

# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.051

doi: 10.26906/SUNZ.2023.3.005

П. Ф. Горбачов, Є. В. Любий, О. С. Колій

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАТРИМОК НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ ПРИ ГРУПОВОМУ ПРИБУТТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДО НИХ

**Анотація.** У статті представлені результати уточнення аналітичних моделей, які можна використовувати для оцінювання затримок транспортних засобів, які рухаються скоординованими ділянками міських магістралей в умовах низького навантаження та при їхньому груповому прибутті до чергового перехрестя в плані координації. Використання отриманих в роботі залежностей є дуже актуальним на прикладі просторової координації роботи світлофорів на вулично-дорожній мережі міст, коли є ділянки з близько розташованими світлофорними об'єктами. Подальшим напрямком проведення досліджень є експериментальна перевірка розроблених аналітичних моделей визначення середньої затримки транспортних засобів, що рухаються скоординованими ділянками міських магістралей, за умови їх групового прибуття до перехрестя.

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

### Вступ

У світовій практиці організації дорожнього руху (ОДР) одним із основних критеріїв ефективності впровадження та оцінювання систем управління (СУ) світлофорними об'єктами (СО) на міських магістралях (ММ) прийнято вважати затримки транспортних засобів (ТЗ) при подоланні ними скоординованих фрагментів вулично-дорожньої мережі (ВДМ) [1-5].

На даний час основним джерелом для отримання величини затримок ТЗ при подоланні скоординованих ділянок ММ є засоби мікросимуляції руху транспортних потоків (ТП). Отримані за рахунок використання імітації руху ТП результати є доброю основою для оцінки ефективності впровадження або удосконалення планів координації (ПК), але, далеко не завжди, ці результати повною мірою характеризують реальні умови руху ТЗ скоординованими ділянками ММ, наприклад, групове прибуття транспортних засобів до чергового перехрестя скоординованої ділянки ММ.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Ця наукова стаття є прямим продовженням роботи [3], де було представлено результати аналізу існуючих підходів формування ПК з урахуванням опису групового прибуття транспортних засобів до скоординованих перехрестя, тому в даній статті не має потреби проводити аналітичний огляд останніх досліджень і публікацій за обраною тематикою.

**Постановка завдання. Мета статті** уточнення розроблених у статті [3] аналітичних моделей, які можна використовувати оцінювання середніх затримок транспортних засобів, що рухаються в пачках зеленої хвилі (ЗХ) за умов низького завантаження скоординованих ділянок ММ.

### Виклад основного матеріалу

Слід розуміти, у своєму початковому вигляді представлена в роботі [3] формула (1), може використовуватися тоді, коли періоди раннього і пізнього прибуття до перехрестя існують одночасно. А така ситуація може виникати в разі, якщо тривалість лівоповоротної фази є меншою за тривалість фази ЗХ, що, взагалі-то, не є чимось незвичайним. При цьому обов'язковою умовою можливості одночасного існування обох областей є потрапляння і початку, і кінця лівоповоротної фази в середню частину відрізка фази лівого повороту (ЛП), тобто

$$T = T_{\varepsilon} \cdot \Delta_{\varepsilon} + T_{\lambda} \cdot \Delta_{\lambda}, \quad \text{якщо } \tau_0, \tau_1 \in ]t_0; t_1[. \quad (1)$$

У всіх інших випадках ненульову довжину матиме тільки одна з областей. При вході зсуву лівоповоротної фази в позитивну частину значень і подальшому його збільшенні, з'являється область раннього прибуття ТЗ у пачці. Вона існуватиме завжди за подальшого зсуву в позитивному напрямі, і для неї завжди існуватиме позитивне значення часу очікування,  $T_{\varepsilon} > 0$ , за будь-якої довжини фази ЛП  $\tau_0$ .

Однак, зрештою, це не зовсім вірно з погляду остаточної оцінки часу очікування, оскільки тривалість циклу обмежена й існує область пізнього прибуття ТЗ. Ця область виникає відразу після того, як кінець лівоповоротної фази досягає початку наступного циклу, тобто початку періоду прибуття ТЗ до перехрестя. Отже, у момент, коли

$$\tau_1 = t_0 + T_{\varepsilon}, \quad (2)$$

виникають одночасно обидві області прибуття ТЗ із затримкою ЛП – і рання, і пізня. Область раннього прибуття розташовується у стартовому циклі, а о

бласть пізнього прибуття – у наступному. Обидві вони мають одну довжину та повинні мати один час очікування, якщо залежності (5) і (7), що представлені в статті [3] отримано правильно.

Після підстановки в (5) і (7), що представлені в статті [3], значення зсуву лівоповоротної фази  $\tau_0 = T_u - \tau_l$ , і відповідних лінійних перетворень, з використанням зв'язків між елементами і моментами світлофорного циклу (СЦ), було отримано, що

$$T_\varepsilon = T_\lambda = T_u - \tau_l - \frac{t_p}{2}. \quad (3)$$

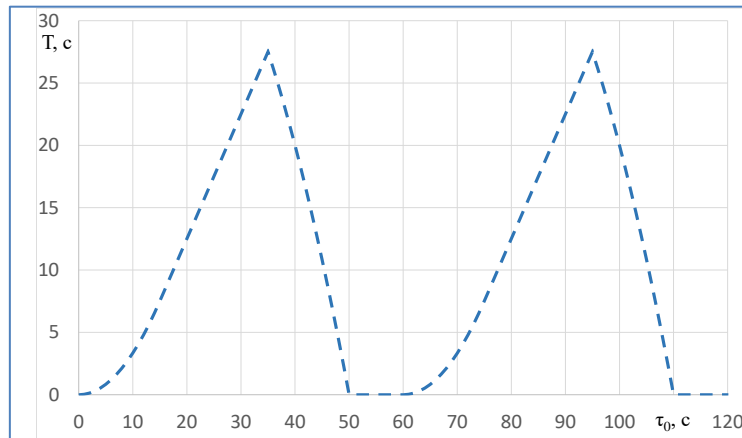
Ця точка позначає момент, в який має змінитися джерело виникнення часу очікування для лівоповоротних ТЗ – з області раннього прибуття ТЗ попереднього циклу, на область пізнього прибуття ТЗ у новому циклі.

Побудована в такий спосіб залежність середнього часу очікування моменту ввімкнення дозвольного сигналу для ЛП, для ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, від параметрів циклу світлофорного регулювання в підсумку має такий вигляд:

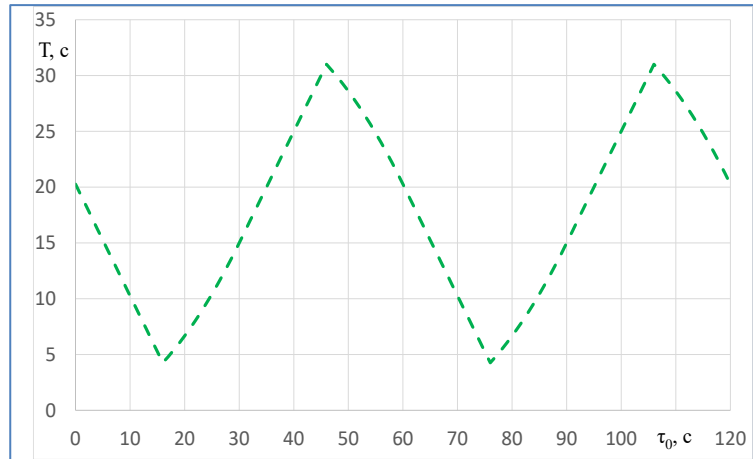
$$T = \begin{cases} T_\varepsilon \cdot \Delta_\varepsilon + T_\lambda \cdot \Delta_\lambda, & \text{якщо } 0 < \tau_0 \leq T_u - \tau_l \\ T_\lambda \cdot \Delta_\lambda, & \text{якщо } T_u - \tau_l < \tau_0 \leq T_u \end{cases}, \quad (4)$$

або

$$T = \begin{cases} \Delta_\varepsilon \left[ T_u - \tau_l - \frac{t_p}{2} \right] + \\ + \Delta_\lambda \begin{cases} T_u - \tau_l - \frac{t_l - \tau_l}{2}, & \text{за } 0 < t_l - \tau_l \leq t_p, \\ 0, & \text{за } t_l - \tau_l \leq 0 \text{ або } t_l - \tau_l > t_p \end{cases}, & 0 < \tau_0 \leq T_u - \tau_l \\ \Delta_\lambda \cdot \begin{cases} T_u - \tau_l - \frac{t_l - \tau_l}{2}, & \text{за } 0 < t_l - \tau_l \leq t_p, \\ 0, & \text{за } t_l - \tau_l \leq 0 \text{ або } t_l - \tau_l > t_p \end{cases}, & T_u - \tau_l < \tau_0 \leq T_u \end{cases} \quad (5)$$



**Рис. 2.** Залежність середнього часу очікування ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, ввімкнення сигналу, що дозволяє ЛП, від зсуву лівоповоротної фази відносно початку циклу за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 15$  с та  $\tau_l = 25$  с

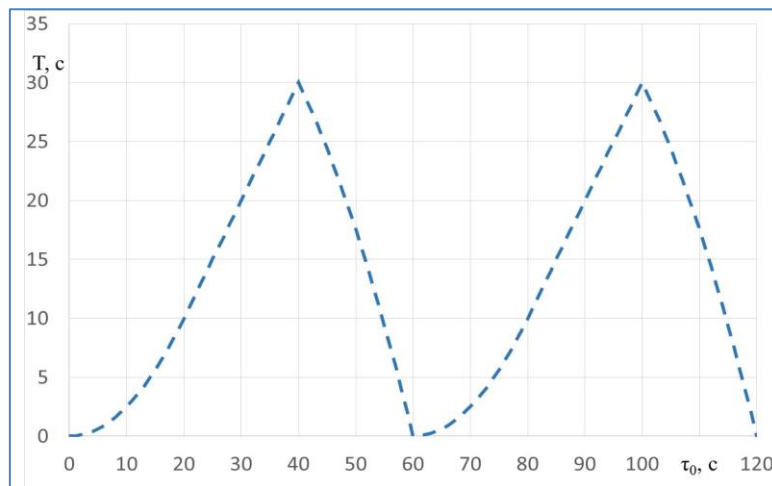


**Рис. 1.** Залежність середнього часу очікування ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, ввімкнення сигналу, що дозволяє ЛП, від зсуву лівоповоротної фази відносно початку циклу за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 30$  с та  $\tau_l = 14$  с

Отримані залежності добре ілюструються відповідним графіком, за віссю абсцис якого відкладається зсув лівоповоротної фази відносно початку циклу,  $\tau_0$ , а за віссю ординат – середній час очікування дозволу на виконання ЛП для ТЗ, що прибувають на перехрестя в пачці ЗХ, рис. 1. За нульового зсуву лівоповоротної фази щодо початку циклу, коли  $t_0 = \tau_0 = 0$ , середній час очікування для лівоповоротних ТЗ є

$$T_0 = T_{\lambda 0} = \left( T_u - \frac{t_p + \tau_l}{2} \right) \cdot \frac{t_p - \tau_l}{t_p}. \quad (6)$$

За  $t_p - \tau_l < 0$ , час очікування у стартовій точці дорівнює нулю,  $T_0 = 0$ , і взагалі, виконання цієї умови призводить до наявності проміжків із нульовим часом очікування на відрізку зсуву, довжиною  $\tau_l - t_p$  секунд, рис. 2. За рівної тривалості періодів прибуття і роз'їзду ТЗ, відрізки з нульовим часом очікування перетворюються на точку, що відображає збіг моментів прибуття пачки та ввімкнення дозвольного сигналу для них, тобто оптимальний час початку циклу, рис. 3.



**Рис. 3.** Залежність середнього часу очікування ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, ввімкнення сигналу, що дозволяє ЛП, від зсуву лівоповоротної фази відносно початку циклу за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 20$  с та  $\tau_l = 20$  с

Отримані на прикладі лівоповоротних ТЗ, що прибувають до перехрестя у складі координованої пачки, залежності часу очікування ввімкнення дозвільного сигналу мають загальний характер, оскільки охоплюють будь-які варіанти тривалості періодів прибуття та роз'їзду ТЗ, а також моментів прибуття пачки та ввімкнення дозвільного сигналу. Природно, що всі вони працюють тільки в разі, якщо сумарна тривалість дозвільної фази для ЛП і періоду прибуття пачки ЗХ буде меншою за тривалість усього циклу

$$\tau + t < T. \quad (7)$$

Ця умова в реальності виконується завжди, з урахуванням обов'язкової наявності в циклі окремої фази для другорядного напрямку, відсутність якого означає також і відсутність ЛП, оскільки тоді повертати буде просто нікуди. Ця фаза не може поєднуватися з жодною з двох дозвільних фаз для ТЗ, що рухаються магістраллю. Але під час розгляду інших ситуацій групового прибуття до регульованого перехрестя, не в плані магістральної координації, теоретично можливі ситуації, коли умова (7) не виконується. У цьому разі потрібно вводити додаткові обмеження на використання отриманих залежностей для оцінки часу очікування дозвільного сигналу ТЗ, що прибувають від попереднього скоординованого перехрестя.

У ситуаціях же, що виникають у ПК, отримані залежності можна використовувати не тільки для оцінювання часу затримки лівоповоротних ТЗ, а й для оцінювання затримок додаткових ТЗ, які приєднуються до пачки на черговому перехресті, а також для пачки ТЗ, яка рухається координованою магістраллю у зворотному напрямку, для якої моменти ввімкнення зеленого сигналу і розрахунковий час прибуття пачки можуть не збігатися. Насправді, для того, щоб оцінка затримок за отриманими залежностями була адекватною, потрібно, щоб потік ТЗ, які прибувають на перехрестя, не був безперервним, а формувався світлофором на попередньому перехресті, і його, в якомусь наближенні, можна було вважати рівномірним упродовж часу прибуття пачки на поточне перехрестя, за який можна прийняти трива-

лість дозвільного сигналу на світлофорі, що формує пачку ЗХ. Далі, для такої групи має бути визначено час їхнього прибуття на перехрестя, на якому оцінюються затримки і, після появи в ПК моменту ввімкнення дозвільного сигналу для пачки, що прибуває, з відомою за часом довжиною, можна оцінити шуканий час за залежністю (5). І додаткові ТЗ з другорядних напрямків, і пачка ТЗ, що рухається координованою ділянкою ММ в зворотному напрямі, відповідають цим умовам, тому (5) цілком можна використовувати для отримання оцінок часу їхніх затримок. А вони є вельми значущою частиною всіх затримок, що виникають у ПК, та обов'язково мають враховуватися під час оцінки його ефективності на стадіях як проектування, так і реалізації.

Однак ще більшої значущості отримані залежності набувають під час використання в просторовій координації роботи світлофорів у міській ВДМ, що можлива на її фрагментах із близько розташованими СО. Хоча зараз цьому питанню і приділяється досить багато уваги, усі наявні на сьогодні методи мережевої (не магістральної) координації роботи СО побудовані на деяких оптимізаційних алгоритмах, що мінімізують, на думку авторів, загальні витрати часу учасників руху на об'єкті дослідження. Як показує наявний досвід реалізації подібних алгоритмів, результати такої координації часто практично не відрізняються від звичайної роботи локальних світлофорів із жорсткими циклами.

У той же час, отримані залежності показують, що за синхронізованої роботи сусідніх світлофорів, із циклами однакової тривалості, зсуви початку циклу безпосередньо впливають на затримки ТЗ на перехрестях із груповим прибуттям, що дає змогу визначити оптимальні моменти початку циклу на кожному перехресті, за відомого (заданого) часу початку роботи попереднього перехрестя. Для цього потрібно мінімізувати сумарний час затримки ТЗ, що рухаються в зустрічних напрямках по одному перегону між двома сусідніми регульованими перехрестями. Наскільки сильно залежить сумарна затримка від зсуву початку циклу добре видно з рис. 4.

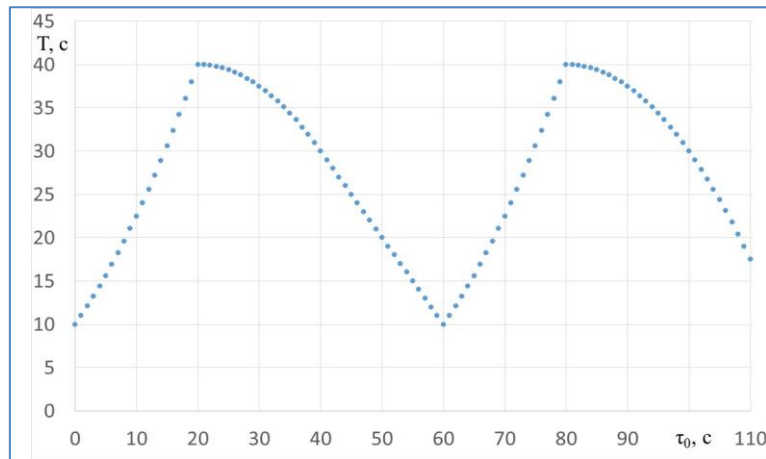


Рис. 4. Залежність сумарної затримки ТЗ, що прибувають до перехрестя на кінцях перегону вулиці з розрахунковим часом проїзду 20 с, від різниці в моментах початку СЦ на перехрестях за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 20$  с та  $\tau_l = 20$  с

Рис. 4 побудований для ділянки мережі з тривалістю поїздки нею 20 с, на початку та наприкінці якої працюють світлофори з однаковими циклами, параметри яких запозичені з рис. 3. Як видно, для цих умов, затримка може збільшуватися в 4 рази відносно її мінімального значення, що демонструє дуже широкі потенційні можливості для мережевої оптимізації, шляхом послідовного розширення мережі скоординованих світлофорів у напрямку від джерела координації. За таке джерело можуть виступати або координовані ділянки ММ, або ключові перехрестя на фрагменті ВДМ з близько розташованими один від одного СО. Природно, що такі просторові фрагменти мережі повинні відповідати загальним вимогам до формування ПК і не мати нерегульованих перетинів конкуруючих потоків учасників руху.

На таких територіях також можуть виникати задачі визначення раціонального зсуву не з двома, а з трьома, а можливо, і з чотирма сусідніми перехрестями, коли два (три) з них уже мають заданий постійний час початку циклу в координації, який задає час прибуття пачок до одного, розрахунково-облікового перехрестя з різних напрямків. У таких задачах також можна успішно мінімізувати сумарні затримки ТЗ за допомогою отриманих залежностей.

Останнім аспектом оцінки затримки ТЗ, що прибувають у складі пачки до регульованого перехрестя в умовах низького навантаження, є оцінка адекватності отриманих залежностей. Це завдання, взагалі кажучи, належить до експериментальних досліджень, але в даному випадку їх проведенню заважає:

- незначна кількість реальних СО, що працюють синхронно, які підходять для спостереження;
- істотний вплив на результати оцінки індивідуального стилю водіння автомобілістів, що може призводити до значних відхилень фактичного часу прибуття до перехрестя від його розрахункового значення, як у бік його збільшення, так і зменшення;
- необхідність втручання в роботу СО для оцінювання затримок в усьому діапазоні зрушень, що неможливо реалізувати в реальних ПК через жорсткі функціональні зв'язки між усіма його елементами, за яких для зміни одного зсуву потрібна перебудова всього ПК.

Також не варто забувати про те, що умови руху з низьким навантаженням належать в основному тільки до нічного періоду доби, що також не полегшує проведення необхідних спостережень. З огляду на всі ці причини експериментальна перевірка отриманих залежностей дуже обмежена за своїми можливостями і не може гарантувати отримання безпомилкового висновку про їхню адекватність.

У такій ситуації доцільно використовувати інший підхід – порівняння оцінок затримки на регульованому перехресті за допомогою отриманої моделі з оцінками за вже відомими моделями, що підтвердили на практиці свою адекватність. Безальтернативною базою для такого порівняння є формула Вебстера, точніше, її перший доданок [6], що відтворюється в незмінному вигляді в аналогічних формулах усіх основних сучасних керівництв з ОДР [7-9]. І це не єдина причина безальтернативності формули Вебстера в цьому випадку, коли оцінка затримки дається для умов низького завантаження.

Річ ще в тім, що її отримано за допомогою імітаційного експерименту, багато років використовували та продовжують використовувати в усьому світі, а основна критика цієї формули впродовж багатьох десятиліть її існування стосується неможливості її застосування за рівня завантаження більшого за 90 %, а також отриманої на її основі залежності для розрахунку тривалості СЦ, що далеко не завжди приводить до найкращого результату. І саме в цих аспектах формула Вебстера зазнала коригування в сучасних посібниках, зберігши при цьому в незмінному вигляді перший доданок, який можна легко привести до умов руху з низьким навантаженням, прирівнявши відповідний показник рівним 0.

Так вчинив автор роботи [10], отримавши при цьому залежність для середньої затримки ТЗ за випадкового прибуття до регульованого перехрестя  $\bar{T}$ , що в прийнятих у даній роботі позначеннях має такий вигляд:

$$\bar{T} = \frac{(T_u - \tau_l)^2}{2 \cdot T_u} \quad (8)$$

Для коректного порівняння двох моделей необхідно забезпечити відповідність порівнюваних оцінок між собою, оскільки отримана в роботі оцінка середньої затримки ТЗ у пачці під час групового прибуття (5), дає точковий результат для конкретних значень часу прибуття пачки, її довжини та часу ввімкнення зеленого сигналу для неї. А формула (8) дає оцінку середньої затримки одиночних ТЗ, що випадково прибувають до перехрестя. В обох випадках під затримкою розуміють різницю між часом увімкнення зеленого сигналу і часом прибуття ТЗ, але у випадку з (8) це усереднена за всіма прибуттями затримка, а в (5) її усереднено не за прибуттями, а за рівномірно розподіленими в пачці ТЗ, за прибуттями її не усереднено. Крім того, оцінка (5) містить у собі затримки ТЗ з області пізнього прибуття, які не встигли проїхати на перший дозвільний сигнал світлофора, яких у (8) немає.

Також для коректного порівняння оцінок за двома моделями, результати розрахунків за (5) необхідно привести у відповідність з оцінкою, одержуваною за (8), тобто створити пачку мінімальної довжини, щоб вилучити область пізнього прибуття, й отримати оцінку, усереднену за прибуттями для неї.

З погляду отриманої тут моделі, пачка мінімальної довжини означає, що всі ТЗ в її складі за будь-якого зсуву встигнуть проїхати на сигнал світлофора, що дозволяє їм рух,  $t_p \leq \tau_0 - t_0$ . А це призводить до

такого наслідку, що всі ТЗ в пачці прибувають на перехрестя протягом періоду раннього прибуття та

$$\Delta_\varepsilon = 1, \Delta_\lambda = 0. \quad (9)$$

Для усереднення часу очікування дозвільного сигналу за прибуттям пачки доцільно провести чисельний експеримент із виконанням умови (9), щоб розрахувати затримки для різних зсувів часу прибуття пачки, рівномірно розподілених у межах СЦ.

### Висновки

На прикладі лівоповоротних ТЗ, що рухаються в складі пачки ЗХ скоординованою ділянкою ММ, побудовані аналітичні залежності часу очікування ввімкнення дозвільного сигналу, які мають загальний характер, оскільки охоплюють будь-які варіанти тривалості періодів прибуття та роз'їзду ТЗ, а також моментів прибуття пачки ЗХ та ввімкнення дозвільного сигналу світлофору.

Використання отриманих в роботі залежностей є дуже актуальним на прикладі просторової координації роботи СО на ВДМ міст, коли є ділянки з близько розташованими світлофорами.

Подальшим напрямком проведення досліджень є експериментальна перевірка розроблених аналітичних моделей визначення середньої затримки ТЗ, що рухаються скоординованими ділянками ММ, за умови їх групового прибуття до перехрестя.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>.
2. Любий, Є.В., Горбачов П.Ф. (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>.
3. Горбачов, П.Ф., Любий, Є.В. (2023). Підхід до оцінювання затримок транспортних потоків у плані координації. Системи управління, навігації та зв'язку, 2(72), 15-19. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.015>.
4. 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>.
5. 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>.
6. Webster, F.V. (1958). Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39. London: Department of Scientific and Industrial Research, 45 p.
7. National Research Council. (2010). Highway Capacity Manual. Washington, DC: TRB. 1475 p.
8. Institute of Transportation Engineers. (2008). Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Canada, Ottawa: ITE. 232 p.
9. Austroads. (2020). Guide to Traffic Management Part 9: Transport Control Systems – Strategies and Operations. Publication No. AGTM09-20. 271 p.
10. Мінь В.Д. (2021). Підвищення ефективності організації дорожнього руху в транспортних районах міста : дисертація доктор філософії. Харків: ХНАДУ. 205 с.

Received (Надійшла) 12.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.08.2023

### Analytical modeling of transport delays at signalized intersections in condition of group arrival of vehicles

Peter Horbachov, Yevhen Liubiy, Oleksandr Koliy

**Abstract.** The article presents the results of updating 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 use of the dependencies obtained in this work is very relevant for the example of spatial coordination of traffic lights on cities road network, when there are areas with closely located traffic lights. A further direction of research is the experimental verification of the developed analytical models for determining the average delay of vehicles moving along coordinated sections of city highways, under conditions of group arrival at intersections.

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