

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ У РАЗІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗЕЛЕНОЇ ХВИЛІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НА ДРУГОРЯДНІ ДОРОГИ

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Детально висвітлено результати комплексного дослідження ефективності впровадження координованого регулювання транспортних потоків за принципом «зеленої хвилі», виконаного методом мікроскопічного імітаційного моделювання в середовищі SUMO на прикладі коридору проспекту Науки (м. Харків) в умовах поступового зростання інтенсивності руху. Мета роботи — всебічно оцінити, наскільки доцільним є застосування синхронізованих циклограм на міських перехрестях з огляду не лише на показники головної магістралі, а й на зміни транспортних характеристик другорядних підходів, що традиційно залишаються поза увагою більшості досліджень. Для цього побудовано та відкалібровано реалістичну модель транспортної мережі на основі матриці кореспонденцій, сформованої рівноважним методом і уточненої процедурою TFlowFuzzy із залученням даних відеоспостережень з квадрокоптера. Серія з десяти послідовних експериментів з підвищенням навантаження на 10 % у кожному сценарії охоплювала чинні фіксовані циклограми, синхронізацію «зеленої хвилі» та адаптивну систему керування. Отримані результати підтвердили гіпотезу, що «зелена хвиля» та адаптивне регулювання істотно скорочують середню довжину черги й час простою на головній дорозі, проте водночас спричиняють зростання тих самих показників на другорядних підходах, що в окремих випадках нівелює загальний позитивний ефект. З урахуванням виявленого дисбалансу рекомендовано використовувати комбіновані схеми, у яких адаптивна або фіксована «зелена хвиля» інтегрується з багатокритеріальною оптимізацією параметрів світлофорних фаз, що дозволяє мінімізувати сумарні затримки в мережі та запобігти критичному погіршенню сервісного рівня на другорядних дорогах за високих навантажень. Практичну цінність роботи становить чітко сформульована межа застосовності «зеленої хвилі» залежно від співвідношення інтенсивностей головних і другорядних потоків, а також пропозиції щодо інтеграції адаптивних алгоритмів керування в умовах складної топології великих міст, що є підґрунтям для подальшого розвитку багатокритеріальних моделей оптимізації та створення збалансованих стратегій управління дорожнім рухом.

Ключові слова: координоване регулювання, транспортні потоки, перехрестя, простої, ефективність.

Вступ

В сучасному світі проблеми транспортного руху є однією з найактуальніших тем для дослідження. Зростання населення, підвищення рівня життя та збільшення кількості автотранспорту спричиняють зростання автомобільних заторів, що в свою чергу, призводить до втрат часу, грошей та негативного впливу на довкілля. Одним з можливих рішень для зменшення транспортних заторів є введення координованого регулювання транспортних потоків на перехрестях. Така система керування рухом дозволяє забезпечити оптимальний режим руху автомобілів на перехрестях та зменшити загальну кількість зупинок на світлофорах, що може допомогти покращити рух транспорту та зменшити негативний вплив на довкілля. Проте дослідження показують, що не завжди введення координованого регулювання дає позитивні результатів. У цій статті автори комплексно оцінюють ефективність координованого регулювання транспортних потоків на перехрестях та аналізують його позитивні та негативні впливи на транспортний рух.

Постановка задачі

Дослідження координованого регулювання транспортних потоків на перехрестях є актуальним в сучасному міському середовищі. Однією з основних цілей такого регулювання є зменшення затримок на перехрестях та покращення руху транспорту в місті. У більшості випадків координоване регулювання транспортних потоків допомагає підвищити пропускну здатність доріг та зменшити час очікування автомобілів на світлофорах.

Але чи завжди це так? На деяких перехрестях впровадження координованого регулювання може призвести до збільшення загального часу затримки. Особливо це стосується другорядних доріг, на яких автомобілі часто вимушені чекати довший час на червоне світло через збільшення інтервалів між зеленими хвилями на головній дорозі. В таких випадках доцільнішим може виявитися введення адаптивного світлофорного регулювання.

Отже, метою цього дослідження є оцінка ефективності координованого регулювання транспортних потоків на перехрестях та виявлення ситуацій, коли введення такого регулювання не викликає зменшення часу затримки транспорту. Для досягнення цієї мети використано імітаційне моделювання в програмі SUMO (Simulation of Urban MObility) для різних типів перехресть та змінних умов руху транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проаналізовано наукові статті, щодо теми координації регулювання руху на перехрестях. Метою аналізу є ідентифікація можливих проблем і перспектив подальших досліджень. Для аналізу вибрані статті, опубліковані відомими науковими виданнями за останні п'ять років, які містять результати досліджень в галузі координації регулювання руху на перехрестях.

У більшості наявних досліджень, щодо впровадження «зеленої хвилі», зосереджується увага на максимізації ширини зеленої хвилі та покращенні транспортних умов на магістралях. Наприклад, Jing і Huang (2024) [1] запропонували модель керування «зеленою хвилею», яка одночасно враховує рух легкових автомобілів і автобусів у замкненій мережі доріг. Автори використали підхід, що максимізує зважену суму смуг пропускання для обох типів транспорту, що дозволило значно підвищити пропускну здатність порівняно з традиційними фіксованими схемами фазування. Проте варто зазначити, що, попри комплексність підходу, ця та інші аналогічні роботи недостатньо уваги приділяють аналізу змін транспортних характеристик на другорядних дорогах. В результаті цього отримані результати можуть бути занадто оптимістичними, адже ігнорування впливу змін у режимі роботи світлофорів на другорядних дорогах може призвести до погіршення транспортних умов у цих частинах міської мережі. Це свідчить про необхідність розширення досліджень із застосуванням детальнішого моделювання, яке включає повноцінний аналіз як головних, так і другорядних доріг.

У роботі Bao Riyong (2024) [2] запропонована стратегія кооперативного управління сигналами з пріоритетом для наскрізного руху, яка враховує динамічні зміни транспортного потоку та дозволяє знизити середню затримку на магістралі на 85,1 %, а середню довжину черги — на 62,6 %. Водночас автори застосовували метод спільного керування транспортом і дорогою (Vehicle–Road Collaborative Control, VRCC), який інтегрує динамічне подовження зеленої фази та регулювання швидкості автомобілів. Проте попри високі показники ефективності на основних магістралях, дослідники недостатньо уваги приділили впливу запровадження такої системи на другорядних дорогах. Відсутність детального аналізу наслідків змін режиму роботи світлофорів на прилеглих другорядних напрямках може призвести до неповної оцінки загальної ефективності управління транспортними потоками у міській мережі. Це свідчить про необхідність подальших досліджень, у яких би використовувалось комплексне моделювання, що включає аналіз наслідків як для головних, так і для другорядних вулиць.

Продовжуючи огляд досліджень, варто зазначити, що в праці N. N. Caleb (2021) [3] розглядається широкий спектр підходів до оптимізації систем «зеленої хвилі» на основі багатокритеріальних евристичних алгоритмів, зокрема генетичних алгоритмів, методів частинок рою та алгоритмів штучного інтелекту, проте автори зосереджуються виключно на налаштуванні параметрів фази сигналів і скоординованої роботи перехресть у магістральній мережі, не звертаючи уваги на вплив цих змін на прилеглі вторинні дороги та їхню пропускну спроможність. У роботі детально описано багатопланову структуру оптимізації — від окремих перехресть до підмереж і цілого коридору, а також узгоджені моделі показників ефективності, серед яких час затримки та довжина черги, проте відсутній аналіз того, як пріоритезація головного потоку може погіршувати умови руху на біч-

них під'їздах, що істотно обмежує загальне практичне застосування запропонованих методів у міських умовах зі складною топологією.

У статті К. Лібхена (2023) [4] пропонується інтегрована математична модель для оптимізації двонаправленої зеленої хвилі на артеріальних дорогах з використанням PESP-структури та мікроскопічного моделювання в середовищі SUMO на прикладі 3-км ділянки з одинадцятьма перехрестями в Берліні, що дозволяє суттєво зменшити середню кількість зупинок із 3,4 до 1,7 на автомобіль та підвищити узгодженість «зелених» інтервалів у обох напрямках. Водночас автор концентрується виключно на артеріальному коридорі з окремими фазами лівих поворотів, нехтуючи впливом прийомних потоків на другорядних під'їздах і практичними наслідками пріоритетизації магістралі для локальних затримок на другорядних дорогах, що обмежує можливість комплексної оцінки транспортної мережі в міських умовах зі змішаною структурою руху.

У дослідженні В. Шевченка (2023) [5] запропоновано двоетапну методику формування плану координації світлофорних об'єктів, яка враховує особливості групового прибуття транспортних засобів у пачках зеленої хвилі на регульовані перехрестя міської магістралі. В межах цієї роботи за допомогою імітаційного моделювання визначено граничний рівень завантаження другорядних підходів, коли ще можлива ефективна робота магістральної координації. Водночас варто зазначити, що таке визначення виконано лише для одного перехрестя без урахування координації сигналів з іншими перехрестями в досліджуваній мережі. Оцінка ж ефективності впровадженого плану координації здійснювалася переважно за такими параметрами, як час поїздки та кількість зупинок транспортних засобів на головній магістралі, тоді як аналогічні показники на другорядних дорогах не враховувалися. Отже, попри наявність аналізу впливу впровадження координації на другорядні підходи, у роботі недостатньо уваги приділено комплексній оцінці наслідків зміни режиму світлофорного регулювання на суміжних ділянках дорожньої мережі, що може призводити до переоцінки загальної ефективності магістральної координації та є актуальним напрямом для подальших досліджень.

Варто звернути увагу на роботу J. Zhang та ін. (2020) [6], в якій автори розробили інтегровану модель координації сигналів на магістралях з урахуванням «зеленої хвилі» на бічних дорогах та часу на пішохідні переходи, ввівши поняття насичення некоридорних фаз і обмеження зеленого сигналу для забезпечення безпеки пішоходів і руху на другорядних під'їздах. Проте, незважаючи на формальне врахування мінімальних зелених інтервалів для бічних напрямків, в дослідженні відсутній детальний аналіз зміни довжини черги та часу затримки на цих під'їздах після оптимізації сигнальних циклів, оскільки головний акцент зроблено на максимізації загальної пропускної здатності артеріального коридору, що свідчить про недостатню увагу до комплексної оцінки впливу зеленої хвилі на транспортну мережу в цілому.

З наведеного вище огляду випливає, що для комплексної оцінки введення координованого регулювання на перехрестях, потрібен підхід, який буде враховувати не тільки параметри транспортного потоку на головній дорозі, але і потоки на другорядних дорогах, особливо якщо їх інтенсивність така ж або навіть вища, ніж на головній дорозі. Лише такий підхід дозволяє зробити обґрунтовану оцінку ефективності координованого регулювання, оскільки можуть існувати перехрестя, для яких введення координованого керування є недоцільним, оскільки це може призвести до збільшення затримок транспортних потоків на другорядних дорогах, що також збільшує загальну затримку всіх автомобілів на всіх перехрестях. Тому в контексті цього поставлено задачу оцінити ефективність координованого керування за принципом «зелена хвиля» з урахуванням параметрів транспортного руху на головних і другорядних дорогах.

Побудова транспортної моделі

Імітаційне моделювання виконувалося за допомогою програми SUMO (Simulation of Urban MObility). Попередньо сформовано транспортну модель, що відображала ділянку проспекту Науки від проспекту Незалежності до вулиці Дмитра Антоненка м. Харкова (рис. 1).

До створеної в SUMO моделі вводилися значення інтенсивності транспортних потоків, які використовувалися як вхідні параметри. Щоб модель функціонувала правильно, спершу потрібно задати всі можливі варіанти маршрутів руху транспортних засобів через досліджувану територію, визначивши, з яких вулиць автомобілі заїжджають на проспект Науки та на яких вулицях вони його залишають. Оскільки визначення кількості автомобілів, які рухаються певними маршрутами на досліджуваній ділянці, є досить складною задачею з погляду організації натурних спостере-

жень, ухвалено рішення розрахувати ці значення за допомогою рівновірогідного методу визначення матриці транспортних кореспонденцій [7].

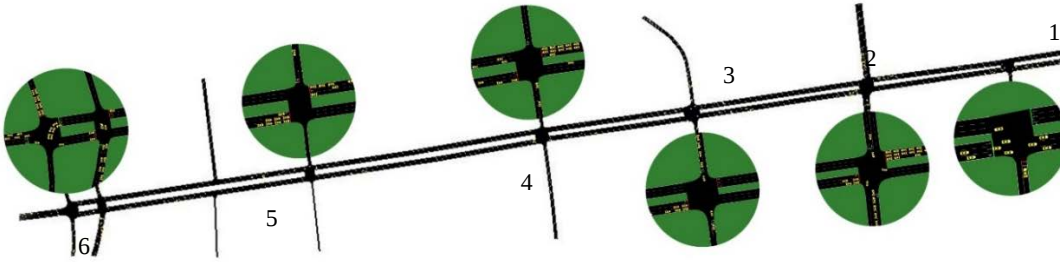


Рис. 1. Схема побудованої моделі проспекту Науки в програмі SUMO

Отримана стартова матриця транспортних кореспонденцій піддається процесу калібрування за допомогою процедури TFlowFuzzy [8]. Калібрування реалізовано за допомогою Python з використанням бібліотек numpy, scipy.optimize.linprog та scikit-fuzzy.

Для проведення калібрування за допомогою процедури TFlowFuzzy необхідно мати реальні дані про інтенсивність руху транспортних потоків на перехрестях. Ці дані отримано за допомогою відеоспостереження, яке проводилося з квадрокоптера. Після вводу цих даних в програму, написаної на Python, здійснено калібрування матриці кореспонденцій транспортних потоків, що дозволило підібрати оптимальні значення транспортних кореспонденцій які як найкраще відповідають зібраним даним про транспортний потік на ділянці вулиці Наукова.

В результаті побудована транспортна модель в програмі SUMO з використанням відкаліброваної матриці дозволила отримати реалістичне відображення руху транспортних потоків на ділянці проспекту Науки та дозволила в подальшому проводити дослідження ефективності координованого регулювання на перехрестях.

Після проведення імітаційних експериментів з використанням побудованої імітаційної моделі в програмі SUMO, отримано результати, які підтвердили адекватність моделі. Відхилення інтенсивності реальних потоків та інтенсивності потоків, отриманих після імітаційного моделювання, становило 12 %. Це свідчить про те, що модель може бути використана для визначення ефективності координованого регулювання.

Проведення імітаційного експерименту

Для проведення імітаційного експерименту необхідно визначити час основних тактів світлофорів. Методика визначення часу основних тактів світлофора за координованого регулювання передбачає використання аналітичних формул на основі показників потоків транспорту та геометричних параметрів дорожнього руху. У процесі визначення часу зміщення вмикання основних тактів враховується різниця відстаней між перехрестями та швидкість руху транспорту з урахуванням групового прибуття автомобілів на світлофорне перехрестя, що дозволяє забезпечити їх синхронізацію [9]. Графік координованого управління показано на рис. 2.

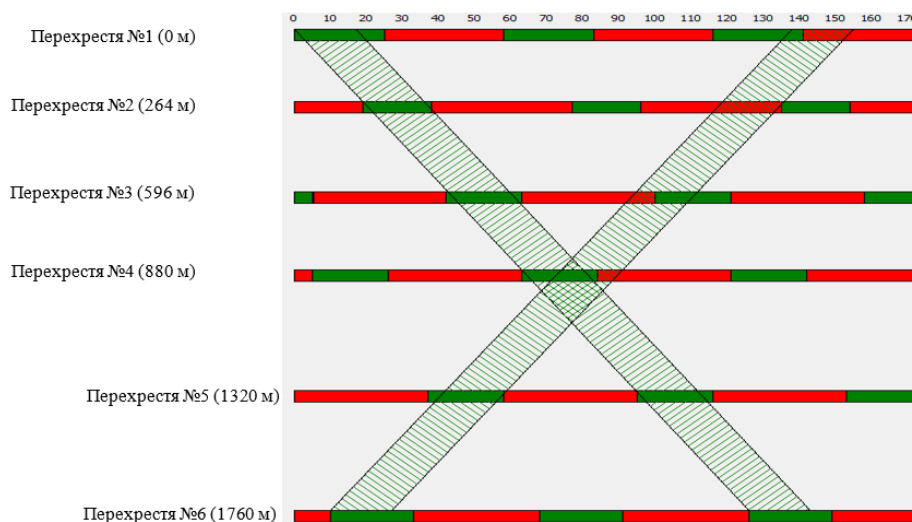


Рис. 2. Графік координованого управління

В таблиці подано тривалість дозвільного сигналу та час зміщення його вмикання від першого перехрестя вул. Дмитра Антоненка до шостого перехрестя просп. Незалежності.

Параметри координованого регулювання

Характеристика	Номер перехрестя					
	1	2	3	4	5	6
Віддалення від першого перехрестя в напрямку, км	0	0,264	0,596	0,88	1,32	1,76
Тривалість ДОЗВІЛЬНОГО сигналу, с	25	19	21	21	21	23
Зміщення початку циклу, с	0	19	42	5	37	10
Рекомендована швидкість руху, км/год	50					

У програмі SUMO проведено серію 3 10 імітаційних експериментів з поступовим збільшенням інтенсивності транспортних потоків на 10 % у кожній подальшій імітації. Моделювання виконувалося для трьох сценаріїв: за умов чинної організації руху та діючих циклограм світлофорів, для варіанта з розрахованими циклограмами з координацією за принципом «зелена хвиля», а також для випадку використання адаптивної системи керування на перехрестях. Такий підхід дозволив оцінити ефективність кожної стратегії регулювання руху в умовах зростання навантаження на мережу.

Використання параметрів довжини черги автомобілів на перехресті та часу простою на головній і другорядних дорогах є науково обґрунтованим підходом для оцінки ефективності координованого регулювання, оскільки саме ці показники найповніше та наочно відображають реальний вплив змін режимів світлофорного регулювання на транспортні потоки в міській мережі. Довжина черги є безпосереднім індикатором перевантаженості підходу до перехрестя, дозволяючи оцінити, наскільки ефективно синхронізовані сигнали світлофорів забезпечують рух автомобілів без вимушених зупинок, що важливо для порівняння якості роботи різних схем координованого управління.

У свою чергу, час простою безпосередньо характеризує затримку, яку відчувають водії на окремих перехрестях, і демонструє реальні витрати часу на подолання перехрестя, дозволяючи кількісно оцінити комфортність та оперативність руху з погляду користувачів дорожньої мережі. При цьому використання зазначених параметрів на головній дорозі дозволяє оцінити ефективність забезпечення пріоритетного руху артеріальною магістраллю, тоді як аналогічні показники на другорядних дорогах показують, наскільки негативним є вплив пріоритетності головного потоку на умови руху інших напрямків, забезпечуючи комплексну і збалансовану оцінку впроваджених схем світлофорного регулювання. Таким чином, саме спільне використання цих двох параметрів на головних та другорядних напрямках забезпечує об'єктивне та повне відображення впливу координованих режимів на транспортну мережу, даючи можливість порівнювати і обирати найефективніші рішення з погляду загальної оптимізації дорожнього руху.

Водночас час проїзду по магістралі є доцільнішим параметром для оцінки ефективності роботи координованого регулювання саме на артеріальній дорозі, оскільки він відображає швидкість та безперервність руху транспортних потоків уздовж магістралі без врахування затримок, що виникають на другорядних підходах під час в'їзду на магістраль, а також без урахування часу очікування для транспортних засобів, що здійснюють перетин артеріальної дороги. Такий підхід дозволяє чітко оцінити ступінь реалізації зеленої хвилі саме для транспортних засобів, що рухаються магістраллю, демонструючи ефективність синхронізації світлофорів на головному напрямку, проте при цьому не відображає змін у рівні обслуговування та затримок на другорядних дорогах, що може призвести до формування неповної оцінки впливу впровадженого координованого регулювання на транспортну мережу в цілому.

Отже, для подальшого обґрунтування необхідності комплексного підходу в оцінці ефективності впровадження зеленої хвилі проведено аналіз результатів моделювання, показаних на графіку (рис. 3).

З рис. 3 випливає, що зі збільшенням величини транспортного потоку спостерігається стабільне зростання середньої довжини черги для всіх сценаріїв, проте характер зростання відрізняється залежно від застосованої системи керування. Зокрема, за використання адаптивної системи управління на головній дорозі та координації за принципом «зелена хвиля» на головній дорозі довжина черги залишається найменшою у порівнянні з іншими сценаріями, що підтверджує ефективність цих методів для забезпечення безперервності руху магістраллю та мінімізації затримок на ній.

Водночас видно, що для другорядних доріг впровадження «зеленої хвилі» або адаптивного управління призводить до помітного збільшення середньої довжини черги на підходах, що демонструє нерівномірний розподіл виразу ефективності та підтверджує висновок аналізу останніх досліджень про те, що більшість сучасних підходів зосереджені на покращенні руху магістраллю без належного урахування впливу на другорядні напрямки.

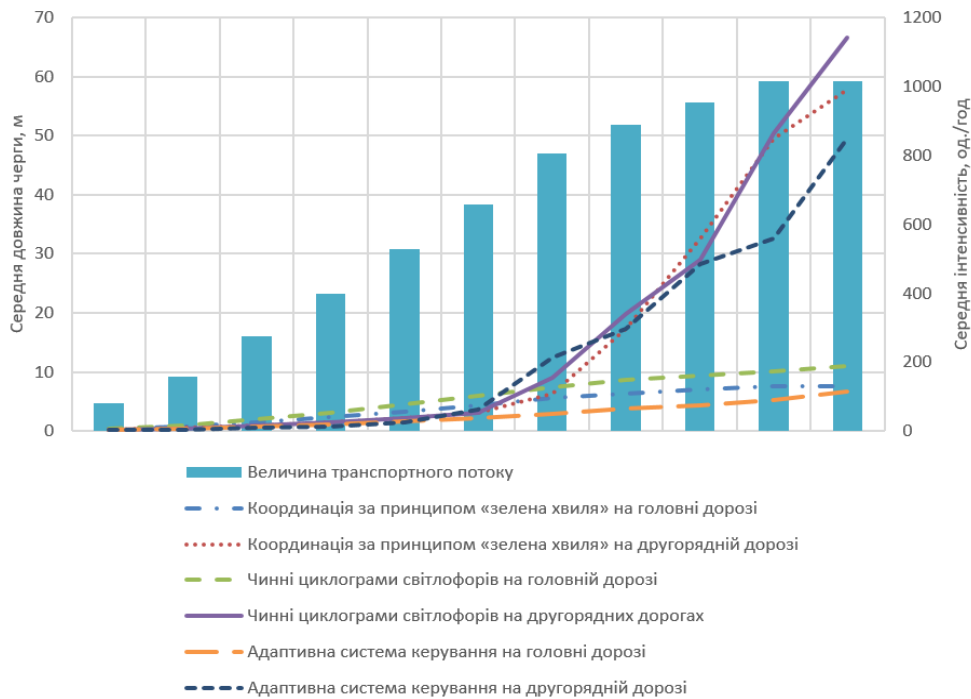


Рис. 3. Залежність середньої довжини черги на головній та другорядних дорогах від величини транспортного потоку за різних схем регулювання

Зокрема, адаптивна система управління на другорядній дорозі показує значно вищі показники довжини черги порівняно з іншими сценаріями, що свідчить про необхідність комплексного підходу до оцінки ефективності регулювання, який би включав параметри як для головної, так і для другорядної дороги.

Після проведення детального аналізу змін середньої довжини черги на основних та допоміжних напрямках руху, доцільним є розгляд ще одного ключового індикатора ефективності роботи системи світлофорного регулювання — середньої тривалості простою транспортних засобів. Цей параметр має вирішальне значення, оскільки безпосередньо відображає рівень затримок, які зазнають учасники дорожнього руху, і, у сукупності з показником довжини черги, дозволяє сформувати комплексну картину впливу впроваджених регуляторних схем на якість транспортного процесу, показано на рис. 4.

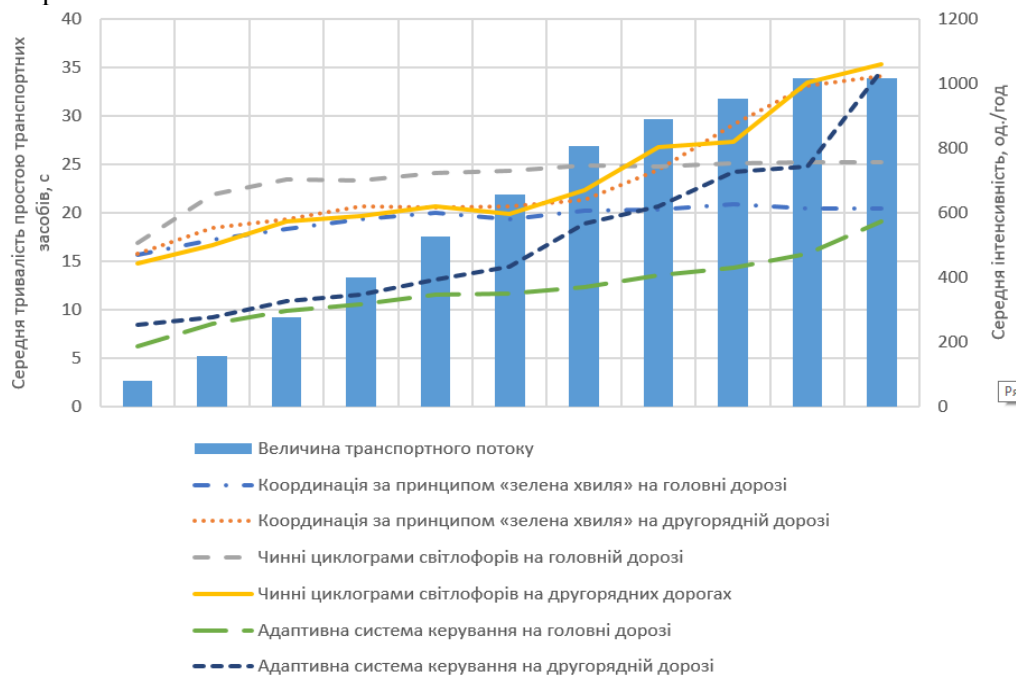


Рис. 4. Залежність середньої тривалості простою на головній та другорядних дорогах від величини транспортного потоку за різних схем регулювання

Ретельне вивчення цього критерію забезпечує достатню підставу для об'єктивного оцінювання загального ефекту від реалізації координаційного управління, оскільки він охоплює всю сукупність транспортних засобів, які перебувають у потоці, зокрема й транспорт загального користування. У такому разі немає необхідності в окремому врахуванні інтенсивності руху громадського транспорту, адже він є повноцінною частиною загального потоку, рухається звичайними смугами без виділення спеціальних пріоритетів або переваг, а отже, підпадає під такий самий вплив від регулювання, як і решта учасників руху. До того ж, варто зауважити, що головним завданням проведеного дослідження є встановлення змін у параметрах функціонування руху переважно на другорядних напрямках, де, зазвичай, рух громадського транспорту відсутній або проявляється в мінімальному обсязі, що ще більше зменшує обґрунтованість виділення цього чинника як окремого об'єкта аналізу.

З графіка (рис. 4) випливає, що зі зростанням величини транспортного потоку середня тривалість простою поступово збільшується для всіх розглянутих схем керування, проте темпи та характер цього зростання різняться. Зокрема, найменші показники часу простою протягом усього діапазону інтенсивностей спостерігаються у разі застосування адаптивної системи управління на головній дорозі, що підтверджує ефективність цього методу для забезпечення мінімальних затримок на магістралі та узгоджується з результатами попередніх досліджень, які зосереджені переважно на оцінюванні виграшу для головного напрямку. Натомість для другорядних доріг видно, що впровадження зеленої хвилі або адаптивної системи на головній дорозі призводить до значного збільшення часу простою, що демонструє перерозподіл затримок на користь магістралі та підтверджує тезу про те, що більшість наявних робіт орієнтовані виключно на поліпшення параметрів головного потоку без належної уваги до зміни умов руху на другорядних підходах. Найгірші показники часу простою фіксуються для варіанта діючих циклограм світлофорів на другорядній дорозі, що свідчить про недостатню ефективність традиційних фіксованих режимів регулювання за умов зростання інтенсивності руху.

Висновки

За результатами проведеного дослідження, у якому застосовано методику імітаційного моделювання транспортних потоків у програмному середовищі SUMO для оцінки ефективності фіксованої та адаптивної «зеленої хвилі» з урахуванням впливу на другорядні дороги, встановлено, що впровадження координованого регулювання за принципом «зеленої хвилі» не завжди забезпечує зниження загальних затримок у міській мережі. Зокрема, підтверджено гіпотезу про те, що хоча такі стратегії поліпшують умови руху на головних магістралях, вони водночас призводять до значного зростання довжини черг та часу простою на другорядних підходах, що знижує загальну ефективність управління рухом. Основними висновками моделювання є виявлена доцільність використання адаптивної «зеленої хвилі» для забезпечення безперервності транспортного потоку на головній дорозі за умов відносно низької інтенсивності руху на другорядних напрямках та недоцільність такого підходу у разі високих навантажень на другорядних вулицях, оскільки це призводить до критичного погіршення їхньої пропускної спроможності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Jing Binbin, and Zhengjie Huang, "Green wave control model simultaneously considering passenger cars and buses in closed road networks," *Applied Sciences*, vol. 14.13, pp. 57-72, 2024.
- [2] Bao Riyong, et al. "Green wave arterial cooperative control strategy based on through-traffic priority," *Electronics*, vol. 13.15, pp. 29-39, 2024.
- [3] Nanchen Nimyel Caleb, and Selfa Johnson Zwalnan, "Optimization of Green Wave Traffic Control Systems: A Literature Review and Research Directions," *Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 8(7), pp. 42-50, 2021.
- [4] Christian Liebchen, "Bidirectional Green Waves for road arterials: optimization and simulation," *Transportation Research Record*, vol. 2678.1, pp. 49-60, 2024.
- [5] В. Шевченко, «Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях.» дис. канд. техн. наук., фак-т інформ., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2023.
- [6] Jun Zhang, et al. "An integrated arterial coordinated control model considering green wave on branch roads and pedestrian crossing time at intersections," *Journal of Management Science and Engineering*, vol. 5.4, pp. 303-317, 2020.
- [7] A. Rossolov, "Analiza lokalizacji parkingów buforowychna przykładzie dużego miasta," *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie*. At: Krakowie, № 1(105), pp. 85-92, 2015.
- [8] Yousefikia Mohammad, et al. "A study on the generalized TFlowFuzzy OD estimation," *Proceedings of Australasian Transport Research Forum*, Brisbane, Australia, 2013.

[9] П. Ф. Горбачов, Є. В. Любий, і О. С. Колій, «Аналітичне моделювання транспортних затримок на регульованих перехрестях при груповому прибутті транспортних засобів до них», *Системи управління, навігації та зв'язку*, № 3(73), с. 5-9, 2023.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки ВНТУ.

Стаття надійшла до редакції 4.07.2025

Колій Олександр Сергійович — канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, e-mail: koliioleksandr@gmail.com ;

Любий Євген Володимирович — канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, e-mail: lion_khadi@ukr.net.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

O. S. Koliy¹
Ye. V. Liubiy¹

Comparative Analysis of the Efficiency of Fixed and Adaptive Green Waves Considering Their Impact on Secondary Roads

¹Kharkiv National Automobile and Highway University

The article provides a detailed presentation of the results of a comprehensive study on the effectiveness of implementing coordinated traffic flow control based on the "green wave" principle. This research was conducted using microscopic simulation modelling in the SUMO environment, taking as a case study the corridor of Nauky Avenue under conditions of gradually increasing traffic intensity. The aim of the study was to comprehensively assess the feasibility of applying synchronized signal timings at urban intersections, considering not only the indicators of the main arterial road but also the changes in traffic characteristics of secondary approaches, which traditionally remain outside the focus in most studies. For this purpose, a realistic model of the transport network was built and calibrated based on an origin-destination matrix generated by the uniform probability method and refined using the TFlowFuzzy procedure with the integration of drone-based video observation data. The obtained results confirmed the hypothesis that both the "green wave" and adaptive control significantly reduce the average queue length and idle time on the main road; however, they simultaneously cause an increase in these same indicators on the secondary approaches, which in some cases offsets the overall positive effect. Considering the identified imbalance, it is recommended to use combined schemes in which adaptive or fixed "green wave" control is integrated with multicriteria optimization of traffic signal parameters, allowing for the minimization of total delays within the network and the prevention of critical deterioration in the level of service on secondary roads under high load conditions. The practical value of this work lies in the clearly formulated applicability threshold of the "green wave" depending on the ratio of main to secondary flow intensities, as well as in the proposals for integrating adaptive control algorithms under complex topologies of large cities. This provides a foundation for the further development of multicriteria optimization models and the creation of more balanced traffic management strategies.

Keywords: coordinated control, traffic flows, intersections, idling, efficiency.

Kolii Oleksandr S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Transport Systems and Logistics, e-mail: koliioleksandr@gmail.com ;

Liubiy Yevhen V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Transport Systems and Logistics, e-mail: lion_khadi@ukr.net