

Куниця О.А., к.т.н., Закаблук О.О.

АДІ ДВНЗ «ДонНТУ», м. Горлівка

## ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАТРИМКИ НА НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ В ОДНОМУ РІВНІ

*Розглянуто складові транспортної затримки на прикладі Х-подібного перехрестя з однією смугою руху в кожному напрямку. Проаналізовано фактори, що впливають на значення цих складових. Наведено формули для визначення дійсної сумарної транспортної затримки, затримки черги з n-ої кількості автомобілів на перехресті.*

### Вступ

Інтенсивне зростання кількості автотранспортних засобів за останні десять років призвело до перевантаження ними вулично-дорожньої мережі (ВДМ) крупних і найкрупніших міст України і особливо їх центрів. Центральні частини міст характеризуються високою щільністю ВДМ, що, з одного боку, забезпечує зручність під'їзду до різних місць тяжіння, дозволяє розосереджувати транспортні і пішохідні потоки, створювати розгалужену мережу маршрутів масового пасажирського транспорту. Але, з іншого боку, чим вища щільність ВДМ, тим частіші перетини транспортних і пішохідних потоків, неоптимальне регулювання яких призводить до негативних наслідків, які впливають на економіку [1]. Як показує вітчизняна практика, до цього ряду негативних наслідків, які проявилися в останні десятиріччя, відносяться: значне зростання кількості дорожньо-транспортних подій (ДТП), збільшення забруднення повітряного басейну, більш частіше виникнення транспортних заторів й різке зменшення швидкості руху на автомобільній дорозі [2]. Повністю ліквідувати негативні наслідки автомобілізації неможливо, тому необхідно розробляти ефективні заходи щодо зменшення її негативного впливу на міське середовище [1]. Тобто уникнення заторів та підвищення швидкості руху за умови безпеки дорожнього руху є одним з головних напрямків розвитку організації дорожнього руху (ОДР).

### Огляд останніх досліджень

У роботі [3] затримки руху характеризуються втратою часу при проходженні транспортним засобом (ТЗ) заданої ділянки ( $l_1, l_2$ ) зі швидкістю сполучення нижче оптимальної [3]:

$$\Delta T = \int_{l_1}^{l_2} \left( \frac{1}{V_\phi} - \frac{1}{V_o} \right) dl, \quad (1)$$

де  $V_\phi, V_o$  — відповідно фактична та оптимальна швидкості сполучення.

Оптимальною швидкістю вважають швидкість сполучення, яка забезпечує мінімум втрат часу, палива, витрат, пов'язаних зі зносом автомобіля, втрат від ДТП та інше.

При проїзді через нерегульоване перехрестя, з позначеними головною та другорядною дорогами, втрати часу виникають на другорядному напрямку через відсутність у водія переважного права проїзду. У роботі [4] відмічається, що складові втрат, навіть при постійних інтенсивностях руху на пересічних дорогах, змінюються в широких межах і для кожного автомобіля різні. З огляду на вплив великої кількості випадкових факторів, втрати часу оцінюються середньою затримкою одного автомобіля, що розраховується при наявності деяких допущень. У загальному виді вираження для визначення середньої затримки  $t_{\Delta n}$  можна записати так [4]:

$$t_{\Delta n} = t_{\Delta n1} + t_{\Delta n2} + t_{\Delta n3}, \quad (2)$$

де  $t_{\Delta n1}$  — середній час очікування прийняттого інтервалу, с;

$t_{\Delta n2}$  — середня затримка, пов'язана з перебуванням у черзі автомобілів, що утвориться на другорядній дорозі,  $c$ ;

$t_{\Delta n3}$  — середня затримка, пов'язана з гальмуванням автомобіля перед перехрестям,  $c$ .

Методи визначення  $t_{\Delta n1}$  та  $t_{\Delta n2}$  розглядаються в теорії транспортних потоків і, згідно роботи [5], полягають у наступному. Середній час  $t_{\Delta n1}$  приймають рівним відношенню сумарної тривалості неприйнятних інтервалів до числа прийнятних. Середня затримка  $t_{\Delta n2}$  залежить від числа автомобілів в черзі перед головною дорогою, яке може бути визначене з використанням основних положень теорії масового обслуговування, при умові, що другорядний напрямок руху можна представити як канал обслуговування з експоненціальним розподіленням часу прибуття вимог та часу обслуговування. Середню затримку  $t_{\Delta n3}$  визначають як різницю між часом, необхідним на гальмування перед перехрестям та подальший розгін транспортного засобу, та часом його руху в вільних умовах.

За умови постійних вповільнення й прискорення в процесі зміни швидкості й експонентного розподілу ймовірної появи тимчасових інтервалів між автомобілями на головній дорозі усереднена затримка автомобіля на даному напрямку другорядної дороги дорівнює [5]:

$$t_{\Delta n} = \frac{e^{N_{2л} t_{zp}} - N_{2л} t_{zp} - 1}{N_{2л} - N_6 (e^{\lambda t_{zp}} - N_{2л} t_{zp} - 1)} + \frac{V_a}{7,2} \left( \frac{1}{a_T} + \frac{1}{a_P} \right), \quad (3)$$

де  $t_{\Delta n}$  — усереднений час затримки автомобіля на нерегульованому перехресті,  $c$ .

$N_{2л}$  — інтенсивність транспортного потоку (ТП) на головній дорозі в обох напрямках,  $авт./с$ ;

$N_6$  — інтенсивність, що доводиться в середньому на одну смугу другорядної дороги в розглянутому напрямку руху,  $авт./с$ ;

$t_{гр}$  — граничний інтервал,  $c$ ;

$a_T$  і  $a_P$  — вповільнення й прискорення автомобіля (у розрахунках можна приймати  $a_T = 3,0 \dots 4,0 \text{ м/с}^2$ ;  $a_P = 1,0 \dots 1,5 \text{ м/с}^2$ ), відповідно;

$V_a$  — швидкість автомобіля у вільних умовах,  $м/с$ .

Усереднену затримку автомобіля  $t_{\Delta nн}$  на перехресті у цілому визначають [5] як усереднене значення затримок для всіх напрямків другорядної дороги, які можна розкрити за допомогою формули [5]:

$$t_{\Delta nн} = \frac{\sum_1^n (t_{\Delta n} N_j)}{\sum_1^n N_j}, \quad (4)$$

де  $N_j$  — інтенсивність руху на  $j$ -м напрямку другорядної дороги,  $авт./год$ ;

$n$  — число напрямків другорядної дороги.

Сумарна затримка за період часу, рівному одному року, визначається відповідно до формули [5]:

$$T_{TP} = \frac{365 t_{\Delta n} N_6}{3600 \beta}, \quad (5)$$

де  $T_{TP}$  — сумарна затримка на нерегульованому перехресті,  $авт. год/рік$ ;

$t_{\Delta n}$  — усереднена затримка одного автомобіля на регульованому перехресті,  $c$ ;

$N_6$  — максимально спостережувана інтенсивність руху в обох напрямках на другорядній дорозі,  $авт./год$ ;

$\beta$  — коефіцієнт добової нерівномірності руху (для орієнтовних розрахунків може бути прийнятий рівним 0,1).

## Мета

Запропонувати математичні залежності для визначення дійсної транспортної затримки.

## Основна частина

Транспортна затримка має ряд переваг відносно інших показників ефективності регулювання на перехресті, так як має чіткий фізичний сенс, порівняно легко розраховується та приводиться до вартісного вираження. Транспортна затримка безпосередньо не зв'язана з рівнем безпеки руху [4], але зниження затримок зменшує роздратованість та психологічну стомлюваність водіїв, що зменшує вірогідність виникнення ДТП. Транспортна затримка застосовується у організації дорожнього руху як показник якості функціонування перехресть вулично-дорожньої мережі.

Розглянемо в  $l-t$  координатах рух автомобіля на Х-подібному перехресті з однією смугою руху в кожному напрямку (рис. 1). Якщо розглядати процес руху через перехрестя в випадку, коли кожний транспортний засіб на другорядній дорозі витрачає час на зупинку, на очікування в черзі, на очікування прийнятного інтервалу, на розгін. Транспортна затримка автомобіля на нерегульованому перехресті визначається як:

$$t_z = t_T + t_{ож} + t_u + t_p, \quad (6)$$

де  $t_T$  — час, витрачений на гальмування перед перехрестям, с;

$t_{ож}$  — час, витрачений на очікування в черзі, с;

$t_u$  — час, витрачений на очікування прийнятного інтервалу, с;

$t_p$  — час, витрачений на розгін, с.

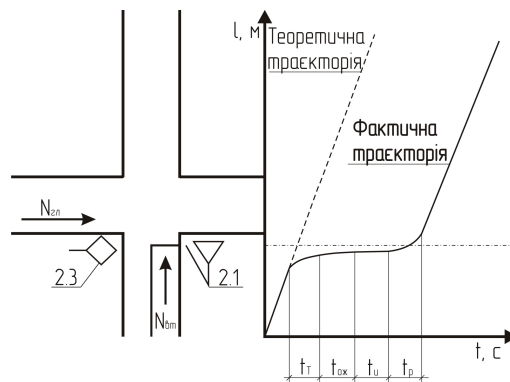


Рис. 1. Процес руху автомобіля через Х-подібне перехрестя з однією смугою руху в кожному напрямку

При розгляді складових транспортної затримки більш докладно можна сказати, що вони змінюються в широкому діапазоні. Розглянемо їх по черзі на прикладі нерегульованого Х-подібного перехрестя.

На нерегульованому перехресті правила проїзду визначають установлені знаки пріоритету. Водії, які рухаються по другорядному напрямку, повинні звільнити дорогу транспортним засобам, які рухаються по головній дорозі. У цьому випадку водії на усередненій відстані  $S_{cp}$  від перехрестя починають пригальмовувати для виконання вимог правил дорожнього руху. Гальмування відбувається або до повної зупинки при присутності черги перед перехрестям, або до моменту появи необхідного інтервалу для здійснення маневру на перехресті. Під «перешкодою» розуміємо автомобіль, що заважає безперешкодному проїзду автомобіля, який рухається на другорядному напрямку. Час, витрачений на гальмування ( $t_T$ ), — це різниця між часом, необхідним на гальмування перед перехрестям і часом проїзду перехрестя без гальмування [5].

Час очікування в черзі  $t_{ож}$  для під'їзду до стоп-лінії залежить від кількості авто перед ним, а отже від реальної, сумарної затримки автомобілів, що знаходяться в черзі перед автомобілем. Визначається за формулою:

$$t_{ожn} = \sum_{i=1}^{(n-1)} t_{ожi} + t_{ui}, \quad (7)$$

де  $t_{ожn}$  — час, витрачений на очікування в черзі  $n$ -ним автомобілем, с.

На затримку, крім перерахованих складових, значно впливає час очікування прийнятного інтервалу  $t_u$ . У діапазоні мінімальних значень прийнятних інтервалів перебуває граничний інтервал  $t_{cp}$ , який визначається за умови, що він з однаковою ймовірністю може бути прийнятий і відкинутий водіями [2]. На прийняття водієм рішення впливає його стаж керування авто, особисті якості водія, стан здоров'я, вік, складність перетинання, складність маневру, характеристики транспортного потоку, що рухається по головному напрямку. Відстань, на якій водій почне виконання маневру, залежить від місця знаходження «перешкоди» (рис. 2).

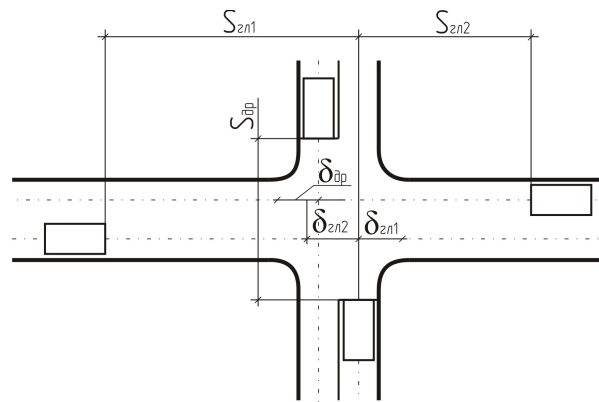


Рис. 2. Схема для визначення часу очікування прийнятного інтервалу

При виконанні різних маневрів на перехресті ймовірність появи «перешкод» різна. При виконанні правого маневру час  $t_u$  залежить від  $(S_{zл1} + \delta_{zл1})$ . При русі по прямій час залежить від  $(S_{zл1} + \delta_{zл1}$  та  $S_{zл2} + \delta_{zл2})$ . При лівому повороті додається значення  $(S_{вм} + \delta_{zл2})$ . Ці залежності використовуємо, якщо за автомобілем — «перешкодою» з'являється інтервал  $t_{cp}$ . Їх можна виразити наступними формулами:

$$t_u^n = (S_{zл1} + \delta_{zл1})/V_{cp}; \quad (8)$$

$$t_u^л = (S_{вм} + \delta_{вм})/V_{cp}; \quad (9)$$

$$t_u^{np} = (S_{zл1} + \delta_{zл1} + S_{zл2} + \delta_{zл2})/V_{cp}, \quad (10)$$

де  $t_u^n$ ,  $t_u^л$ ,  $t_u^{np}$  — відповідно, момент часу, коли водій почне правоповоротний, лівоповоротний маневр і рух прямо, с;

$\delta_{zл1}$ ,  $\delta_{zл2}$ ,  $\delta_{вм}$  — відстань від осі смуги руху на другорядній дорозі до положення «перешкоди» у момент прийняття водієм рішення для здійснення руху прямо, ліворуч і праворуч, м;

$V_{cp}$  — середня швидкість автомобіля, м/с.

Приймають, що час очікування прийнятного інтервалу  $t_u$  залежить від інтенсивності руху по головному напрямку, але існують такі ситуації, коли при одній інтенсивності та однаковій кількості транспортних засобів, які знаходяться на даний момент часу на заданій ділянці дороги, часові інтервали руху між транспортними засобами (ТЗ) різні (рис. 3).

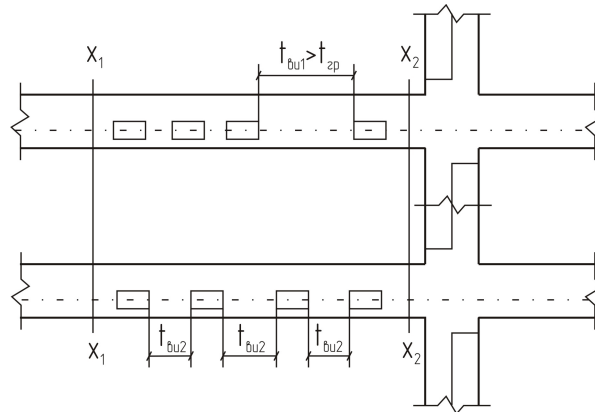


Рис. 3. Схема розподілу часового інтервалу при русі транспортних засобів на ділянці  $X_1X_2$  у перебігу часу  $t_1$ ;  $t_2$

В одному випадку часові інтервали  $t_{bu2}$  між транспортними засобами, що рухаються в потоці, розподілені рівномірно. Мається на увазі, що інтервали не можуть бути прийняті водієм для здійснення маневру. У випадку коли  $t_{bu1} > t_{zp}$  інтервал достатній для здійснення маневру.

Час на розгін визначають як різницю між часом, необхідним для розгону автомобіля після гальмування й часом його руху у вільних умовах.  $t_p$  —  $t_p$  це час за який автомобіль досягне швидкості з якою він міг би рухатися на перехресті в умовах вільного руху. Цей час також залежить від виду маневру, динамічних характеристик ТЗ, водія, параметрів перехрестя.

Необхідність введення світлофорного регулювання на конкретному перехресті визначається за допомогою декількох критеріїв, в основу яких закладені інтенсивності пересічних транспортних потоків. Кожній інтенсивності руху по головній дорозі відповідає певна кількість автомобілів другорядної дороги, які можуть перетнути головну. У зв'язку з цим пропускна здатність пересічення розглядається у вигляді можливого співвідношення інтенсивностей руху на дорогах, які пересікаються. Про ефективність організації дорожнього руху можна судити по характеру роботи перехрестя, пропускна здатність яких визначає продуктивність всієї транспортної системи [5]. Для економічної оцінки ефективності ОДР більше підходить сумарна транспортна затримка, ніж середня затримка, яка в основному характеризує якість обслуговування окремо взятого транспортного засобу.

Згідно розглянутих методик у роботі [4] сумарна транспортна затримка визначається на основі розрахункової усередненої затримки одного автомобіля на нерегульованому перехресті (5). Складові усередненої транспортної затримки якісно та кількісно відрізняються від дійсних значень, які мають чіткий фізичний сенс. Реальні значення складових транспортної затримки ТЗ на перехресті можна отримати лише за допомогою натурного дослідження у реальному масштабі часу, яке в наш час легко здійснити завдяки більш багатому досвіду у цій сфері та сучасним комп'ютерним технологіям, програмному та технічному забезпеченню. На основі отриманих даних під час спостережень можна розрахувати дійсну транспортну затримку ТЗ на перехресті.

Сумарна затримка ( $T$ ) на нерегульованому перехресті в загальному вигляді:

$$T = \sum_{i=1}^n t_{zi} = \sum_{i=1}^n (t_{ожі} + t_{ui} + t_{Ti} + t_{pi}), \quad (11)$$

де  $t_{zi}$  — затримка  $i$ -го автомобіля, с;

$t_{ожі}$  — час, витрачений на очікування в черзі  $i$ -го автомобіля, с;

$t_{ui}$  — час очікування прийняттого інтервалу для здійснення маневру  $i$ -м автомобілем, с;

$t_{Ti}$  — час, витрачений на гальмування  $i$ -м автомобілем, с;

$t_{pi}$  — час, витрачений на розгін  $i$ -м автомобілем, с;

$n$  — кількість автомобілів за одиницю часу, *шт.*

Якщо представити, що  $C = t_T + t_p$ , то

$$T = \sum_{i=1}^n t_{zi} = \sum_{i=1}^n (t_{ожi} + t_{ui} + C) = nC + \sum_{i=1}^n (t_{ожi} + t_{ui}). \quad (12)$$

Затримка черги  $t_{зоч}$  автомобілів, що утворилася з певної кількості ( $n$ ) ТЗ за деякий час

$$t_{зоч} = n + t_{ож1} + 2(2^n - 1) \sum_{i=1}^n t_{ui}, \quad (13)$$

де  $n_i$  — кількість автомобілів, що під'їхали до черги в якій  $i$  автомобілів;

$t_{zi}$  — середня затримка черги з  $n$  авто, *с.*

З урахування всіх можливих маневрів при виїзді з перехрестя сумарну транспортну затримку можна визначити за формулою:

$$T = \sum_{i=1}^n t_{ожi} + n(t_{ul} d_l + t_{un} d_n + t_{unp} d_{np}) + nC, \quad (14)$$

де  $t_{ul}$ ,  $t_{un}$ ,  $t_{unp}$  — середній час для здійснення відповідно маневру наліво, направо, прямо, *с.*

$d_l$ ,  $d_n$ ,  $d_{np}$  — відповідно, частка автомобілів, що рухаються наліво, направо й прямо, %.

### Висновки

На прикладі Х-подібного перехрестя з однією смугою руху в кожному напрямку розглянуто складові транспортної затримки: час, витрачений на очікування в черзі  $i$ -го автомобіля ( $t_{ожi}$ ), час очікування прийняттого інтервалу для здійснення маневру  $i$ -м автомобілем ( $t_{ui}$ ), час, витрачений на гальмування ( $t_{Ti}$ ), час, витрачений на розгін ( $t_{pi}$ ). Проаналізовано фактори, які впливають на значення цих складових. Встановлено, що сумарна транспортна затримка більше підходить для економічної оцінки ефективності ОДР, ніж середня затримка, що в основному характеризує якість обслуговування окремо взятого транспортного засобу. Наведено математичні формули для визначення дійсної сумарної транспортної затримки, затримки черги з  $n$ -ої кількості автомобілів на перехресті, транспортну затримку з урахуванням всіх можливих маневрів при виїзді з перехрестя.

### Список літератури

1. Васильєва Г. Ю. Методи мінімізації затримок транспорту на магістральній вулично-дорожній мережі міст України: дис. ... канд. техн. наук / Г.Ю. Васильєва. — К., 2007. — 201 с.
2. Системологія на транспорті: в 5кн: підруч./ Е.В. Гаврилов, В.П. Поліщук, В.К. Доля та ін./ за ред. М.Ф. Дмитриченка. Кн. 4. Організація дорожнього руху. — К.: Знання України, 2007. — 448 с.
3. Коноплянко В. И. Организация и безопасность дорожного движения: учеб. для вузов. / В.И. Коноплянко. — М.: Транспорт, 1991. — 183 с.
4. Кременец Ю.А. Технические средства регулирования дорожного движения. / Ю.А. Кременець — М.: Транспорт, 1981.
5. Кременец Ю.А. Технические средства регулирования дорожного движения. / Ю.А. Кременець — М.: Транспорт, 2005.

Стаття надійшла до редакції 24.12.08

© Куниця О.А., Закаблук О.О., 2008