

Любий Є.В., Горбачов П.Ф., Капінус С.В., Губарєв О.С.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЧАСУ ВИПЕРЕДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛАНУ КООРДИНАЦІЇ

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення ефективності систем координованого керування дорожнім рухом у містах за рахунок врахування часу випередження, необхідний для розгону додаткових транспортних засобів, що накопичуються перед стоп-лінією чергового в плані координації перехрестя. На відміну від закордонних практик впровадження адаптивних систем керування транспортними потоками, в українських умовах через фінансові та інфраструктурні обмеження основним інструментом ефективного керування рухом транспорту у містах залишається саме координована робота світлофорних об'єктів (зелена хвиля). Наявні методики побудови планів координації не враховують впливу додаткових транспортних засобів, що з'являються на підходах до скоординованих перехресть, а також часу, необхідного для розгону черги до швидкості руху основного потоку. Це знижує загальну ефективність координації та унеможливує забезпечення рівномірного просування транспортних засобів уздовж магістралі з координованим керуванням. Питання визначення і врахування часу випередження залишається відкритим, попри численні спроби оптимізації стрічки часу зеленої хвилі та гармонізації швидкості руху транспортних потоків. Для експериментального оцінювання впливу часу випередження на ефективність плану координації створено імітаційну транспортну модель ділянки магістралі з координованим керуванням (на основі прикладу з HCM 2016) у середовищі VISSIM. Змінним параметром у моделі є час випередження. Результати моделювання засвідчують, що середній час поїздки уздовж магістралі зменшується зі збільшенням часу випередження до 6 секунд, проте подальше його зростання призводить до різкого погіршення умов руху на другорядних напрямках. Отримані результати свідчать, що врахування часу випередження у плані координації здатне покращити умови руху основних транспортних потоків у зеленій хвилі, проте потребує одночасного моніторингу транспортного навантаження на другорядних напрямках.

Ключові слова: керування дорожнім рухом, план координації, регульовані перехрестя, транспортне моделювання, час випередження, VISSIM.

ВСТУП

Найбільш поширеною світовою практикою ефективного керування дорожнім рухом (КДР) у містах є використання адаптивних систем керування транспортними потоками (ТП), які в режимі реального часу аналізують трафік і автоматично змінюють режими роботи світлофорних об'єктів. Застосування таких систем дозволяє фахівцям з організації дорожнього руху оперативно вирішувати конфліктні ситуації, що можуть виникати в процесі руху ТП у межах міських територій, а також отримувати оптимальні параметри світлофорного регулювання з прив'язкою до відповідного часу доби, дня тижня та/або рівня навантаження рухом ділянок вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Адаптивні системи керування ТП ефективно працюють у багатьох закордонних містах де існує належне фінансування, сучасна транспортна інфраструктура, високошвидкісні канали зв'язку та достатня технічна підтримка.

На відміну від цього, в українських містах адаптивні системи керування ТП застосовуються поодинокі, що зумовлено обмеженими бюджетами, технологічною недосконалістю транспортних мереж, слабкою комунікаційною інфраструктурою, особливо в периферійних районах міських територій. У результаті цього основним інструментом ефективного КДР на елементах міської ВДМ залишаються координовані системи керування світлофорними об'єктами, які, здебільшого, створені без належного обґрунтування основних параметрів – часу циклу, зсувів, тривалості фаз, що відкриває значні резерви для удосконалення методів побудови планів координації (ПК) або іншими словами, зеленої хвилі (ЗХ), та, відповідно, підвищення ефективності КДР в містах.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вивченню проблематики побудови нових і удосконалення існуючих методів побудови ПК на міських магістралях присвячено велику кількість наукових і практичних робіт [1-3], у переважній більшості з яких, для визначення параметрів світлофорного регулювання у системах з координованим керуванням використовується формула Вебстера, яка має певні обмеження при її застосуванні на об'єктах із високим рівнем транспортного навантаження. До того ж у сучасній практиці використання координованих систем керування світлофорними об'єктами на міських магістралях при визначенні параметрів їх роботи не враховуються додаткові транспортні засоби (ТЗ), які можуть з'являтися з другорядних напрямків по відношенню до руху основного потоку ТЗ у ЗХ та/або ж є

розворотними ТЗ і накопичуються перед стоп-лінією координованого світлофорного об'єкту, не повною мірою формалізована взаємодія додаткових ТЗ з пачкою ТЗ ЗХ, а також невирішеною залишається проблематика гармонізації швидкості руху пачки ТЗ ЗХ координованою ділянкою міської ВДМ [3-5].

Проблему підтримання рівномірного руху ТЗ уздовж ділянки магістралі з координованим керуванням почали досліджувати досить давно [6] із посиланням на ще раніше опубліковані матеріали [7]. Основні дослідницькі зусилля щодо забезпечення рівномірного руху ТП були зосереджені на модифікації методів, заснованих на максимізації ширини стрічки часу ЗХ і розроблених для врахування впливу черг перед перехрестями на просування пачок ТЗ ЗХ. При розробці MULTIBAND, авторами [8] і [9], окрім можливості змінювати ширину стрічки часу ЗХ в залежності від інтенсивності руху ТП на окремих ділянках, передбачено також врахування параметру часу розсіювання черги. Водночас автори не наводять кількісної оцінки цього параметра, очевидно через складність представлення випадкового процесу розсіювання черги ТЗ одним конкретним значенням параметра. Проте можливість задання цього параметра в MULTIBAND підкреслює його важливість для координації та актуальність отримання обґрунтованих кількісних оцінок для нього.

Актуальність цього питання також підтверджується дослідженням [10], де представлено можливість програми PASSER II-84, яка обчислює ймовірність розсіювання черги на підходах до перехресть. Подібні функції має програма TRANSYT [11], яка дозволяє оцінювати довжину черги на основі моделі руху ТП. Таким чином, спільною рисою базових програмних продуктів для координації світлофорного регулювання з фіксованим циклом на магістралях є можливість врахування черг перед перехрестями під час розробки ПК та відсутність конкретних значень керівного параметра для управління цими чергами.

Автори [12] поставили перед собою завдання розширити можливість для руху ТЗ магістраллю з бажаною швидкістю без зупинок. Вони розробили програму BANDTOP, що реалізує їхній власний алгоритм, який максимізує ширину стрічки часу ЗХ за допомогою змішаного цілочислового програмування. На кожному перехресті вони поділили час між початком сигналу світлофора, що дозволяє рух, та початком стрічки часу ЗХ на дві частини: одна частина призначалася для розсіювання черг ТЗ, що здійснюють поворот, а інша – для пропуску ТЗ, що рухаються прямо, які не встигли перетнути перехрестя під кінець попереднього сигналу світлофора, що дозволяє рух. Автори зазначають, що їхня програма автоматично розраховує ці часові інтервали, але не надають значень параметру часу розсіювання черги. Результати роботи BANDTOP порівнювалися з результатами роботи MAXBAND та PASSER-II із використанням TRANSYT і NETSIM. Виявилося, що BANDTOP забезпечував скорочення часу поїздки та зменшення кількості зупинок, однак, подальшого застосування ця програма не набула. Для оптимізації ширини стрічки часу ЗХ при безперервному русі уздовж магістралі з координованим керуванням автори [13] розробили нову модель змішаного нелінійного цілочислового програмування з метою забезпечення проходження ТЗ максимальної кількості наступних перехресть без зупинок. У цій моделі вони запропонували метод розрахунку часу розсіювання черги шляхом введення параметрів інтенсивності прибуття ТЗ на під'їздах головного та другорядного напрямків. Однак у реальних умовах ці інтенсивності важко оцінити однозначно. Більше того, метод, описаний у [13], ґрунтується на припущенні, що інтенсивності прибуття ТЗ є відомими. Автори [14] стверджують, що на початку зеленого сигналу світлофору швидкість розсіювання черги може бути наближеною до швидкості потоку насичення. По суті, вони розглядають час розсіювання черги як добуток кількості ТЗ у черзі на інтервал насиченого руху. Це може наблизити просування пачки ЗХ до руху без зупинок, але не гарантує проїзду через перехрестя без уповільнень.

Дослідження [15] розглядає проблему максимізації ширини стрічки часу ЗХ для обох напрямків уздовж магістралі з урахуванням різних обсягів лівоповоротного руху, що робить його актуальним для теми забезпечення рівномірного руху ТП за умов координованого керування. Автори дослідження розробили ПК як для обох напрямків руху ТЗ по магістралі, так і для лівоповоротного руху з другорядних вулиць, що виходять на магістраль. Їхній основний метод проєктування двосторонньої ЗХ зі змінною шириною стрічки часу ЗХ передбачає переназначення ліній ЗХ для врахування часу розсіювання черги. Розроблений ПК є корисним у випадках інтенсивного лівоповоротного руху, що виходить на магістраль з координованим керуванням, і дозволяє розвантажити принаймні частину черги, проте не гарантує просування пачки ЗХ з постійною швидкістю.

Для проєктування ПК на магістралях з інтенсивним поворотним рухом і обмеженнями щодо

відстані між перехрестями автори [16] запропонували моделі, які засновуються на логіці MAXBAND. Ці моделі спрямовані на зменшення загальних затримок шляхом визначення відповідних часток тривалості дозвільного сигналу світлофору, збереження ширини стрічки часу ЗХ та запобігання відтоку ТЗ з лівоповоротних смуг, що може блокувати прямий рух. Запропонований підхід суттєво покращує результати планування координації з використанням MAXBAND. Черга на перехресті розглядається не стільки як причина зниження швидкості просування пачки ТЗ ЗХ, скільки як джерело додаткових затримок, що є актуальним у рамках даного дослідження.

У 2021 році автори [1] намагалися розробити ПК таким чином, щоб пачка ТЗ ЗХ не знижувала швидкість при проходженні наступних у ПК перехресть. Для того, щоб розігнати ТЗ з черги до швидкості руху пачки ТЗ ЗХ окрім врахування часу розсіювання черги (2 секунди на ТЗ) було подовжено на 4 секунди тривалість дозвільного сигналу світлофору для основних напрямків руху ТЗ. Цього часу виявилось недостатньо, щоб пачка ТЗ ЗХ мала змогу просуватися через перехрестя без помітного зниження швидкості. Було встановлено, що для уникнення значного зниження швидкості за розробленим ПК ТЗ у пачці ЗХ повинні рухатися зі швидкістю близько 40 км/год замість обраної швидкості руху ЗХ 50 км/год [1], що зменшує ефективність координації. Це вказує на необхідність оцінки часу випередження необхідного для розгону ТЗ, які стоять перед черговим в координації перехрестям, до швидкості руху ЗХ.

Ще один підхід щодо забезпечення рівномірного просування пачок ТЗ ЗХ полягає у впровадженні алгоритмів формування пачок. Ці алгоритми спрямовані на організацію ТЗ у пачки та адаптацію їхньої швидкості для прибуття на наступне скоординоване перехрестя на високій швидкості і проходження його якомога швидше за конкретних транспортних умов [17]. Такі алгоритми є перспективними, проте обмеження полягає в тому, що вони працюють із автономними ТЗ, і немає чітких рекомендацій щодо їх застосування для управління ТП, що складається зі звичайних ТЗ. Крім того, необхідні додаткові дослідження для інтеграції цих алгоритмів у методи координації світлофорів.

Інший підхід до забезпечення більш рівномірного руху ТЗ ЗХ представлено в роботі [18], де запропоновано використання моделі коефіцієнтів коригування для врахування впливу на ТП на наступних в ПК перехрестях. Цей вплив залежить від довжини наступної в ПК ділянки між світлофорами, довжини черги, параметрів роботи світлофорів та інтенсивності руху ТЗ. Результати експериментальних досліджень дозволили авторами дійти висновку, що за рахунок коригування зсувів можна ефективно впоратися з впливом наступних ділянок у ПК шляхом своєчасного розвантаження черг. Водночас авторами зазначається, що необхідно подальше вдосконалення моделей коефіцієнтів коригування шляхом додаткового детального аналізу реальних даних і врахування поведінки водіїв під час розвантаження черг.

Аналіз методів, спрямованих на забезпечення рівномірного руху ТЗ на скоординованих магістралях, свідчить, що питання забезпечення просування пачок ТЗ ЗХ із постійною обраною швидкістю досі залишається не до кінця вирішеним. Однією з причин цього є недостатнє уявлення про час випередження, необхідний для розгону ТЗ, які стоять у черзі на чергових перехрестях у ПК, до швидкості руху ТЗ ЗХ, що робить актуальним проведення даного дослідження.

У свою чергу, в роботі [5] частиною авторського колективу даної статті формалізовано процес взаємодії пачки ЗХ з додатковими ТЗ, а також розроблено методіку оцінювання часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки ТЗ на ділянці міської магістралі з координованим керуванням. За результатами проведеного дослідження отримано нижню оцінку часу випередження за умов наявності одного додаткового ТЗ перед стоп-лінією чергового перехрестя в ПК. Отримані в [5] аналітичні моделі були експериментально перевірені у статтях [4, 19]. Найбільшу придатність показала модель, заснована на врахуванні лінійно спадаючого характеру прискорення ТЗ, про що свідчать результати кількісного і якісного оцінювання точності розрахунку часу випередження з використанням імітаційної транспортної моделі побудованої у VISSIM.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної статті є проведення експериментального оцінювання впливу часу випередження включення дозвільного сигналу світлофору на ефективність ПК. Основним інструментом досягнення мети дослідження є імітаційна транспортна модель ділянки міської магістралі з координованим керуванням, з використанням якої можна оцінити ефективність як базового, так і пропонованого варіантів координації, відповідно, без урахування часу випередження та з його врахуванням.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основним завданням експерименту є демонстрація впливу величини часу випередження, за рахунок якого коригуються зсуви включення дозвільного сигналу світлофора на наступному в ПК перехресті і дозвільного сигналу світлофору для основного і другорядного напрямків руху ТЗ, на час поїздки ТЗ ділянкою міської магістралі з координованим керуванням. Для оцінювання цього впливу доцільно використовувати час поїздки як для ТЗ, що рухаються ділянкою магістралі з координованим керуванням в обох напрямках ЗХ, так і ТЗ, що перетинають магістраль з другорядних напрямків, оскільки час поїздки для відомого маршруту є інтегральним параметром, який об'єктивно відображає якість транспортного обслуговування, що відчують водії, а також вплив часу випередження на конкуруючі ТП.

Результати імітаційного експерименту, значною мірою, визначаються об'єктом моделювання та, особливо, реалізованим ПК. Отже, для забезпечення об'єктивності результатів моделювання доцільно вибрати об'єкт, вільний від впливу індивідуальної точки зору моделювальника. З цією метою прийнято рішення змодельовати рух на магістралі з координованим керуванням відповідно до випадку, представленого на сторінках 36–49 розділу 29 HCM 2016 «Urban Street Facilities Supplemental» [20]. Це відомий приклад ділянки магістралі з координованим керуванням з п'ятьма перехрестями, використання якого дозволяє оцінити вплив часу випередження. У цьому прикладі основні напрямки руху ТП – Схід і Захід, а другорядні – Північ і Південь.

Рух ТП уздовж магістралі з координованим керуванням було змодельовано за допомогою програмного забезпечення VISSIM Corridor 2025. Транспортна модель включає параметри світлофорного регулювання та інтенсивність руху ТЗ на всіх перехрестях. Проектна швидкість у ПК, представленому в розділі 29 HCM 2016, становила 40 миль/год (64,36 км/год), тому нижня і верхня межі швидкості ТЗ у моделі були встановлені на рівні 60 км/год та 70 км/год, відповідно.

Змінним параметром в імітаційній моделі є час випередження. За проектної швидкості, визначеної у випадку HCM 2016 [20], час випередження, необхідний для руху пачки ТЗ ЗХ з постійною швидкістю, за умови, що перед стоп-лінією наступного в ПК перехрестя стоїть один ТЗ, повинен становити від 9 до 10 секунд, залежно від безпечного інтервалу [5, 19]. Значення часу випередження збільшує тривалість дозвільного сигналу світлофору для основних напрямків руху ТП на всіх перехрестях і зменшує тривалість дозвільного сигналу світлофору для другорядних напрямків. Також за рахунок урахування часу випередження коригуються зсуви включення дозвільного сигналу світлофору на всіх перехрестях у ПК, крім першого у відповідному напрямку руху ЗХ

$$t_{3Ci}^* = t_{3Ci} - t_{CB} \cdot i, \tag{1}$$

де t_{3Ci}^* – скоригований зсув на i -му перехресті в ПК, с; t_{3Ci} – існуючий зсув на i -му перехресті в ПК, с; t_{CB} – час випередження, на який коригується зсув, с; i – номер перехрестя у ПК.

Розглянемо приклад коригування зсувів для напрямку руху ЗХ Захід – Схід за значення часу випередження 2 секунди, існуючі та скориговані значення зсувів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Інформація про величину існуючих і скоригованих зсувів включення дозвільного сигналу світлофора на черговому в ПК перехресті

Номер перехрестя в ПК	1	2	3	4	5
Номер перехрестя для коригування зсуву	0	1	2	3	4
Існуючий зсув, с	-	30	76	30	0
Скоригований зсув, с	-	28	72	24	72

Зміни у зсувах, спричинені врахуванням часу випередження, змінюють схему прибуття пачок ТЗ ЗХ і зумовлюють необхідність перепроєктування ПК. Однак повне перепроєктування призведе до втрати об'єктивності результатів моделювання не тільки через значний вплив вибору методу розрахунку параметрів ПК, але й через зміну спочатку запланованого часу проходження пачки ТЗ ЗХ між перехрестями. За таких умов доцільно відтворити початковий час прибуття пачки ТЗ ЗХ на кожне перехрестя. Це можливо завдяки вибору такої тривалості часу циклу, яка зберігає початково оцінений зсув для останнього перехрестя в координації та дозволяє показати прямий вплив часу випередження на середній час поїздки ТЗ ділянкою магістралі з координованим керуванням.

При проведенні моделювання час випередження варіювався у межах від 0 до 10 секунд з кроком у 2 секунди. Для кожного значення часу випередження проведено по 10 імітацій із

випадковими початковими числами від 1 до 10 з кроком зміни в 1. Результати імітацій розробленої транспортної моделі у VISSIM Corridor 2025 стали основою для розрахунку середнього часу поїздки ділянкою магістралі з координованим керуванням. У всіх імітаціях контрольні точки для вимірювання часу поїздки ТЗ були розміщені на кінцях модельованої ділянки магістралі: відстань між західною і східною контрольними точками становила 2500 м; відстань між північною і південною контрольними точками – 334 м. Час поїздки ТЗ з другорядних напрямків, що перетинають магістраль з координованим керуванням, було усереднено по всіх перехрестях. Результати моделювання наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Час поїздки ТЗ по головному напрямку та ТЗ з другорядних напрямків

Час випередження, с	Середній час поїздки, с					
	ТЗ, що рухаються головним напрямком			ТЗ, що перетинають головний напрямок з другорядних		
	Схід-Захід	Захід-Схід	Середнє	Південь-Північ	Північ-Південь	Середнє
0	171,4	172,3	171,9	40,2	40,7	40,5
2	163,1	165,5	164,3	40,9	41,1	41,0
4	156,5	159,9	158,2	42,1	42,8	42,5
6	152,3	156,3	154,3	43,5	44,6	44,1
8	151,7	158,0	154,9	66,6	79,6	73,1
10	157,1	154,8	156,0	119,8	130,6	125,2

Результати експерименту підтверджують скорочення часу поїздки пачки ТЗ ЗХ зі збільшенням часу випередження, хоча позитивний вплив на головний напрям руху ТП спостерігався до значення часу випередження у 6 секунд, що менше, ніж раніше отримані його оцінки [5, 19]. Причина цього полягає в параметрах обраного прикладу ПК [20], які були розраховані без урахування часу випередження. Таким чином, середній час поїздки ТЗ уздовж ділянки магістралі з координованим керуванням без затримок, 151,1 секунди, не був досягнутий у жодній з імітацій. Отже, постійна швидкість просування ТЗ у ЗХ може бути забезпечена лише в тому випадку, якщо час випередження враховується при розрахунку параметрів світлофорного регулювання у ПК.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Включення часу випередження в час циклу, як і очікувалося, збільшує час поїздки ТЗ при русі з другорядних напрямків. Це спричинено збільшенням рівня навантаження, який, як виявилось, подвоївся за максимального розглянутого значення часу випередження. До шестисекундного значення часу випередження збільшення часу поїздки ТЗ, що перетинають магістраль з другорядних напрямків, було прийнятним, оскільки рівень навантаження не наближався до критичного рівня 0,9. Тому прагнення до підтримання постійної швидкості руху пачки ТЗ ЗХ повинно супроводжуватися постійним моніторингом попиту на під'їздах до магістралі з боку другорядних напрямків.

ВИСНОВКИ

Існуючі методи координації світлофорних об'єктів не гарантують рівномірного руху пачок ТЗ ЗХ, особливо за наявності додаткових ТЗ. Недостатнє врахування часу випередження призводить до уповільнення ТЗ, зниження загальної ефективності координації та збільшення часу поїздки. Існуючі моделі та програмні продукти побудови ПК частково враховують черги ТЗ, проте не містять точних значень параметру часу їх розсіювання.

Результати імітаційного експерименту свідчать, що врахування часу випередження при розрахунку параметрів світлофорного регулювання в ПК, суттєво впливає на зростання кількості затримок і зупинок ТЗ і, відповідно, часу поїздки ТЗ, що перетинають магістраль з координованим керуванням з другорядних напрямків. Для пошуку оптимальних значень тривалості часу циклу, фаз і часу початку зсувів на чергових у ПК перехрестях необхідне обов'язкове врахування часу випередження, величину якого слід визначати з урахуванням існуючих умов і особливостей руху ТП у межах ділянки ВДМ з координованим керуванням, а також з урахуванням постійного контролю навантаження на перехрестя з боку другорядних напрямків.

Для скорочення часу поїздки ТЗ магістралями з координованим керуванням необхідно враховувати взаємодію пачок ЗХ з додатковими ТЗ, впроваджувати алгоритми формування пачок і коригування швидкості руху для забезпечення проходження наступних у координації перехресть без

уповільнення та зупинок. Хоча такі алгоритми й перспективні, їхня інтеграція в методи координації роботи світлофорів потребує додаткових досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Horbachov, P., Liubyi, Ye., Svichynskiy, S., Muzylyov, D., Ivanov, V. A comprehensive assessment of arterial signal coordination through a case study. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2025. 29. 101321. ISSN 2590-1982. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101321>.
2. Шевченко В.В. Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях : дис. на здоб. наук. ступ. докт. філософії : спец. 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті). Харків: ХНАДУ, 2023. 224 с.
3. Любий Є.В. Аналіз методів формування планів координації світлофорних об'єктів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. 2(19). С. 108–122. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
4. Liubyi, Y., Horbachov, P., Kovtsur, K., Muzylyov, D., Ivanov, V. Simulation of the advance time of permissive traffic signal activation following the coordination plan on arterials: plan of the experiment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025, 126. P. 117–128. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.126.7>.
5. Любий Є.В., Горбачов П.Ф. 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>.
6. Inose, H., Hamada, T. Road traffic control. University of Tokyo Press, Tokyo. 1975.
7. Stein, W. Traffic flow math pre-signals and the signal funnel. Theory of traffic flow, in: *Proceeding of the 1st International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1961. pp. 28–56.
8. Stamatiadis, C., Gartner, N.H. MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. *Transportation Research Record*, 1996. 1554(1). P. 9–17. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400102>.
9. Gartner, N.H., Assman, S.F., Lasaga, F. Hou, D.L. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1991. 25(1). P. 55–74.
10. Chang, E.C.P., Messer, C.J., Marsden B.G. Reduced-Delay Optimization and Other Enhancements in the PASSER 11-84. *Transportation Research Record*, 1985. 1005. P. 80–89.
11. Robertson, D.I. Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, 1986. 56. P. 36–40.
12. Tsay, H.S., Lin, L.T. New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth. *Transportation Research Record*, 1988. 1194. P. 15–30.
13. Lin, L.-T., Tung, L.-W., Ku, H.-C. Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial. *Journal of Transportation Engineering*, 2009. 136(8). P. 727–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000123).
14. Ye, B. L., Wu, W., Mao, W.A. Two-way Arterial Signal Coordination Method with Queueing Process Considered. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015. 16(6). P. 3440–3452. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2461493>.
15. Chen, C., Chen, X., Huang, W., Li, K. A Two-Way Progression Model for Arterial Signal Coordination Considering Side-Street Turning Traffic. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2019. 7(1). P. 1627–1650. <https://doi.org/10.1080/21680566.2019.1672590>.
16. Chen, Y.-H., Cheng, Y., Chang, G.-L. Incorporating Delay Minimization in Design of the Optimized Arterial Signal Progression. *Transportation Research Record*, 2022. 2676(4). P. 649–668. <https://doi.org/10.1177/03611981211064281>.
17. Timmerman, R.W., Boon, M.A.A. Platoon forming algorithms for intelligent street intersections. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021. 17(3). P. 278–307. <https://doi.org/10.1080/23249935.2019.1692962>.
18. Zhu, H., Nakamura, H. Modelling discharge flows at signalised intersections with adjustment of downstream effects. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2022. 18(3). P. 736–761. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1895360>.
19. Горбачов П.Ф., Макарічев О.В., Любий Є.В. Імітаційне моделювання часу випередження включення дозвільного сигналу світлофора в плані координації на міських магістралях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. 3. С. 112–124. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-112-124>.

20. TRB. Highway Capacity Manual. National Research Council, Washington. 2016.

REFERENCES

1. Horbachov, P., Liubiyi, Ye., Svichynskiyi, S., Muzylyov, D., & Ivanov, V. (2025). A comprehensive assessment of arterial signal coordination through a case study. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 29, 101321. ISSN 2590-1982. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101321>.
2. Shevchenko, V.V. (2023). Determination of rational parameters of progressive traffic control on urban highways [PhD dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. KhNAHU.
3. Liubiyi, Ye.V. (2022). Analysis of methods for forming traffic signal coordinated timing plans. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 2(19), 108–122. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
4. Liubiyi, Y., Horbachov, P., Kovtsur, K., Muzylyov, D., & Ivanov, V. (2025). Simulation of the advance time of permissive traffic signal activation following the coordination plan on arterials: plan of the experiment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 126, 117–128. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.126.7>.
5. Horbachov, P.F., & Liubiyi, Ye.V. (2022). Method of estimating the time required to ensure the uniform motion of vehicle platoon progression on the coordinated section of the city arterial road. *Vehicle and electronics. Innovative technologies*, 22, 81–91. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2>.
6. Inose, H., & Hamada, T. (1975). Road traffic control. University of Tokyo Press, Tokyo.
7. Stein, W. (1961). Traffic flow math pre-signals and the signal funnel. Theory of traffic flow, in: *Proceeding of the 1st International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, (pp. 28–56).
8. Stamatiadis, C., & Gartner, N.H. (1996). MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. *Transportation Research Record*, 1554(1), 9–17. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400102>.
9. Gartner, N.H., Assman, S.F., Lasaga, & F. Hou, D.L. (1991). A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(1), 55–74.
10. Chang, E.C.P., Messer, C.J., & Marsden B.G. (1985). Reduced-Delay Optimization and Other Enhancements in the PASSER 11-84. *Transportation Research Record*, 1005, 80–89.
11. Robertson, D.I. (1986). Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, 56, 36–40.
12. Tsay, H.S., & Lin, L.T. (1988). New Algorithm for Solving the Maximum Progression Bandwidth. *Transportation Research Record*, 1194, 15–30.
13. Lin, L.-T., Tung, L.-W., & Ku, H.-C. (2009). Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial. *Journal of Transportation Engineering*, 136(8), 727–735. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000123).
14. Ye, B. L., Wu, W., & Mao, W.A. (2015). Two-way Arterial Signal Coordination Method with Queuing Process Considered. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6), 3440–3452. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2461493>.
15. Chen, C., Chen, X., Huang, W., & Li, K. (2019). A Two-Way Progression Model for Arterial Signal Coordination Considering Side-Street Turning Traffic. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7(1), 1627–1650. <https://doi.org/10.1080/21680566.2019.1672590>.
16. Chen, Y.-H., Cheng, Y., & Chang, G.-L. (2022). Incorporating Delay Minimization in Design of the Optimized Arterial Signal Progression. *Transportation Research Record*, 2676(4), 649–668. <https://doi.org/10.1177/03611981211064281>.
17. Timmerman, R.W., & Boon, M.A.A. (2021). Platoon forming algorithms for intelligent street intersections. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(3), 278–307. <https://doi.org/10.1080/23249935.2019.1692962>.
18. Zhu, H., & Nakamura, H. (2022). Modelling discharge flows at signalised intersections with adjustment of downstream effects. *Transportmetrica A: Transport Science*, 18(3), 736–761. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1895360>.
19. Horbachov, P.F., Makarichev, O.V., & Liubiyi, Ye.V. (2024). Simulation Modeling of the Advance Time in Coordination Planon City Highways. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 3, 112–124. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-112-124>.
20. TRB. (2016). Highway Capacity Manual. National Research Council, Washington.

***Ye. Liubiy, P. Horbachov, S. Kapinus, O. Hubariev* Experimental estimation of the impact of advance time on the efficiency of a coordination plan**

The article examines the pressing issue of enhancing the efficiency of coordinated urban traffic control systems through the consideration of advance time required for the acceleration of additional vehicles accumulating in front of the stop line at successive intersections in a coordination plan. In contrast to foreign practices of implementing adaptive traffic control systems, under Ukrainian conditions, financial and infrastructural constraints dictate that coordinated signal control (green wave) remains the primary instrument for effective traffic control in cities. Existing methods for designing coordination plans do not account for the influence of additional vehicles emerging from secondary approaches to coordinated intersections, nor the time required for queues to accelerate to the speed of the main traffic flow. This reduces the overall efficiency of coordination and makes it impossible to ensure the smooth flow of vehicles along coordinated arterials. The challenge of defining and integrating advance time into coordination models remains unresolved despite numerous efforts aimed at optimizing the bandwidth of the green wave and harmonizing traffic flows speed. To provide an experimental estimate of the impact of advance time on coordination plan efficiency, a simulation model of a coordinated arterial segment was developed in the VISSIM, based on the case study presented in HCM 2016. The variable parameter of the model was advance time. Simulation results revealed that the average travel time along the arterial decreases as advance time increases up to six seconds, whereas further increases beyond this threshold lead to a sharp deterioration of traffic conditions on secondary approaches. These findings highlight that incorporating advance time into coordination plan can significantly improve the performance of primary traffic flows within the green wave. At the same time, the results emphasize the necessity of continuous monitoring of traffic demand on secondary approaches to avoid excessive delays and ensure balanced efficiency of the overall traffic control system.

Key words: traffic control, coordination plan, signalized intersections, traffic simulation, advance time, VISSIM.

ЛЮБИЙ Євген Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: lion_khadi@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>.

ГОРБАЧОВ Петро Федорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8180-4072>.

КАПІНУС Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: skapinus13@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-5520-2337>.

ГУБАРЕВ Олександр Семенович, аспірант кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: len02082016@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-5474-3216>.

Yevhen LIUBYI, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: lion_khadi@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>.

Peter HORBACHOV, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8180-4072>.

Serhii KAPINUS, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Road Traffic Management and Safety Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: skapinus13@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-5520-2337>.

Oleksandr HUBARIEV, Post-Graduate Student of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: len02082016@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-5474-3216>.

Дата надходження статті до видання: 28.08.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1927