

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.051

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО РІВНЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ДРУГОРЯДНИХ ПІДХОДІВ ДО МІСЬКОЇ МАГІСТРАЛІ З КООРДИНОВАНИМ КЕРУВАННЯМ

Горбачов П. Ф.¹, Свічинський С. В.¹, Шевченко В. В.¹¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. За допомогою інструмента імітаційного моделювання дорожньо-транспортних ситуацій *Vissim* проведена експериментальна оцінка впливу рівня завантаження другорядного підходу до міської магістралі з координованим керуванням на час очікування транспортними засобами можливості проїзду перехрестя та визначено критичний рівень завантаження, перевищення якого призводить до різкого збільшення цього часу. Отримана оцінка необхідна для реалізації нового методу побудови координованого керування на міській магістралі.

Ключові слова: транспортний засіб, регульоване перехрестя, план координації, рівень завантаження перехрестя, імітаційна модель.

Вступ

Найбільш ефективним шляхом розв'язання проблеми перевантаження вулично-дорожньої мережі (ВДМ) міста в умовах стрімкого зростання автомобільного парку та кількості транспортних пересувань є підвищення ефективності використання наявної мережі за рахунок упровадження сучасних технологій, засобів і систем керування дорожнім рухом, які насамперед реалізуються шляхом удосконалення технологій керування світлофорною сигналізацією на перехрестях.

Сучасні системи світлофорного регулювання на перехрестях, що працюють як у жорсткому, так і гнучкому (адаптивному) режимах, забезпечені лише загальними орієнтирами щодо раціональних значень параметрів їхнього функціонування. Усі розрахунки здебільшого ґрунтуються на інтенсивності транспортних потоків (ТП) та повинні забезпечувати мінімальну тривалість обслуговування учасників руху, зокрема пішоходів та велосипедистів.

Використання наявних орієнтирів далеко не завжди приводить до бажаних результатів на практиці, що робить актуальною розробку нових способів покращення умов руху на ВДМ міст та надійних підходів до оцінки їхньої ефективності.

Одним із найважливіших функціональних показників, який впливає на якість руху транспортних засобів (ТЗ), є рівень завантаження ділянок ВДМ або перехресть загалом. Цей показник є чинником, що безпосередньо формує час затримки ТЗ на перехрестях, але його вивченню досі приділяється недостат-

ньо уваги. У той же час, він є необхідним у формуванні системи обмежень будь-яких технологій раціональної організації дорожнього руху (ОДР) у містах, зокрема технології координованого керування (КК) дорожнім рухом (ДР) на міських магістралях (ММ). Як наслідок, визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до міської магістралі з координованим керуванням є актуальним завданням.

Аналіз публікацій

Незважаючи на значний вплив рівня завантаження ВДМ на якість її функціонування, питання його вивчення зазвичай є частиною більш загальної роботи, присвяченої деякому питанню вдосконалення ОДР. Саме тому в процесі аналізу сучасної літератури основна увага буде приділена сучасним технологіям керування ДР. Це створює основи для формування нового методу розробки планів координації (ПК) для міських магістралей, що є загальною метою досліджень авторів у цьому напрямі.

У проблемі підвищення ефективності транспортних процесів важливе місце належить упровадженню автоматизованих систем керування дорожнім рухом (АСКДР) та автоматизованих систем диспетчерського керування (АСДК), побудованих на базі сучасних засобів автоматики та обчислювальної техніки.

Системні рішення цієї проблеми на території колишнього СРСР запропоновані багатьма розробниками. Широко відомі такі АСКДР, як «Думка» (Росія), «АГАТ» (Біло-

русь), «Місто ДР» (Білорусь), «Мегаполіс» (Росія), «TRAFFIC-SL» (Росія), «Комкон-АСКДР» (Україна) та ін. Особливістю застосування цих комплексів технічних засобів керування дорожнім рухом є необхідність визначення і передачі на них керуючих параметрів, отриманих на підставі інформації про поточний стан ТП і ВДМ.

На цей час на території України АСКДР діють у 13 містах: Дніпрі, Харкові, Києві, Донецьку, Одесі, Житомирі, Луганську, Запоріжжі, Хмельницькому, Полтаві, Миколаєві, Маріуполі та Черкасах [1].

Досвід їхнього використання свідчить, що основною метою впровадження АСКДР є підвищення ефективності функціонування ВДМ міста. Водночас априорі вважається, що впровадження АСКДР дозволяє покращити показники руху ТП на ВДМ, адже АСКДР на цей час є найбільш досконалим комплексом технічних засобів та програмного забезпечення, що забезпечує максимально можливе скорочення транспортних затримок, збільшує пропускну спроможність магістралей і підвищує безпеку руху.

Основним засобом керування транспортними потоками в сучасних АСКДР є заборона або надання можливості руху деяким його учасникам, шляхи яких на перехресті перетинаються. На кожен транспортний потік, що рухається через перехрестя, за допомогою світлофора впливає один із сигналів – зелений, жовтий або червоний. Попри зовнішню простоту керуючих впливів, сучасні АСКДР мають досить складну структуру, яка може містити, зокрема, підсистему керування в умовах насиченого руху (керування в разі заторів) [2].

Типізація сучасних систем світлофорного регулювання дозволяє говорити про необхідність врахування цими системами багатьох чинників, які суттєво впливають на параметри ТП. У роботі [3] відносно деякого фрагмента ВДМ був проведений аналіз таких чинників, унаслідок чого вони були згруповані в регулярні (інфраструктурні) та нерегулярні (тимчасові).

До регулярних належать планувальні особливості, що визначають пропускну спроможність ВДМ: типи перехресть, кількість нерегульованих пішохідних переходів, кількість зупинних пунктів міського пасажирського транспорту, кількість нерегульованих перехресть із другорядними вулицями або виїздами з паркувань, конструкційне звуження проїжджої частини.

До нерегулярних чинників належать ті, що визначають умови руху в конкретний момент часу: інтенсивність ТП, дорожньо-транспортні пригоди (ДТП), зупинки транспортних засобів через аварії або для висадки та посадки пасажирів на зупинних пунктах пасажирського транспорту, погодні умови (стан дорожнього покриття, видимість), звуження проїжджої частини через припарковані автомобілі або наявність снігу на узбіччях, структура потоку (наявність у потоці ТЗ із різними швидкостями руху, наприклад, маршрутних ТЗ) або проведення масових заходів.

Нині існує технічна можливість отримувати частину даних, що характеризують перелічені чинники, з відкритих джерел, наприклад, інформація про погодні умови. Інші факти збираються й накопичуються в різних інформаційних системах, наприклад, дані про рух і завантаженість пасажирських ТЗ. Але значну частину необхідної інформації можна отримати лише внаслідок моніторингу поточного стану ВДМ, що залишає актуальним питання адаптивного керування системою світлофорних об'єктів та приводить до створення багатьох альтернативних варіантів їхньої реалізації.

На сьогоднішній день структура деяких АСКДР є застарілою і вони вже не в змозі дієво впливати на процеси в міському дорожньому русі, що обумовлює багато труднощів для учасників ДР. Яскравим прикладом цього є м. Харків, яке має досить високорозвинену транспортну інфраструктуру, проте місто поступово охоплює транспортний параліч, причиною якого є постійне зростання парку індивідуального транспорту на вулицях і дорогах, відсутність системного підходу до вирішення завдань ОДР та, як наслідок, низька якість керування транспортними та пішохідними потоками, незважаючи на наявність у місті обох систем – як АСКДР, так й АСДК.

Таке становище викликане не лише застарілим обладнанням або його обмеженими можливостями. Найважливішим чинником, який не дозволяє ефективно використовувати технічні можливості автоматизованих систем ОДР, є недостатній рівень методичного забезпечення процесів керування дорожнім рухом. Особливо це стосується методів КК рухом на ММ, які є потенційно дуже ефективним засобом забезпечення високої швидкості руху транспорту та скорочення часу затримань на перехрестях.

Координоване керування рухом може реалізуватися в умовах жорсткого світлофорного регулювання, коли світлофори працюють за постійними циклами залежно від часу доби та дня тижня. Розрахунок тривалості постійних циклів світлофорного регулювання зазвичай здійснюється з метою забезпечення мінімального часу затримки ТП. У цьому випадку використовуються різні варіанти одного й того самого методу, що був розроблений Ф. Вебстером 1958 р. [4]. У цій роботі також наводиться емпірична залежність часу затримки ТЗ від рівня завантаження підходу до регульованого перехрестя. Її використання для визначення граничного рівня завантаження підходів до міської магістралі з координованим керуванням не є доцільним, оскільки залежність Вебстера [4] є емпіричною, а її першоджерелом був імітаційний експеримент, реалізований на обчислювальній техніці першого покоління. У цьому питанні доцільно спиратися на більш надійні джерела інформації, для чого варто відтворити імітаційний експеримент з умовами, близькими до цільових.

Жорстка координація поряд з оптимізацією жорстких циклів світлофорного регулювання є найбільш доступними способами покращення умов ДР у містах, оскільки зазвичай вимагають для реалізації лише людських та, можливо, програмних ресурсів. Координація роботи декількох світлофорів може проводитися як з використанням графоаналітичних методів [5], які дозволяють будувати ПК світлофорів «вручну», так і автоматизованих систем розрахунку ПК.

На цей час відомими є досить багато зарубіжних АСКДР, які призначені для розробки та реалізації програм жорсткої координації ДР: TRANSYT, Traffic Optimization Logic (TOL), Optimization Policies for Adaptive Control (OPAC), Controlled Optimization of Phases (COP), PASSER [6], MAXBAND [7], MULTIBAND [8]. Вони побудовані на дещо різних принципах [9], але критерієм оптимізації в них завжди є комбінація часу затримок і кількості зупинок ТЗ [2]. Усі вони реалізують узагальнений розгляд об'єкта керування, коли рівень деталізації процесу ДР обмежується інтенсивністю руху та його складом [10]. Водночас мікропроцеси подолання учасниками руху перехресть та формування груп ТЗ на магістралі не розглядаються.

Найпоширенішим прикладом узагальненого підходу до побудови жорсткого коор-

динованого керування сукупністю світлофорних об'єктів, коли за допомогою технічних засобів ОДР оптимізується деякий розрахунковий показник, що характеризує поточний стан об'єкта, є метод TRANSYT [11]. У його основі закладено мезоскопічні інструменти моделювання динаміки черги. Для пошуку оптимального стану АСКДР використовується процедура градієнтного спуску і генетичний алгоритм, реалізація яких дозволяє змінювати тривалість сигналів в ітераційній процедурі, що обчислює «індекс роботи» і порівнює його з попереднім значенням на предмет поліпшення. TRANSYT ґрунтується на класичних моделях ТП та оптимізує індекс роботи, який є функцією від загального часу затримок та кількості зупинок ТЗ.

Застосування в цій системі оптимізаційних моделей для розрахунку фаз світлофорного циклу забезпечує також роботу світлофорної сигналізації в режимі координованого магістрального керування «зелена хвиля», що дає змогу транспортним засобам рухатися через декілька перехресть поспіль без зупинок [12]. Ступінь поглиблення в деталі процесу є досить поверхневим, і питання адекватності оцінок ефективності транспортного процесу також залишається відкритим, оскільки транспортні затримки, так само як і кількість зупинок ТЗ на під'їздах до світлофорного об'єкта, на цей час ще не мають надійної оцінки.

Локальне адаптивне регулювання, де враховується поточна інтенсивність ТП та наявність ТЗ безпосередньо в місці розташування світлофора, є одною з альтернатив координованому керуванню рухом на міській магістралі. У цьому випадку за допомогою різноманітних датчиків можуть вимірюватися інтервали між прибуваючими до світлофора ТЗ [13] або довжина черги перед світлофором [14]. Такий спосіб ОДР може створювати значну конкуренцію методу координованого магістрального керування та потребує аналізу результатів його використання в різних умовах.

До методів адаптивного локального керування світлофорними об'єктами належать: TOL [15]; Microprocessor Optimized Vehicle Actuation (MOVA) [16]; OPAC [17]; COP [18] та ін. Їхні алгоритми використовують спрощені короткострокові моделі прогнозування потоку прибуття ТЗ, які ґрунтуються на даних детекторів. Методи впливу на ТП, що ними використовуються, можуть відрізнитися, але загальною особливістю для таких

методів є недоведена результативність їхньої роботи в умовах щільного руху, а також невизначені умови їхнього ефективного використання. У літературі складно знайти приклади порівняння ефективності локальної світлофорної адаптації з жорстким координованим керуванням у різних умовах. Це свідчить про необхідність обов'язкового супроводження нових методів ОДР кількісною оцінкою результатів їхнього застосування.

Більш досконалим вважається системний (адаптивний) варіант світлофорного регулювання, оснований на аналізі поточних параметрів ТП, що має забезпечувати координовану роботу декількох світлофорів з узгодженням керування транспортними потоками на всій ВДМ [19]. Цей варіант є досить дорогим та до того ж він не забезпечений надійними рекомендаціями щодо кількісних характеристик роботи світлофорів у різних умовах. Особливо це стосується можливостей таких систем працювати в умовах навантажених ВДМ. Але згаданий варіант має досить багато реалізацій у вигляді програмного забезпечення.

Мережні системи адаптивного керування виглядають потенційно більш перспективними в умовах щільного руху, ніж локальна адаптація. Вони використовують різноманітні методи й алгоритми для оперативного коригування сигнальних планів на основі збору та аналізу певних наборів даних.

Прикладами таких систем є: REALBAND [20]; метод Split, Cycle, and Offset Optimization Technique (SCOOT) [9]; система MOTION [2], яка ідентифікує транспортну ситуацію і застосовує попередньо вироблену стратегію керування з використанням експертної системи [21]; Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) [22], де ступінь насиченості для найбільш навантаженої смуги руху обмежується на рівні 0,9; метод Urban Traffic Optimization by Integrated Automation (UTOPIA), призначений для керування світлофорною сигналізацією та надання пріоритету в проїзді транспорту загального користування [23].

Ці системи експлуатуються в різних містах світу, однак вважати адаптивний підхід до КК ДР панацеєю навряд чи можливо внаслідок складності оцінки результатів їхнього використання та узагальненого характеру керування, водночас складно відстежити безпосередній зв'язок між поточним станом ВДМ та відповіддю системи на нього. Також недоліком таких систем є їхня дуже висока

вартість, обумовлена значними матеріальними витратами на системну інфраструктуру.

В описі перелічених методів не завжди можливо знайти детальний опис методик, за якими формуються базові режими роботи світлофорних об'єктів та проводиться їхнє корегування під поточну транспортну ситуацію. Тут варто зазначити, що на сучасному рівні розвитку методів ОДР практично всі ці методики передбачають використання лише одного інструмента – уже згаданої вище формули Вебстера [24] та її похідних у канадському [25], австралійському [26] та американському керівництвах щодо ОДР [27].

Підтвердженням цьому є підхід до координованого керування, описаний в Highway Capacity Manual (HCM) [27], де модифікована формула Вебстера використовується для розрахунку тривалості світлофорних циклів на перехрестях, що належать до магістралі. Після цього розрахунку визначається максимальна тривалість циклу, яка приймається єдиною для всіх інших світлофорів на магістралі. У цьому випадку розподіляти фази в циклі також рекомендується пропорційно навантаженню конкуруючих напрямків руху, незважаючи на суттєву різницю в створюваних умовах руху по магістралі та на другорядних під'їздах до неї. Для отриманих циклів визначаються відносний час їхнього початку, який забезпечує вільний проїзд автомобілів по магістралі в найбільш завантаженому напрямку. Варто відзначити, що рівень деталізації розгляду процесів ДР у цьому випадку особливо нічим не відрізняється від того, який згадувався вище, та залишає бажати кращого.

Стосовно формули Вебстера, виявляється, що, незважаючи на обмеження у її використанні за рівнем завантаження, який не повинен перевищувати значення 0,9 [4], вона є основою не лише для розрахунків локального світлофорного регулювання, а й для методик та програмних продуктів з побудови координованого керування. І це тоді, як згаданий недолік не є єдиним з точки зору її використання в координованому керуванні.

Справа ще в тому, що формула Вебстера отримана за умови випадкового прибуття ТЗ до перехрестя, що суперечить умовам побудови ПК, де магістральний ТП має перебувати до перехрестя організованими групами, сформованими на попередніх перехрестях. У випадку координованого магістрального керування випадковим правомірно вважати лише прибуття ТЗ до перехрестя із другоряд-

них напрямків, які перетинають магістраль.

Також викликає сумніви правомірність використання як загальноприйнятого обмеження на рівень завантаження напрямку руху величини 0,9. Таке значення було запропоноване Ф. Вебстером лише як обмеження для використання його формули [24] та навряд чи підходить для інших цілей.

Отже, унаслідок проведеного аналізу можна стверджувати, що сучасний рівень методичного забезпечення координованого магістрального керування ТП є недостатнім та потребує подальшого розвитку. Основою для цього має стати більш детальне врахування в розрахунках процесів формування ТП на міській магістралі й на під'їздах до неї та кількісна оцінка впливу рівня навантаження на час затримок ТЗ з другорядних підходів до ММ з КК.

Мета і постановка завдання

Результати аналізу літератури та відсутність переконливих прикладів ефективної зеленої хвилі в Україні свідчать на користь створення нової, детально обґрунтованої технології КК ДР на ММ. Пріоритетним має бути жорсткий режим координації як найбільш доступний з економічної та технологічної точки зору. Окрім цього, створення ефективної технології побудови жорсткої зеленої хвилі дасть змогу покращити наявні методи адаптивного КК на ВДМ міст як наступного кроку на шляху розширення можливостей проектувальників систем ОДР.

Обов'язковою умовою роботи зеленої хвилі є синхронна робота всіх світлофорів, що включені до плану координації. Власне, план жорсткої магістральної координації – це і є параметри світлофорних циклів та відносний час початку циклу в загальній для всіх об'єднаних світлофорів часовій шкалі. Синхронізація роботи світлофорів досягається за рахунок однакової тривалості їхніх циклів. Тривалість світлофорних циклів визначається рівнем навантаження на перехрестя – що більше навантаження, тим тривалішим має бути цикл. Тому вирівнюватися цикли повинні за максимально навантаженим перехрестям, як це і робиться в чинних рекомендаціях [27].

Основною проблемою в побудові зеленої хвилі є налаштування ПК таким чином, щоб рух ТЗ по магістралі був безперервним в обох напрямках. І тут відсутність чітких вказівок щодо побудови планів координації часто призводить до ситуації, коли реальні ПК

не забезпечують безупинного руху на магістралі навіть у головному напрямку. Можливості організації зустрічної зеленої хвилі визначаються ступенем відповідності часу подолання ділянок магістралі обраному світлофорному циклу. За умови рівної довжини фрагментів магістралі між перехрестями на координованій ділянці існує такий цикл, коли можливе створення плану координації з абсолютно рівними умовами руху по магістралі в обох напрямках.

Отже, у побудові зеленої хвилі, можливі два альтернативних підходи до вибору тривалості циклу в плані координації: перший, оснований на інтенсивності ТП на перехрестях, та другий, оснований на геометрії координованої ділянки ММ. Для другого випадку, за умови суттєвої різниці в довжині фрагментів магістралі на координованій ділянці, взагалі можуть існувати декілька раціональних циклів. У загальному випадку розрахункові цикли не збігатимуться та, більше того, будуть істотно відрізнятися один від одного. У чинних методиках відсутня відповідь на цю суперечність, що й призводить до негативних наслідків побудови зеленої хвилі в багатьох випадках.

Для подолання цієї суперечності до методики побудови зеленої хвилі на ММ необхідно ввести керуючий параметр, який буде впливати на тривалість світлофорного циклу в ПК, та надати кількісну оцінку результатам його побудови. Таким керуючим параметром має стати максимальна довжина групи ТЗ у зеленій хвилі, які рухаються у виділеному для них часовому коридорі без зупинок. Така група формується першим світлофором на координованій ділянці магістралі в кожному напрямку.

Початкова довжина групи в прямому і зустрічному напрямках може бути різною – її визначає розробник. Коли довжини груп задані для обох напрямків, а світлофорний цикл – один, то пропорційно їм, на підставі фактичних інтенсивностей ТП можна розрахувати середню кількість усіх ТЗ, які рухаються в інших напрямках, і для них прорахувати час проїзду на основі тривалості проїзду перехрестя одним ТЗ.

Перелік видів ТЗ, які залежно від напрямку руху рухаються магістрально та через неї, разом з групами пішоходів, які обслуговуються паралельно, виглядає таким чином:

– ТЗ, які рухаються в групі зеленої хвилі прямо й праворуч, та пішоходи, які перетинають другорядні під'їзди до ММ;

– ТЗ з групи зеленої хвилі, які повертають наліво, та пішоходи, які перетинають зустрічну половину магістральної вулиці до центральної розділової смуги;

– ТЗ, які прибувають до перехрестя на ММ з другорядних під'їздів, та пішоходи, які завершують перехід магістралі від центральної розділової смуги через ту її половину, по якій рухається група ТЗ зеленої хвилі;

– додаткові ТЗ з другорядних під'їздів, які доповнюють групу, та пішоходи, які перетинають другорядні під'їзди до ММ.

На основній магістралі навантаження на координоване перехрестя не залежить від тривалості циклу, оскільки прибуття ТЗ на нього не є випадковим та забезпечується виділенням відповідно до довжини групи часом. У той же час збільшення довжини циклів на некритичних перехрестях призводить до зростання рівня навантаження на другорядних під'їздах до перехрестя. Для забезпечення прийнятної рівня обслуговування автомобілів на другорядних напрямках рівень завантаження цих напрямків потрібно обмежити деякою величиною.

Вона має визначатися за умови запобігання значних витрат часу ТЗ, які прибувають до перехрестя на ММ з другорядних під'їздів. За умов відсутності точної аналітичної оцінки часу затримок на регульованому перехресті інструментом для цього має стати імітаційний експеримент з умовами обслуговування ТЗ, подібними тим, що зазвичай зустрічаються на під'їздах до ММ. Поряд з цим потрібно перевірити можливість використання формули Вебстера для оцінки часу затримок ТЗ на перехрестях. Це необхідно для практичної реалізації запропонованого методу побудови зеленої хвилі на ММ, яка потребує кількісної оцінки ефективності альтернативних планів координації.

Експериментальні дослідження залежності часу затримок на регульованому перехресті від рівня навантаження підходу

Для проведення експерименту використовувалась імітаційна модель харківського перехрестя пр. Науки та вул. Новгородської, створена в пакеті VISSIM, яка детально описана в роботі [28]. Це перехрестя має доволі велику площу та якісне дорожнє покриття, що забезпечує досить вільні умови руху на самому об'єкті, тобто не обмежує швидкість автомобілів на старті від стоп-лінії і надалі під час розгону для будь-якого напрямку руху. Тому умови спостереження за часом

затримки автомобілів на цьому перехресті в разі під'їзду до нього з боку вул. Новгородської можна вважати загальними для більшості аналогічних об'єктів. Це твердження також стосується й параметрів роботи світлофорів на ньому.

У попередній роботі [28] також була отримана аналітична залежність для середнього часу очікування проїзду через регульоване перехрестя:

$$W = \frac{T_3^2(1 + \mu\Delta)}{2T}, \quad (1)$$

де W – час очікування можливості проїзду через перехрестя на дозвільний сигнал світлофора, с; T – тривалість світлофорного циклу, $T = 78$ с [28]; T_3 – тривалість заборонного сигналу в циклі для напрямку, $T = 60$ с [28]; μ – інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя на обраному напрямку, с⁻¹; Δ – час подолання перехрестя одним ТЗ, с.

Ця аналітична залежність отримана за умови, що роз'їзд потоку ТЗ у період дозвільного сигналу триває принаймні доти, доки всі ТЗ роз'їдуться [24]. У цьому випадку не враховуються затримки ТЗ, пов'язані з очікуванням наступного дозвільного такту в циклі. Тому вона є нижньою оцінкою затримок ТЗ на регульованому перехресті, яка не враховує впливу рівня навантаження на час затримок. Таку властивість формули (1) доцільно використовувати для визначення шуканого максимального рівня завантаження напрямку руху, тобто для порівняння з експериментальними даними.

Це обумовлене тим, що імітаційне моделювання надає випадкові значення часу очікування, вибір критичних значень з яких є нетривіальним завданням. Орієнтуватися лише на середні значення масиву результатів, отриманих для одних умов функціонування, може виявитися недостатнім. Аналогічне твердження справедливе й для другого моменту величини W , отриманої за результатами моделювання.

Сам експеримент складався зі 100 імітацій в моделі з діапазоном вхідного навантаження від 0,75 до 0,89, який був визначений за результатами попереднього експерименту [28], крок зміни навантаження дорівнював 0,02. На кожному кроці виконувалось 10 імітацій з різними значеннями старту імітації. Усі розрахунки, у яких фактичне навантаження на напрямок не досягло значення 0,745, у пода-

льшому не розглядалися, тому остаточна кількість імітацій становила 90 одиниць (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати експерименту

Рівень завантаження	Характеристика затримок		
	Кількість, од.	Середнє, с	Стандартне відхилення, с
0,748	2	25,4	0,113
0,758	5	24,6	3,841
0,769	8	26,8	4,641
0,780	6	29,4	3,383
0,791	16	29,2	10,942
0,802	14	32,1	4,151
0,813	8	35,2	4,231
0,823	6	39,0	4,482
0,834	12	36,0	7,792
0,845	5	34,7	6,055
0,856	7	36,3	6,016
0,878	1	48,7	0,000

За результатами експерименту помітним є зростання затримок ТЗ у разі збільшення рівня навантаження, що підтвердив і регресійний аналіз результатів експерименту, який дав такий результат:

$$W' = 134,52 \cdot \rho - 76,15, \quad (2)$$

де W' – розрахунковий середній час очікування можливості проїзду через перехрестя на дозвільний сигнал світлофору, с; ρ – рівень навантаження на другорядний під'їзд до ММ.

Отримана модель (2) не виглядає переконливою навіть зовні, що підтверджується її статистичними характеристиками (табл. 2).

Таблиця 2 – Статистична характеристика залежності (2)

Назва показника	Значення
Коефіцієнт кореляції	0,519
Коефіцієнт детермінації	0,270
Стандартна похибка	6,623
Інформаційна значущість (критерій Фішера)	32,519
Імовірність критерію Фішера	$1,55 \cdot 10^{-7}$
t-статистика У-перетину	-4,002
t-статистика коефіцієнта за умови ρ	5,703

Незважаючи на придатні значення останніх чотирьох рядків табл. 2, рівень статистичного зв'язку між розрахунковим середнім

часом очікування можливості проїзду через регульоване перехрестя та рівнем навантаження на напрямок не може вважатися достатнім для подальшого використання в аналізі. Ще одне міркування стосується лінійного виду моделі (2), який не дозволяє отримати бажаний результат, тобто знайти точку переходу від плавного до різкого зростання часу затримки.

Спроби знайти переконливу нелінійну форму зв'язку між досліджуваними показниками не привели до помітного покращення статистичних характеристик моделі. Тому для отримання шуканого значення граничного рівня завантаження другорядних підходів до ММ з КК виникла необхідність використовувати інші інструменти, до числа яких входить порівняння результатів з розрахунком за залежністю (1). Таке порівняння, сумісно з моделлю Вебстера [24], у графічній формі представлено на рис. 1.

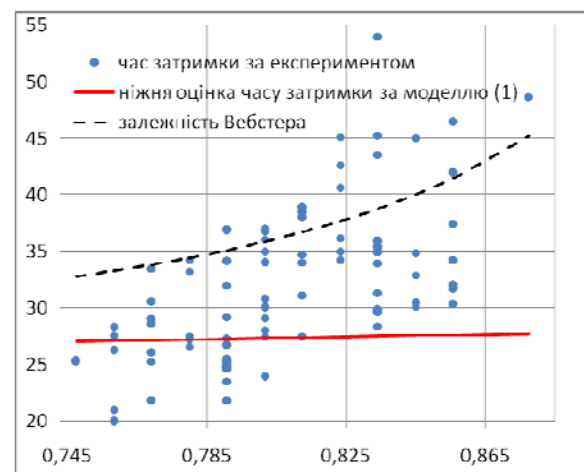


Рис. 1. Результати імітаційного експерименту та розрахунки за моделлю (1)

Зіставлення результатів імітаційного експерименту з розрахунками за моделлю надають змогу виділити перехід до прискореного зростання експериментальних значень часу затримки, коли вони перестають попадати до області, нижчої за аналітичну оцінку. Це трапляється на рівні навантаження 0,813 та саме це значення можливо прийняти за граничне значення рівня завантаження другорядних підходів до ММ з координованим керуванням, яке має використовуватися в побудові ПК «зелена хвиля».

Що стосується моделі Вебстера, то візуально вона не суперечить результатам експерименту, хоча й виглядає як деяке відображення їхньої верхньої оцінки. З урахуванням

того, що в побудові ПК на ММ ця модель потрібна для попередньої оцінки альтернативних планів зеленої хвилі, а кінцева оцінка ефективності побудови має виконуватись за допомогою імітаційного експерименту, рівень відображення моделлю Вебстера випадкових результатів експерименту виглядає цілком придатним для використання в побудові ПК на ММ.

Висновки

Сучасний рівень методичного забезпечення координованого магістрального керування транспортними потоками є недостатнім та потребує подальшого розвитку як з позиції методу його розрахунку, так й з позиції кількісної характеристики параметрів функціонування планів координації.

Надійною основою для створення нового методу координованого керування ДР на ММ має стати детальне врахування розподілу ТП між напрямками руху та врахування обмеження за рівнем завантаження другорядних підходів до магістралі.

Як граничний рівень завантаження другорядних підходів до ММ з координованим керуванням, який має використовуватися в побудові ПК, можливо використовувати значення 0,813, за умови якого експериментальні значення часу затримок перестають попадати до області, нижчої за нижню аналітичну оцінку.

Рівень занурення результатів розрахунку за моделлю Вебстера в масив результатів імітаційного експерименту виглядає достатнім для використання цієї моделі для попередньої оцінки альтернативних планів зеленої хвилі. Кінцева оцінка ефективності побудови ПК «зелена хвиля» має виконуватись за допомогою імітаційного моделювання.

Література

1. Рейцен Е. А. Градостроительные основы построения автоматизированных систем управления дорожным движением. *Містобудування та територіальне планування*. 1998. № 2. С. 17–22.
2. Власов А. А. Адаптивные системы управления дорожным движением в городах: монография. Пенза: ПГУАС, 2012. 184 с.
3. Пыталева О. А. Обоснование параметров маршрутной сети городского наземного пассажирского транспорта: дис. канд. техн. наук: 05.22.01 / МГТУ им. Г.И. Носова. Екатеринбург, 2010.
4. Webster F. V. Traffic Signal Settings. *Road Research Technical Paper No. 39*. London: Depart-

- ment of Scientific and Industrial Research, 1958. 45 p.
5. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения. Москва: Академкнига, 2005. 279 с.
6. Messer C. J., Whitson R. H., Dudek C. L., Romano E. J. A Variable Sequence Multiphase Progression Optimization Program. *Highway Research Record 445*: HRB, National Research Council. Washington, 1973, pp. 24–33.
7. Little J., Kelson M. D., Gartner N. H. MAX-BAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks. *Transportation Research Record 795*: TRB, National Research Council. Washington, 1981, pp. 40–46.
8. Gartner N. H., Assmann S. F., Lasaga F., Hou D. L. MULTIBAND – A Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme. *Transportation Research Record 1287*: TRB, National Research Council. Washington, 1990, pp. 212–222.
9. Hunt P. B., Robertson D. I., Bretherton R. D., Winton R. I. SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals: Report TRRL 1014. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1981, 44 p.
10. Пржибыл П., Свитек М. Телематика на транспорте / пер. с чеш. О. Бузeka и В. Бузковой; под ред. проф. В. В. Сильянова. Москва: МАДИ (ГТУ), 2003. 540 с.
11. Robertson D. I. TRANSYT: A Traffic Network Study Tool: RRL Report LR 253. Crowthorne, Berkshire: Road Research Laboratory, 1969, 37 p.
12. Петров В. В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах. Омск: СиБАДИ, 2007. 104 с.
13. Darroch J. N., Newell G. F. Queues for a Vehicle-Actuated Traffic Light. *Operations Research*. 1964, vol. 12(6), pp. 882–895.
14. Титов А. Ю. Сравнительный анализ аппаратно-программных средств управления дорожным движением. *ВСИУ-2014: XXII Всерос. совещание по проблемам управления*. (Москва, 16–19 июня 2014). Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 8864–8870.
15. Bang K. L., Nilsson L. E. Optimal Control of Isolated Traffic Signals. *IFAC Proceedings Volumes*. 1976, vol. 9(4), pp. 173–184.
16. Vincent R. A., Peirce J.R. 'MOVA': Traffic Responsive, Self-Optimizing Signal Control for Isolated Intersections: Research Report 170. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory, 1988, 21 p.
17. Gartner N. H., Pooran F. J., Andrews C. M. Implementation and Field Testing of the OPAC Adaptive Control Strategy in RT-TRACS. Proc. of 81st Annual Meeting of the TRB. 2002, pp. 148–156.

18. Sen S., Head K. L. Controlled Optimization of Phases at an Intersection. *Transportation Science*. 1997, vol. 31(1), pp. 5–17.
19. Рахмангулов А. Н., Ломакина М. Г. Выбор направления совершенствования систем светофорного регулирования транспортных потоков в городах. *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2017, Т. 7(1). С. 27–34.
20. Dell'Olmo P., Mirchandani P. REALBAND: An Approach for Real-Time Coordination of Traffic Flows on Networks. *Transportation Research Record*, 1995, issue 1494, pp. 106–116.
21. Власов А. А., Орлов Н. А., Чушкина К. А. Методика расчета режимов работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения. *Интернет-журнал «Науковедение»* 2014, № 2(21). Статья 02TVN214 (11 с).
22. Lowrie P. R. The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) – Principles, Methodology, Algorithms. Proc. of the IEE Int. Conf. on Road Traffic Signalling (London, 30 March – 1 April, 1982). London, 1982. pp. 67–70.
23. Martin P. T., Hockaday S. SCOOT – An Update. *ITE Journal*. 1995, vol. 65(1), pp. 44–48.
24. Webster F. V., Cobbe B. M. Traffic Signals. London: HMSQ, 1966. 111 p.
25. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Ottawa: Institute of Transportation Engineers, 2008. 232 p.
26. Akcelik R. An assessment of the Highway Capacity Manual 2010 roundabout capacity model. Proc. of TRB Int. Roundabout Conf. (Carmel, 18–20 May, 2011). Carmel, 2011. 11 p. URL: http://www.sidrasolutions.com/documents/trbrouconf2011_akcelik_hcm2010_paper.pdf (Last accessed 06.05.2020).
27. Highway Capacity Manual. Washington: TRB, 2010. 1134 p.
28. Горбачов П. Ф., Макаричев О. В., Шевченко В. В. Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць з трифазним циклом регулювання. *Автомобільний транспорт*. 2019, № 44. С. 30–39.
4. Webster F. V. (1958). Traffic Signal Settings. London: Department of Scientific and Industrial Research, 45 p.
5. Kremenec Ju. A. (2005). *Tehnnycheskye sredstva organizacyy dorozhnogo dvyzheniya* [Technical means of traffic management]. Moscow: Akademya. [in Russian].
6. Messer C. J., Whitson R. H., Dudek C. L., Romano E. J. (1973). A Variable Sequence Multiphase Progression Optimization Program. *Highway Research Record*, 445.
7. Little J., Kelson M. D., Gartner N. H. (1981). MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks. *Transportation Research Record*, 795.
8. Gartner N. H., Assmann S. F., Lasaga F., Hou D. L. (1990). MULTIBAND – A Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme. *Transportation Research Record*, 1287.
9. Hunt P. B., Robertson D. I., Bretherton R. D., Winton R. I. (1981). SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory.
10. Przhybyl P., Svytek M. (2003). *Telematyka na transporte* [Transport telematics]. Moscow: MAHU (STU). [in Russian].
11. Robertson D. I. (1969). TRANSYT: A Traffic Network Study Tool. Crowthorne, Berkshire: Road Research Laboratory.
12. Petrov V. V. (2007). *Avtomatyzirovannyye systemy upravleniya dorozhnym dvyzheniyem v gorodakh* [Automated traffic control systems in cities]. Omsk: SibAHU. [in Russian].
13. Darroch J. N., Newell G. F. (1964). Queues for a Vehicle-Actuated Traffic Light. *Operations Research*, 12(6).
14. Tytov A. Ju. (2014). *Sravnitel'nyj analiz apparatno-programmnykh sredstv upravleniya dorozhnym dvyzheniyem* [Comparative analysis of hardware and software for traffic control]. *ARMMI-2014*. Proceedings of the All-Russian Meeting on Management Issues.
15. Bang K. L., Nilsson L. E. (1976). Optimal Control of Isolated Traffic Signals. *IFAC Proceedings Volumes*, 9(4).
16. Vincent R. A., Peirce J. R. (1988). 'MOVA': Traffic Responsive, Self-Optimizing Signal Control for Isolated Intersections. Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory.
17. Gartner N. H., Pooran F. J., Andrews C. M. (2002). Implementation and Field Testing of the OPAC Adaptive Control Strategy in RT-TRACS. Proc. of 81st Annual Meeting of the TRB.
18. Sen S., Head K. L. (1997). Controlled Optimization of Phases at an Intersection. *Transportation Science*, 31(1).
19. Rakhmangulov A. N., Lamakina M. G. (2017). *Vybor napravleniya sovershenstvovaniya sistem svetofornogo regulirovaniya transportnykh potokov v gorodakh* [Selecting the direction of improving the traffic light system of urban traffic

References

1. Rejcen E. A. (1998) *Gradostroytel'nye osnovy postroyeniya avtomatyzirovannykh system upravleniya dorozhnym dvyzheniyem* [Urban planning basics of building the automated traffic control systems]. *Urban planning and spatial planning*, 2. [in Russian].
2. Vlasov A. A. (2012). *Adaptivnyye systemy upravleniya dorozhnym dvyzheniyem v gorodakh* [Adaptive traffic management systems in cities]. Penza: PSUAB. [in Russian].
3. Pytaleva O. A. (2010). *Obosnovaniye parametrov marshrutnoj sety gorodskogo nazemnogo passazhyrskogo transporta* [Justification of the parameters of the route network of urban land passenger transport] (Ph.D.). MSTU. [in Russian].

- flows management]. *Modern Problems of Russian Transport Complex*, 7(1). [in Russian].
20. Dell'Olmo P., Mirchandani P. (1995). REALBAND: An Approach for Real-Time Coordination of Traffic Flows on Networks. *Transportation Research Record*, 1494.
 21. Vlasov A. A., Orlov N. A., Chushkyna K. A. (2014). *Metodyka rascheta rezhymov raboty svetofornykh obektov v usloviyakh nasyshhennogo dyzheniya* [Design procedure of traffic light signals in the conditions of the saturated movement]. *Naukovedenie*, 2(21). [in Russian].
 22. Lowrie P. R. (1982). The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) – Principles, Methodology, Algorithms. Proc. of the IEE Int. Conf. on Road Traffic Signalling.
 23. Martin P. T., Hockaday S. (1995). SCOOT – An Update. *ITE Journal*, 65(1).
 24. Webster F. V., Cobbe B. M. (1966). *Traffic Signals*. London: HMSQ.
 25. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. (2008). Ottawa: Institute of Transportation Engineers.
 26. Akcelik R. (2011). An assessment of the Highway Capacity Manual 2010 roundabout capacity model. Proc. of TRB Int. Roundabout Conf. URL: http://www.sidrasolutions.com/documents/trbrouconf2011_akcelik_hcm2010_paper.pdf (Last accessed 06.05.2020).
 27. Highway Capacity Manual. (2010). Washington: TRB.
 28. Horbachov P., Makarichev A., Shevchenko V. (2019). *Otsinka zatrytok rukhu na rehulovanykh perekhrestyakh miskykh vulyts iz tryfaznym tsykлом rehulivannia* [Estimation of delay at signalized intersections of urban streets with a three-phase signal]. *Automobile transport*, 44. [in Ukrainian].

Горбачов Петро Федорович, д.т.н., професор, завідувач каф. транспортних систем і логістики, gorbachov.pf@gmail.com, тел. +38 050-303-26-22,

Свічинський Станіслав Валерійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики, stas_svichinsky@ukr.net, тел. +38 050-609-00-00,

Шевченко Володимир Вадимович, аспірант, каф. транспортних систем і логістики, vshevchenko.25@gmail.com, тел. +38 093-886-96-59.

Определение граничного уровня загрузки второстепенных подходов к городской магистрали с координированным управлением

Аннотация. Проблема. Затормы на городской улично-дорожной сети в условиях быстрого роста парка транспортных средств и интенсивности дорожного движения требуют повышения эффективности использования существующей сети за счет внедрения современных технологий организации дорожного движения, в том числе

координированного управления светофорами. Для разработки плана координации необходимо иметь представление о максимально допустимом уровне загрузки второстепенных подходов к городской магистрали с координированным управлением и проверить возможности формулы Вебстера при оценке задержек транспортных средств на координированных перекрестках. **Цель.** Определение максимального уровня загрузки второстепенных подходов к магистрали с координированным управлением. **Методология.** В условиях отсутствия точной аналитической оценки задержек на регулируемом перекрестке основным инструментом исследования стал имитационный эксперимент с условиями обслуживания транспортных средств, которые обычно встречаются на второстепенных подходах к магистральным городским улицам. **Результаты.** Сравнение результатов имитационного эксперимента с расчетами по аналитической модели позволило выделить переход к ускоренному росту экспериментальных значений задержки транспортных средств, когда они перестают попадать в область, ниже аналитической оценки. **Оригинальность.** Впервые была получена количественная оценка максимально допустимого уровня загрузки второстепенных подходов к городской магистрали, необходимая для создания плана координации светофоров на магистральной улице. **Практическая значимость.** Разработана надежная основа для создания нового метода разработки планов координации светофоров на городских магистральных улицах. Она включает детальное рассмотрение распределения транспортных потоков по направлениям движения и позволяет учесть максимальный уровень загрузки второстепенных подходов к городской магистральной улице с координированным управлением.

Ключевые слова: транспортное средство, регулируемый перекресток, план координации, уровень загрузки перекрестка, имитационная модель.

Горбачёв Пётр Фёдорович, д.т.н., профессор, заведующий каф. транспортных систем и логистики, gorbachov.pf@gmail.com, тел. +38 050-303-26-22,

Свичинский Станислав Валерьевич, к.т.н., доцент, доцент каф. транспортных систем и логистики, stas_svichinsky@ukr.net, тел. +38 050-609-00-00,

Шевченко Владимир Вадимович, аспірант, каф. транспортных систем и логистики, vshevchenko.25@gmail.com, тел. +38 093-886-96-59.

Determining the maximum threshold of saturation level for minor approaches to the arterial street with coordinated control

Abstract. Problem. The congestions at the city road network in the conditions of the rapid growth of the

car fleet and traffic require increasing efficiency of existing network use due to the introduction of modern traffic control technologies including signal coordination. To develop a coordination plan it is necessary to have a notion about the maximum threshold of saturation level for minor approaches to the urban street with coordinated control and to test possibilities of the Webster formula in the assessment of vehicle delays at coordinated intersections. **Purpose.** The purpose is determining the maximum saturation rate for minor approaches to a street with coordinated control. **Methodology.** In the absence of accurate analytical estimate of the delay at a signalized intersection, a simulation experiment with the terms of service as those commonly existing at the approaches to major urban streets became the main tool of study. **Results.** A comparison of the simulation experiment results with the calculations using analytical model allowed to highlight the transition to the strong growth of the experimental values of the vehicle delay when they cease to reach the area lower than the analytical estimate. **Novelty.** For the first time, a quantitative assessment of the maximal permissible saturation level for minor approaches to the urban arterial street was obtained. The assessment is necessary to create a signal coordination plan on an arterial street. **Practical value.** A reliable basis for creating a new method for the development of signal coordination plan on the urban arterial street is

made. It includes a detailed consideration of the distribution of traffic flows among the traffic directions and takes into account the maximum threshold of saturation level for minor approaches to the urban arterial street with coordinated control.

Keywords: vehicle, signalized intersection, signal coordination, intersection occupancy rate, simulation model.

Horbachov Peter, DSc, Professor, Head of the Department of Transportation Systems and Logistics of Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: gorbachov.pf@gmail.com

Contact tel.: (050) 303-26-22

Svichynskiy Stanislav, PhD, associate professor of the Department of Transportation Systems and Logistics of Kharkiv National Automobile and Highway University

Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: stas_svichinsky@ukr.net

Contact tel.: (050) 609-00-00

Shevchenko Volodymyr, PhD Student

Transportation Systems and Logistics of Kharkiv National Automobile and Highway University

Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

E-mail: vyvshevchenko.25@gmail.com

Contact tel.: (093) 886-96-59
