

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.051

doi: 10.26906/SUNZ.2023.2.015

П. Ф. Горбачов, Є. В. Любий

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ЗАТРИМОК ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ У ПЛАНІ КООРДИНАЦІЇ

Анотація. У статті розроблені аналітичні моделі, що можна використовувати для оцінювання затримок транспортних засобів, які рухаються скоординованими ділянками міських магістралей в умовах низького трафіку та при їхньому груповому прибутті до чергового перехрестя в плані координації. Результати визначення затримок за представленими моделями доцільно використовувати при порівнянні альтернативних планів координації, формуванні методик їхнього створення, а також для пошуку дієвих і надійних інструментів для підвищення ефективності створюваних планів координації. В подальшому розроблені моделі потребують уточнення за рахунок розгляду інших можливих варіантів організації зсуву включення дозвольного сигналу для лівоповоротної фази в рамках плану координації.

Ключові слова: групове прибуття, зелена хвиля, пачка автомобілів, план координації, транспортні затримки.

Вступ

На стадії створення плану координації (ПК) світлофорного регулювання (СР) на міській магістралі (ММ) його ефективність визначається насамперед скороченням витрат часу учасників руху на очікування ними можливості проїзду чергового перехрестя зі СР. Оцінка таких витрат, які зазвичай просто називаються затримками, завжди базується на характеристиках вхідного потоку [1, 2]. Нині цей потік на підходах до ізольованих перехресть здебільшого приймають за Пуасонівський, або, у найпростішому варіанті, – за простий регулярний потік із рівними інтервалами прибуття між усіма учасниками руху. Другий варіант для ізольованих перехресть не заслуговує на пильну увагу через відсутність реальних транспортних об'єктів, які можуть йому відповідати, адже навіть для обмеженого в часі періодами високого навантаження колонного руху очевидним є той факт, що кожен водій самостійно обирає дистанцію безпеки, що порушує регулярність потоку автомобілів, які прибувають до перехрестя. Пуасонівський же, найпростіший потік добре підходить для опису випадкового прибуття транспортних засобів (ТЗ) до перехрестя, але і він у разі магістральної координації не відповідатиме реальній ситуації, оскільки вплив світлофорних циклів (СЦ) на характер прибуття автомобілів до перехрестя тут занадто великий.

Аналіз досліджень і публікацій. В існуючих методиках розроблення планів магістральної координації використовуються два основні підходи до опису групового прибуття автомобілів до скоординованих перехресть [3]. Найрозвиненішим можна вважати підхід циклічних профілів потоку Робертсона [4, 5], який в явному вигляді описує групи автомобілів, що прибувають до наступного перехрестя в ПК. Однак його реалізація в програмах TRANSYT і SCOOT не змогла забезпечити більш високих результатів координації порівняно з аналогічними ме-

тодами, в яких використовується простіший опис групового прибуття у вигляді стрічки руху автомобілів. Такий опис реалізовано в просторово-часовій діаграмі (ПЧД) [6] та американських програмах координації MAXBAND, MULTIBAND та ін. [7, 8]. Загальною ж причиною недостатньо високих результатів координації роботи світлофорів на ММ є використання узагальнених оптимізаційних підходів до розв'язання цієї задачі, без детального розгляду її окремих аспектів і, зокрема, у відсутності аналітичного опису втрат часу автомобілістами на очікування можливості проїзду чергового перехрестя в ПК.

Взагалі кажучи, у плані магістральної координації роботи світлофорів має враховуватися наявність не одного, а двох варіантів прибуття до регульованого перехрестя. Перший варіант стосується координованих автомобілів, які підїжджають до чергового, але не першого перехрестя ділянки, що координується [9]. А другий – до всіх інших транспортних потоків (ТП) на перехрестях координованої ділянки ММ. До некоординованих належать потоки автомобілів на другорядних підходах до магістралі та на підході до першого перехрестя координованої ділянки магістралі, для яких параметри потоку, що входить на перехрестя, визначаються умовами руху на відповідній ділянці вулично-дорожньої мережі (ВДМ). При цьому відсутність координації з іншими світлофорними об'єктами зумовлює те, що найбільш підходящим тут видається припущення про доцільність розгляду прибуття ТЗ з цих напрямків до координованих перехресть як випадкового. Тоді для його опису добре підходить Пуасонівський найпростіший потік, а витрати часу учасників руху на подолання регульованого перехрестя можуть розраховуватися за відомими формулами затримки, заснованими на залежності Вебстера [10].

Постановка завдання. Для учасників руху, що пересуваються безпосередньо координованою магістраллю, час прибуття до чергового перехрестя багато

в чому визначається параметрами ПК, а випадковість цього процесу, яка зумовлена поведінкою водіїв, має враховуватися в налаштуваннях самого плану. За нормального проходження пачки через координовані світлофори на магістралі, час очікування дозвільного сигналу для пачки, коли ПК надає їй можливість проїзду без очікування початку дозвільного сигналу, розумно вважати рівним 0.

Своєчасне ввімкнення зеленого сигналу для координованої пачки автомобілів, власне, і є основною метою магістральної координації. Добротний ПК зобов'язаний створити таку можливість на всіх перехрестях в одному напрямку, обраному за прямий (основний), та на більшості перехресть, якщо не на всіх, у зворотному напрямку. Однак, жоден ПК не в змозі забезпечити його повне виконання всіма водіями в ТП, індивідуальна поведінка яких завжди призводить до випадкового характеру процесу руху автомобілів у потоці. При цьому затримки, що виникають через випадковий характер процесу руху автомобілів у пачці, передусім зумовлені саме поведінкою водіїв, унаслідок чого вони піддаються виключно емпіричній оцінці. Для неї потрібне спостереження за поведінкою багатьох пачок автомобілів в умовах функціонування конкретного реального плану магістральної координації.

Слід також відзначити, що роботи, які розвивають концепцію циклічних профілів потоку [11, 12] не можуть бути безпосередньо використані для емпіричного оцінювання закономірностей руху пачки, тому що, на жаль, сучасний рівень планування заходів з організації дорожнього руху (ОДР) ще не забезпечив у містах світу функціонування помітної кількості ефективних (добротних) планів магістральної координації. І це також ускладнює можливість для оцінювання випадкового елемента затримки автомобілів у складі координованої пачки на даному рівні досліджень. Така оцінка може бути елементом остаточного проекту із впровадження конкретного ПК. Але, оскільки отримати її аналітично не є можливим, то випадкові затримки можна врахувати на етапі імітаційного моделювання процесу функціонування нового ПК, проведення якого в сучасних умовах видається вельми бажаним.

Мета статті розробка аналітичних моделей для оцінки середніх затримок автомобілів, що рухаються в пачках скоординованими ділянками ММ за умов низького трафіку.

Виклад основного матеріалу

Слід розуміти, що аналітична оцінка затримок автомобілів у ПК є абсолютно необхідною для порівняння альтернативних планів, формування методик їхнього створення та пошуку дієвих інструментів для підвищення ефективності створюваних ПК, бо повністю уникнути затримок для автомобілів, які рухаються в координованій пачці, можна тільки у виняткових випадках – на фрагментах ВДМ з однаковим часом проїзду координованих ділянок. За стандартних підходів до планування, затримки здебільшого виникають у зворотному, по відношенню до основного напрямку руху ТП.

Вони викликані вимушеними відхиленнями розрахункового часу ввімкнення дозвільного сигналу з метою об'єднання дозвільних фаз зустрічних напрямків в одному СЦ на перехресті, а також під час повороту автомобілів, що координуються, ліворуч, коли виділена лівоповоротна фаза наявна у СУ ПК. Такі затримки виникають навіть за повного дотримання всіма учасниками руху умов, що надаються ПК, коли затримки для автомобілів у прямому напрямку руху пачки зеленої хвилі (ЗХ) можна вважати рівними 0.

Під час розгляду наслідків зміщення часу ввімкнення дозвільного сигналу відносно розрахункового часу прибуття пачки, її затримки та затримки лівоповоротних потоків, мають оцінюватися для умов низького трафіку, в яких уся пачка встигає проїхати чергове перехрестя за час дозвільного сигналу, виділеного для неї в циклі, у тому разі, якщо момент прибуття першого автомобіля в пачці на чергове перехрестя збігається з моментом ввімкнення дозвільного сигналу.

Навантаження на перехрестя не має враховуватися в затримці не тому, що час проїзду пачки підбирають під її розмір. Домогтися такої відповідності в жорстких ПК практично неможливо, оскільки фактичний розмір пачки є випадковим. Крім того, на магістралях завжди присутня випадкова кількість додаткових автомобілів з різних напрямків, які стають частиною пачки починаючи з того світлофора на магістралі, перед яким вони з'явилися. В умовах реалізації плану жорсткої координації зазвичай вважається, що поява додаткових автомобілів компенсується коливаннями швидкості пачки, за постійної середньої інтенсивності їхнього виникнення на шляху її руху (зараз було більше, на наступному перехресті або в наступному циклі стане менше). А самі витрати часу, викликані випадковим характером виникнення додаткових автомобілів, є предметом окремого вивчення, залежно від прийнятої стратегії виділення додаткового часу на їхній розгін до швидкості руху координованої пачки [9]. Ці витрати оцінюються окремо і під час оцінки витрат часу лівоповоротних потоків й пачки ЗХ на очікування дозвільного сигналу не враховуються.

Затримки пачки ЗХ та лівоповоротних потоків слід оцінювати в умовах низького трафіку внаслідок того, що вони безпосередньо і в явному вигляді мають відображати наслідки зміщення часу ввімкнення дозвільного сигналу відносно розрахункового часу прибуття пачки до перехрестя. Тому додаткові затримки, пов'язані з випадковістю процесу або високим навантаженням перехрестя, які безпосередньо не пов'язані з такими зсувами, тут враховувати не слід. Невід'ємна різниця між моментами ввімкнення дозвільного сигналу та розрахунковим часом прибуття пачки до перехрестя, власне, і є очевидною оцінкою часу очікування можливості проїзду пачки через регульоване перехрестя. Сама ж можливість проїзду пачки обмежена періодом роботи фази, що дозволяє рух пачки, і тому повністю визначається ПК.

Для таких умов достатньо припустити, що всі автомобілі в пачці розподілені по її довжині рівномірно, відомий час прибуття першого автомобіля в

пачці на перехрестя, яке розглядається, і довжина пачки в одиницях часу. Ці припущення багато в чому аналогічні представленню групового прибуття у вигляді стрічки, тому не потребують окремого обґрунтування, внаслідок широкого використання стрічки в практиці ОДР. Тоді, для розрахунку часу затримки, потрібно знати проміжок часу між моментом увімкнення дозвільного сигналу та розрахунковим моментом прибуття першого автомобіля в пачці, що, власне, й визначатиме час затримки на перехресті, яке розглядають, і якість ПК взагалі.

Також слід врахувати той факт, що оскільки різниця між цими двома моментами може набувати будь-яких значень у межах циклу, то в якихось випадках вона може ставати настільки великою, що частина дозвільної фази, яка залишилася для проїзду пачки, буде меншою за її довжину, а частина автомобілів буде змушена зупинитися й очікувати на ввімкнення дозвільної фази вже в наступному циклі. Для цих автомобілів час очікування збільшується на забороняючу рух частину циклу, яка разом із тривалістю дозвільного сигналу має бути доступною в будь-якому плані координаті, як обов'язкові для його формування елементи.

Першим етапом оцінювання має стати більш загальний, стосовно прямого руху пачки, випадок повороту автомобілів із пачки ліворуч, протягом виділеної для цього в циклі фази. Його спільність зумовлена вторинним характером фази лівого повороту щодо основного циклу координаті, що може породити найрізноманітніші поєднання між часом прибуття лівоповоротних автомобілів на чергове перехрестя в координаті та часом увімкнення дозвільного сигналу для них у межах СЦ. Природним (доречним) тут є припущення про рівномірний характер розподілу лівоповоротних автомобілів за довжиною пачки, що зумовлено цілковитою (повною) випадковістю процесу формування пачки координованих ТЗ з погляду напрямку подальшого руху кожного з них.

Звичайна для більшості наявних і потенційних ПК ситуація виникає, коли тривалість фази для пачки ЗХ перевищує тривалість фази для лівого повороту. Але як виняток, може бути й по-іншому, тому таку можливість необхідно враховувати під час формування відповідних аналітичних залежностей. Друга ситуація для лівоповоротних автомобілів, узагалі кажучи, сприятливіша, оскільки в ній обов'язково буде присутній період часу, коли автомобілі вже не прибувають, а виїжджати ще можуть, що також має бути враховано в аналітичному описі процесу.

Для виведення (розробки) відповідних залежностей, спочатку слід ввести поняття джерел виникнення часу затримки без навантаження, тобто для умов низького трафіку, в яких уся пачка встигає проїхати чергове перехрестя за час дозвільного сигналу, виділеного для неї в циклі, якщо момент прибуття першого автомобіля в пачці на чергове перехрестя збігається з моментом увімкнення дозвільного сигналу.

За цих умов затримки дорівнюють часу очікування ввімкнення дозвільного сигналу для лівоповоротних автомобілів, і воно обов'язково виникає для

тієї частини пачки, у складі якої перебувають і лівоповоротні автомобілі, і яка не має спільного періоду часу з дозвільним сигналом для лівого повороту.

Це завжди позитивні й не більші, ніж тривалість фази для ЗХ, одна або дві області з періоду прибуття пачки, положення і тривалість яких, у загальному випадку, визначають різницею часів початку й закінчення двох періодів часу: прибуття автомобілів (пачка хвилі) та їхнього відправлення (фаза лівого повороту). Для розпізнання відповідних елементів часу вводяться такі позначення:

1. Область раннього прибуття ε , рис. 1

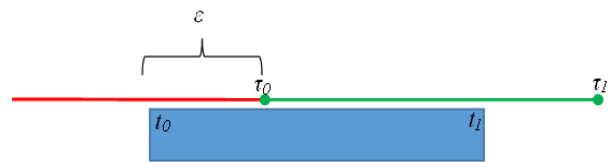


Рис. 1. Варіант раннього прибуття пачки, як джерела виникнення затримок

2. Область пізнього прибуття λ , рис. 2

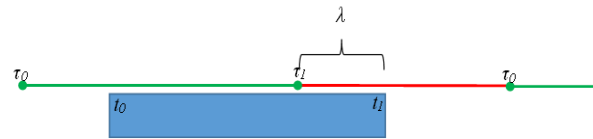


Рис. 2. Варіант пізнього прибуття пачки, як джерела виникнення затримок

Тут і далі використовуються наступні позначення: ε , λ – індекси, що позначають область раннього та пізнього прибуття пачки автомобілів; T_ε , T_λ – відповідно, середній час очікування, що виникає в області раннього і пізнього прибуття, c ; t_0 , t_1 – відповідно, моменти початку і закінчення періоду планового прибуття пачки ЗХ до перехрестя, c ; τ_0 , τ_1 – відповідно, моменти початку та закінчення годиння дозвільного сигналу для пачки автомобілів, що прибуває, c .

За скоординованої роботи світлофорів моменти планового прибуття пачки ЗХ до перехрестя t_0 і ввімкнення дозвільного сигналу для неї збігаються. Але зараз розглядається затримка лівоповоротних автомобілів, а внаслідок їхнього рівномірного розподілу в пачці ЗХ, вони також починають прибувати до перехрестя в момент часу t_0 . Але дозвільний сигнал для лівоповоротних автомобілів – τ_0 може вмикатися і не в момент їхнього прибуття до чергового перехрестя. Саме тому, що в ПК в загальному випадку моменти часу t_0 і τ_0 для лівоповоротних автомобілів не збігаються, вони є найзручнішим об'єктом для побудови шуканих залежностей часу очікування без навантаження під час групового прибуття – вони прибувають у складі координованої пачки, а зелене світло для них може вмикатися майже в будь-який момент у циклі. Усі інші варіанти групового прибуття є окремим випадком стосовно прибуття лівоповоротних автомобілів.

Щоб отримати загальний середній час очікування для всіх лівоповоротних автомобілів, що прямують у пачці ЗХ, середній час очікування для таких автомобілів, що прибувають на перехрестя впродовж періодів раннього і пізнього прибуття, потрібно зв'язати через відповідні їм частини пачки:

$$T = T_\varepsilon \cdot \Delta_\varepsilon + T_\lambda \cdot \Delta_\lambda, \quad (1)$$

де T – середній час очікування для всіх лівоповоротних автомобілів, що прямують у пачці ЗХ, с; Δ_ε , Δ_λ – частка в пачці автомобілів, що прибувають на перехрестя протягом періодів раннього і пізнього прибуття відповідно.

Значення часток розраховують з урахуванням того, що області раннього та пізнього прибуття не можуть перевищувати довжину всієї пачки:

$$\Delta_\varepsilon = \begin{cases} \frac{\tau_0 - t_0}{t_p}, & \text{якщо } \tau_0 - t_0 < t_p, \\ 1, & \text{якщо } \tau_0 - t_0 \geq t_p \end{cases}, \quad (2)$$

та

$$\Delta_\lambda = \begin{cases} \frac{t_1 - \tau_1}{t_p}, & \text{якщо } t_1 - \tau_1 < t_p, \\ 1, & \text{якщо } t_1 - \tau_1 \geq t_p \end{cases}, \quad (3)$$

де t_p – тривалість періоду планового прибуття пачки ЗХ з лівоповоротними автомобілями до перехрестя, $t_p = t_1 - t_0$, с.

Розрахунок середнього часу очікування для автомобілів, що прибувають за період раннього прибуття на перехрестя, як уже згадувалося вище, ґрунтується на припущенні про рівномірний розподіл за довжиною пачки автомобілів, що прибувають і повертають ліворуч.

Таке припущення зумовлює той факт, що середній час очікування дорівнює половині різниці між початком фази лівого повороту та початком прибуття пачки ЗХ в тому разі, якщо лівий поворот буде дозволено протягом дозвільного сигналу для ЗХ, як показано на рис. 1. Пояснюється це тим, що затримка першого автомобіля з області раннього прибуття пачки, який прибув у момент t_0 дорівнює $\tau_0 - t_0$, а останнього з тієї ж області, який прибув у момент τ_0 , дорівнює 0, відповідно середня затримка для них дорівнюватиме $\frac{\tau_0 - t_0}{2}$.

Сума затримок для всіх пар автомобілів, рівновіддалених від кінців проміжку часу між t_0 також дорівнюватиме $\tau_0 - t_0$, відповідно середня затримка для них дорівнюватиме $\frac{\tau_0 - t_0}{2}$. За рівномірного розподілу автомобілів у пачці, ймовірність виникнення для всіх таких пар дорівнює і становить $2/n$, де n – це кількість автомобілів у пачці. Тому й ймовірність у всіх середніх однакова і дорівнює $2/n$, що в підсумку призводить до загальної середньої затримки

автомобілів із розглянутої частини області раннього прибуття, що дорівнює $\frac{\tau_0 - t_0}{2}$.

Якщо ж початок лівого повороту відбувається поза фазою ЗХ, то частина області раннього прибуття пачки, що дорівнює $\tau_0 - t_1$, повністю, без поділу на 2, входить у час очікування дозвільного сигналу для лівоповоротних автомобілів, що прибувають до перехрестя у складі пачки ЗХ, рис. 3.

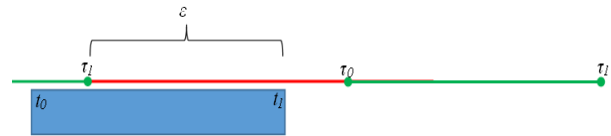


Рис. 3. Другий варіант раннього прибуття пачки, як джерела виникнення затримок

З урахуванням цих міркувань, вираз для середнього часу очікування автомобілів у період раннього прибуття матиме такий вигляд:

$$T_\varepsilon = \begin{cases} \frac{\tau_0 - t_0}{2}, & \text{якщо } \tau_0 - t_0 \leq t_p \\ \frac{t_1 - t_0}{2} + \tau_0 - t_1, & \text{якщо } \tau_0 - t_0 > t_p \end{cases}. \quad (4)$$

Наявність очевидних зв'язків між часовими характеристиками в формулі (4), зумовлених розташуванням обох фаз усередині СЦ, дає змогу подати цей вираз в іншому вигляді:

$$T_\varepsilon = \begin{cases} \frac{\tau_0 - t_0}{2}, & \text{якщо } \tau_0 - t_0 \leq t_p \\ \tau_0 - \frac{t_0 + t_1}{2}, & \text{якщо } \tau_0 - t_0 > t_p \end{cases}. \quad (5)$$

Область пізнього прибуття охоплює період прибуття пачки ЗХ, що триває після завершення дозвільної фази для лівого повороту, рис. 2. Автомобілі, що прибувають у цей період, змушені очікувати на початок фази лівого повороту вже в наступному циклі. У зв'язку з цим, а також з урахуванням властивостей середнього часу очікування дозвільного сигналу, зазначеними вище, вираз для часу очікування автомобілів з області пізнього прибуття матиме такий вигляд:

$$T_\lambda = \begin{cases} \frac{t_1 - \tau_1}{2} + T_y - \tau_l - (t_1 - \tau_1), & \text{якщо } 0 < t_1 - \tau_1 \leq t_p \\ 0, & \text{якщо } t_1 - \tau_1 \leq 0 \text{ або } t_1 - \tau_1 > t_p \end{cases}, \quad (6)$$

де τ_l – тривалість фази лівого повороту, $\tau_l = \tau_1 - \tau_0$, с.

Зв'язки між часовими характеристиками в формулі (6) дають змогу записати цей вираз у простішому вигляді:

$$T_\lambda = \begin{cases} T_y - \tau_l - \frac{t_1 - \tau_1}{2}, & \text{якщо } 0 < t_1 - \tau_1 \leq t_p \\ 0, & \text{якщо } t_1 - \tau_1 \leq 0 \text{ або } t_1 - \tau_1 > t_p \end{cases}. \quad (7)$$

Вирази, отримані для середнього часу очікування автомобілів з ділянок раннього і пізнього прибуття до перехрестя, є звичайними доданками

формули (1) не на всьому циклі світлофорного регулювання, оскільки можлива ситуація, коли вони існують одночасно, або одна з досліджуваних фаз – ЗХ чи лівоповоротної, розпочинається в одному циклі, а закінчується вже в наступному. Щоб визначити умови використання доданків формул (5) і (7) у (1), потрібно зафіксувати початок циклу, пов'язавши його з початком одного з основних тактів СЦ. Оскільки метою координації роботи світлофорів є безперешкодний пропуск пачки ЗХ, розумно вважати саме цю фазу першою в циклі. Тоді момент увімкнення дозвільного сигналу для фази ЗХ t_0 , він же початковий момент прибуття пачки автомобілів до перехрестя, стає ще й початком усього циклу, а старт дозвільного сигналу для лівого повороту τ_0 набуває додаткового сенсу – зсуву початку лівоповоротної фази відносно початку циклу.

Величина цього зсуву в реальному ПК може набувати будь-якого значення, яке не перевищує тривалості циклу, $0 \leq \tau_0 < T_{\text{ц}}$ і правила використання фор-

мули (1) мають бути визначені для всього цього діапазону.

Висновки

Одним із основних критеріїв, що характеризує ефективність впровадження ПК на ММ є затримки транспорту, які найчастіше характеризуються скороченням витрат часу на очікування учасниками руху можливості проїзду чергового перехрестя в ПК.

Розроблені моделі сформовані для умов низького трафіку і групового прибуття та можуть використовуватись при проведенні оцінювання витрат часу, що витрачається на очікування водіями, які рухаються скоординованими ділянками ВДМ, можливості проїзду регульованих перехресть, що включені до ПК.

Подальшим напрямком проведення досліджень є удосконалення отриманих аналітичних моделей за рахунок урахування в них інших можливих варіантів організації зсуву включення дозвільного сигналу для руху лівоповоротних потоків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбачов, П.Ф., Макарічев, О.В., Шевченко, В.В. (2019). Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць із трифазним циклом регулювання. *Автомобільний транспорт*, 44, 30–39. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30>.
2. Горбачов, П.Ф., Макарічев, О.В., Шевченко, В.В. (2021). Імовірність виникнення неповної пачки автомобілів при координованому керуванні на міській магістралі. *Вісник ХНАДУ*, 92(1), 214–225. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214>.
3. Любий, Є.В. (2022). Аналіз методів формування планів координації світлофорних об'єктів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2(19), 108–122. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
4. Robertson, D.I. (1969). *TRANSYT: A Traffic Network study Tool*. Gt. Brit. Road Research Laboratory, Rept. LR 253, 22–41.
5. Zhao, L., Rilett, L. R., Tufuor, E. (2017). Calibrating the Robertson's Platoon Dispersion Model on a Coordinated Corridor with Advance Warning Flashers. *Transportation Research Record*, 2623(1), 10–18. <https://doi.org/10.3141/2623-02>.
6. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2015). *Signal Timing Manual – Second Edition*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22097>.
7. Little, J.D.C., Kelson, M.D., Gartner, N.H. (1981). *MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks*. *Transportation Research Record* 795, 40–46.
8. Gartner, N.H., Assmann, S.F., Lasaga, F., Hou, D.L. (1990). *MULTIBAND – A Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme*. *Transportation Research Record*, 1287, 212–222. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1990/1287/1287-022.pdf> (дата звернення 20.02.2023).
9. Горбачов, П.Ф., Любий, Є.В. (2022). Методика оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, 22, 81–91. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2>.
10. Webster, F.V. (1958). *Traffic Signal Settings*. Road Research Technical Paper No. 39. London: Department of Scientific and Industrial Research, 45 p.
11. Geroliminis, N., Skabardonis, A. (2005). Prediction of Arrival Profiles and Queue Lengths along Signalized Arterials by using a Markov Decision Process. *Transportation Research Record*, 1934(1), 116–124. <https://doi.org/10.1177/0361198105193400112>.
12. L., Shen, R., Liu, Z., Yao, W., Wu, H., Yang. (2019). Development of Dynamic Platoon Dispersion Models for Predictive Traffic Signal Control. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20, 2, 431–440. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2815182>.

Received (Надійшла) 11.03.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.05.2023

An approach to assessing transport delays in terms coordinated timing plan

Peter Horbachov, Yevhen Liubyi

Abstract. The article presents analytical models that can be used to estimate the delays of vehicles moving along coordinated sections of city highways in low traffic conditions and when they arrive in groups at the next intersection in terms of coordinated timing plan. The results of determining delays according to the presented models should be used for comparing alternative coordinated timing plan, developing methods for their creation, as well as for finding effective and reliable tools to improve the efficiency of the created coordinated timing plan. In the future, the developed models need to be improved by considering other possible options for organizing the offset in the inclusion of the permissive signal for the left-turn phase within the coordinated timing plan.

Keywords: group arrival, green wave, platoon, coordinated timing plan, transport delays.