підвищення ефективності функціонування ділянок вулично-дорожньої мережі в умовах координованого регулювання,» *Наукові нотатки*, № 45, с. 472-476, 2014.
- [15] І. О. Хітров та ін., «Аналіз транспортних затримок в центральній частині міста та шляхи їх зниження,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2(14), с. 131-139, 2021. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-131-139> .
- [16] М. Ф. Дмитриченко, Ред., *Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху*. Київ, Україна: Знання України, 2007, 452 с. (5 кн./ Е. В. Гаврилов, та ін.; кн. 4).
- [17] В. Д. Кондрашова, «Магістральне управління транспортних потоків,» *Матеріали конференції*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/52334/1/%D1%871-161-163.pdf> .
- [18] J. Gluck, H. S. Levinson, and V. Stover, "Impacts of Access Management Techniques," NCHRP Report 420, Transportation Research Board, Washington, DC, 1999, 157 p.
- [19] A. J. Joubert et al., *Lynnwood road arterial study : the effect of intersection spacing on arterial operation*. [Electronic resource]. Available: <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/8258/95%20Joubert.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .

- [20] Jiawen Wang et al., “A Signal Optimization Model of Adjacent Closely Spaced Intersections Which Optimizes Pedestrian Crossing,” *Journal of Advanced Transportation*. ID 3964616, 14 p., 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/3964616> .
- [21] *Evaluation of effect of traffic signal coordination system on congestion*. [Electronic resource]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/228650117\\_Optimization\\_of\\_Traffic\\_Signal\\_Coordination\\_System\\_on\\_Congestion\\_A\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/228650117_Optimization_of_Traffic_Signal_Coordination_System_on_Congestion_A_Case_Study) .
- [22] Yuanyang Zou et al., “Signal adaptive cooperative control of two adjacent traffic intersections using a two-stage algorithm,” *Expert Systems with Applications*, no. 174, pp. 114746. 2021. ISSN 0957-4174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114746> .
- [23] X. Ma, F. Hu, Y. Qi, and W Zhang, “Optimization of Signal Timing Coordination at Short-spaced Intersections,” on *34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 2022, pp. 2721-2726. <https://doi.org/10.1109/CCDC55256.2022.10033746> .
- [24] Q. Wang et al., “Offline Arterial Signal Timing Optimization for Closely Spaced Intersections,” on *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, USA, 2021, pp. 344-350. <https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00062> .
- [25] М. С. Кристопчук та ін., «Дослідження координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста,» *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, № 1(16), с. 82-90, 2021. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.511> .
- [26] *Розроблення схеми координації світлофорів на просп. Науки (заключний звіт)*. Харків, Україна: ХНАДУ, 2021, 126 с, № держ. реєстрації 0121U113663.
- [27] *На дорогах з'явилися знаки «Зелена хвиля». Що вони означають і як допомагають водіям*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tsn.ua/ukrayina/na-dorogah-z-yavilisyaznaki-zelena-hvilya-scho-voni-oznachayut-i-yak-dopomagayut-vodiyam-1487502.html> .
- [28] *Зелена хвиля*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://newch.tv/zelena-khvylya-35661/> .
- [29] «На проект «Зеленої хвилі» на дорогах Вінниці витратять понад мільйон,» *Вінницький інформаційний портал*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vezha.ua/na-proekt-zelenoyi-hvyli-na-dorogah-vynnytsi-vytratyat-ponad-miljon> .
- [30] H. Sturges, “The choice of a class-interval,” *J. Amer. Statist. Assoc.*, no. 21, pp. 65-66, 1926.
- [31] *PTV Vissim 23. Manual*. PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2023, 1220 p.
- [32] R. N. Fries, Y Qi, and S. Leight, “How Many Times Should I Run The Model? Performance Measure Specific Findings from VISSIM Models in Missouri,” *Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting*. 2017, Washington, DC: TRB. 16 p.
- [33] R. Dowling, A. Skabardonis, and V. Alexiadis, *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. USDOT, Washington, D.C., 2004, 146 p.
- [34] *VDOT. Traffic Operations Analysis Tool Guidebook*. Richmond, 2013, 118 p.
- [35] *NDOT. Corsim Modeling Guidelines*. Carson City: Nevada Department of Transportation, 2012, 46 p.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.03.2024

**Горбачов Петро Федорович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, e-mail: [gorbachov.pf@gmail.com](mailto:gorbachov.pf@gmail.com) ;

**Любий Євген Володимирович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики, e-mail: [lion\\_khadi@ukr.net](mailto:lion_khadi@ukr.net).

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків;

**Макаричев Олександр Володимирович** — д-р фіз.-мат. наук, доцент, професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу, e-mail: [amsol2904@gmail.com](mailto:amsol2904@gmail.com) .

Херсонський національний технічний університет, Херсон

**P. F. Horbachov<sup>1</sup>**  
**O. V. Makarichev<sup>2</sup>**  
**Ye. V. Liubiy<sup>1</sup>**

## Simulation Modeling of the Advance Time in Coordination Plan on City Highways

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University;

<sup>2</sup>Kherson National Technical University

*The offsets is one of the most important parameters affecting the effectiveness of coordinated traffic signal control. It is used to ensure the continuous movement of the platoon progression on coordinated segments of the road network. In addition, the complexity of the task of finding the optimal values of the advance time of coordinated traffic signals on urban highways is that it is taken into account in: the time of the traffic light cycle and the time of the traffic light offset* *Exper-*

mental evaluation of the accuracy of analytical models for determining the advance time of the traffic signal, based on the average acceleration and the linearly decreasing nature of the change in the acceleration of a car when moving from a standstill from the stop line of the intersection in coordination plan. Using micromodeling tools (VISSIM), a simulation model of car traffic on a one-lane coordinated segment of a city highway was formed. To obtain the basic settings of traffic lights, experiments were conducted on the time of car movement in free conditions for coordinated sections of 300...800 m in length. After that, the progression platoon movement was simulated between two coordinated intersections at different values of the advance time. Based on the determined minimum values of the vehicle travel time along the coordinated segment, the corresponding values of the advance time are determined, which are used to assess the accuracy of its calculation using the proposed analytical models. The results of the experimental evaluation of the analytical models for determining the advance time indicate their sufficiently high accuracy. The highest accuracy is characterized by the analytical model that takes into account the linearly decreasing nature of the change in vehicle acceleration when moving along a coordinated segment of a city highway. The deviation of the average value of the advance time when it is used on sections whose length varies in the range of 300...800 m is 0.04 s. The presented analytical models are based on the assumption that it is necessary to ensure a smooth movement of the progression platoon and taking into account the influence of different characteristics of vehicle acceleration when driving along coordinated segments of city highways. The use of the developed analytical models makes it possible to obtain an initial starting point for adjusting the advance time of traffic signal cycles in coordination plan.

**Keywords:** progression, simulation modeling, city highway, traffic management, acceleration, traffic signals, advance time, PTV VISSIM.

**Horbachov Petro F.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Transport Systems and Logistics, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com ;

**Makarichev Oleksandr V.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor of the Chair of Transport Systems and Technical Service, e-mail: amsol2904@gmail.com ;

**Liubyi Yevhen V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Transport Systems and Logistics, e-mail: lion\_khadi@ukr.net