

*Проаналізовано структуру циклу світлофорного регулювання на пішохідних переходах, встановлено залежність поведінки пішоходів від параметрів циклу. Запропоновано спосіб визначення тривалості основного такту транспортної фази на регульованому пішохідному переході на основі вирівнювання та мінімізації затримок учасників дорожнього руху в зоні регульованого переходу, що дозволить підвищити рівень безпеки руху та пропускну здатність переходів*

*Ключові слова: перехід, затримка, такт, фаза, тривалість, цикл, пішоходи, пасажири, регулювання, вирівнювання*

*Проанализирована структура цикла светофорного регулирования на пешеходных переходах, установлена зависимость поведения пешеходов от параметров цикла. Предложен способ определения продолжительности основного такта транспортной фазы на регулируемом пешеходном переходе на основе выравнивания и минимизации задержек участников дорожного движения в зоне регулируемого перехода, что позволит повысить уровень безопасности движения и пропускной способности переходов*

*Ключевые слова: переход, задержка, такт, фаза, длительность, цикл, пешеходы, пассажиры, регулирования, выравнивание*

УДК 656.13.02

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28035

# МІНІМІЗАЦІЯ ЗАТРИМОК УЧАСНИКІВ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДАХ

С. В. Грицай

Старший викладач\*

E-mail: sergaua@mail.ru

В. Е. Трушевський

Старший викладач, аспірант\*

Д. А. Никифоровський

Кафедра світлопровідної фотоніки

Санкт-Петербурзький національний

дослідницький університет інформаційних

технологій, механіки і оптики

пр. Кронверкський, 49,

м. Санкт-Петербург, Росія, 197101

\*Кафедра «Транспортні технології»

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69093

## 1. Вступ

Пішохідні переходи являють собою ділянки вулично-дорожньої мережі, що характеризуються підвищеною імовірністю виникнення дорожньо-транспортних пригод. Відповідно ДСТУ 4092-2002, при перевищенні значеннями інтенсивностей руху транспортних засобів та пішоходів встановлених меж, на переході рекомендується введення світлофорного регулювання.

Ефективність функціонування світлофорного об'єкту визначається аварійністю за тими видами дорожньо-транспортних пригод, що їх можливо уникнути за наявності світлофорного регулювання та значеннями транспортних і пішохідних втрат часу (затримок) в очікуванні дозволяючого рух сигналу чи роз'їзду черги. Вказані фактори є взаємопов'язаними, особливо зважаючи на те, що транспортна дисципліна пішоходів є низькою.

Отже, правильне визначення параметрів світлофорного режиму регульованого пішохідного переходу є одним з найважливіших моментів у забезпеченні його ефективного функціонування. Врахування усіх факторів, що впливають на параметри світлофорного об'єкта на пішохідному переході дозволяють максимально розширити область ефективного застосування вуличних переходів, і таким чином забезпечити безпе-

ку руху пішоходів, заощадити капітальні вкладення у будівництво не вуличних переходів, поліпшити умови руху маломобільних груп громадян,

## 2. Літературний огляд та постановка проблеми

У структурі найпростішого світлофорного циклу на регульованому пішохідному переході наявні транспортна та пішохідна фази. Транспортна складається з основного такту для транспорту, що визначається дозволяючими сигналами транспортних напрямків руху та перехідного інтервалу, тривалість якого визначається залежно від ширини пішохідного переходу. Пішохідна фаза містить пішохідний основний такт, прямо пропорційний ширині проїзної частини та перехідний інтервал, тривалість якого, з урахуванням миготливого сигналу, становить від 6 до 8 с [1, 2].

Згідно з проведеними дослідженнями, поведінка пішоходів в зоні регульованих пішохідних переходів в частині виконання світлофорних сигналів значно залежить від параметрів світлофорного циклу на переході [3]. Витримка більшості пішоходів залежить від часу очікування, при цьому є важливим обґрунтованість пішохідної затримки, тобто завантаженість

проїзної частини рухом транспортних засобів під час заборонного сигналу пішохідного світлофора.

Натомість, існуючий підхід визначення параметрів світлофорного режиму регульованого пішохідного переходу не враховує пішохідних затримок, оскільки орієнтований на максимізацію пропускну здатності переходу для транспортних засобів. В той же час величина затримок транспортних засобів перед пішохідним переходом дуже сильно залежить від тривалості дозволяючого сигналу для пішоходів, що особливо проявляється на вулицях з багатосмугових проїзними частинами [4]. Наявність острівка безпеки дозволяє керувати сигналами двох частин пішохідних переходів окремо, що призводить до зменшення затримок як транспортних засобів, так і пішоходів, проте може успішно використовуватися лише за високої дисципліни пішоходів у частинні виконання світлофорних сигналів [5].

Неможливість визначення фазового коефіцієнту для пішохідного напрямку за відсутності у пішохідній фазі регулювання транспортних напрямів призводять до необхідності, при визначенні параметрів режиму світлофорного регулювання із застосуванням формули Вебстера, коригувати значення фазового коефіцієнту транспортної фази шляхом розв'язання системи рівнянь [6]:

$$\begin{cases} T_{\alpha}^* = (1,5T_{\alpha} + 5) / [1 - (y + y^*)] \\ T_o^* = [(T_{\alpha} - T_{\alpha}^*)y^*] / (y + y^*) \end{cases} \quad (1)$$

де  $T_{\alpha}$  та  $T_{\alpha}^*$  – тривалість циклу регулювання до та після корекції відповідно, с; у та  $y^*$  – суми максимальних фазових коефіцієнтів фаз, в яких тривалості основних тактів не коригуються та коригуються відповідно;  $T_o^*$  – сума скоригованих тривалостей основних тактів, с;  $T_{\alpha}$  – втрачений час у циклі регулювання, с.

Розв'язавши її, визначають нову, кориговану тривалість циклу світлофорного регулювання за такою формулою:

$$T_{\alpha}^* = B / 2A + \sqrt{B^2 / (4A^2) - C / A}. \quad (2)$$

Принцип визначення полягає у розрахунку фазового коефіцієнту для фази, до якої включено пішохідний напрям регулювання, таким чином, щоб його значення відповідало збільшеній за рахунок дозволяючого сигналу для пішоходів тривалості основного такту світлофорного регулювання [7, 8]. Недолік методу полягає у тому, що процедура визначення коригованих фазових коефіцієнтів еквівалентна введенню псевдонапряму регулювання з рівнем завантаження рухом, що відповідає мінімальній тривалості зеленого сигналу для пішоходів.

### 3. Ціль і задачі дослідження

Тривалість основного та проміжних тактів пішохідної фази стандартизована залежно від ширини проїзної частини. Для визначення перехідного інтервалу транспортної фази встановлена чітка залежність від швидкості руху транспорту та ширини переходу. Тому з усіх елементів світлофорного циклу на регульовано-

му пішохідному переході за однакових характеристик транспортних та пішохідних потоків та незмінних геометричних параметрах переходу, оптимізуватися може лише тривалість основного такту транспортної фази.

Ціллю дослідження є вирівнювання та мінімізація загальних затримок пішоходів, водіїв та пасажирів транспортних засобів перед регульованим переходом.

Задачею дослідження є визначення тривалості основного такту транспортної фази з урахуванням усіх факторів, що впливають на його значення з метою мінімізації та вирівнювання затримок учасників руху.

### 4. Визначення оптимальної тривалості основного такту транспортної фази

Середню затримку одного автомобіля при ізолюваному регулюванні обчислюють за формулою Вебстера [9], с:

$$\bar{t}_{\alpha} = 0,9(AT_{\alpha} + \frac{1}{N_{\alpha}}B), \quad (3)$$

де  $A = \frac{(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}$ ;  $B = \frac{x^2}{2(1-x)}$ ;  $\lambda = \frac{t_{\alpha}^r + 1}{T_{\alpha}}$ ;  $x = \frac{y}{\lambda}$ ;  $T_{\alpha}$  –

тривалість світлофорного циклу, с;  $N_{\alpha}$  – інтенсивність руху транспорту, од/год;  $t_{\alpha}^r$  – основний такт транспортної фази.

Припустимо, що цикл складається з транспортною та пішохідної фаз.

$$T_{\alpha} = t_{\alpha}^r + t_{\alpha}^r + t_{\alpha}^n + t_{\alpha}^n, \quad (3)$$

де  $t_{\alpha}^r, t_{\alpha}^r, t_{\alpha}^n, t_{\alpha}^n$  – тривалості відповідно основних тактів і перехідних інтервалів транспортної та пішохідної фаз, с.

Середня затримка одного пішохода складає таким чином [10]:

$$\bar{t}_{\alpha} = \frac{t_{\alpha}^r + t_{\alpha}^r + t_{\alpha}^n}{2}. \quad (4)$$

Загальна затримка пішоходів за годину складатиме:

$$T_{\alpha} = N_{\alpha} \frac{t_{\alpha}^r + t_{\alpha}^r + t_{\alpha}^n}{2}, \quad (5)$$

де  $N_{\alpha}$  – інтенсивність руху пішоходів, чел./год.

Загальна затримка транспортних засобів за годину складатиме:

$$T_{\alpha} = 0,9N_{\alpha}(AT_{\alpha} + \frac{1}{N_{\alpha}}B). \quad (6)$$

Затримка всіх пасажирів транспортних засобів за годину складатиме:

$$T_{\text{пас}} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i T_{\alpha}}{k_{\text{пр}}^i} P_i k_{\text{пр}-m}^i \right), \quad (7)$$

де  $P_i$  – пасажиромісткість транспортного засобу даного типу;  $\alpha^i$  – частка в потоці транспортних засобів і-го типу;  $k_{\text{пр}-m}^i$  – коефіцієнт використання пасажиромісткості для даного типу транспортного засобу;  $k_{\text{пр}}^i$  – ко-

ефіцієнт зведення даного типу транспортного засобу до легкового автомобіля;  $m$  – загальна кількість типів транспортних засобів.

Умова рівності тривалостей затримок пасажирів і водіїв транспортних засобів виглядає таким чином:

$$N_n \frac{t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{III}^n}{2} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i T_r}{k_{np}^i} P_i k_{n-m}^i \right), \quad (8)$$

де  $P_i$  – пасажиромісткість транспортного засобу даного типу;  $\alpha^i$  – частка в потоці транспортних засобів  $i$ -го типу;  $k_{n-m}^i$  – коефіцієнт використання пасажиромісткості для даного типу транспортного засобу;  $k_{np}^i$  – коефіцієнт зведення даного типу транспортного засобу до легкового автомобіля;  $m$  – загальна кількість типів транспортних засобів.

$$K = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i}{k_{np}^i} P_i k_{n-m}^i \right), \quad (9)$$

$$\bar{t}_r = 0,9(A \times (t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n)) + \frac{1}{N_r} B), \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{t_{OT}^r + 1}{t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n}, \quad (11)$$

$$x = \frac{y \times (t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{OT}^r + 1}, \quad (12)$$

$$B = \frac{(y \times (t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n))^2}{2 \left( 1 - \frac{y \times (t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{OT}^r + 1} \right) (t_{OT}^r + 1)^2}, \quad (13)$$

$$A = \frac{\left( 1 - \frac{t_{OT}^r + 1}{t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n} \right)^2}{2 \left( 1 - \frac{t_{OT}^r + 1}{t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n} \times \frac{y \times (t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{OT}^r + 1} \right)}. \quad (14)$$

Виконуємо заміну:

$$\Delta = t_{III}^r + t_{OT}^n + t_{III}^n. \quad (15)$$

В результаті отримуємо:

$$N_n \frac{t_{OT}^r + t_{III}^r + t_{III}^n}{2} = 0,9 N_r K \times \left( \frac{\left( 1 - \frac{t_{OT}^r + 1}{t_{OT}^r + \Delta} \right)^2}{2(1-y)} \times (t_{OT}^r + \Delta) + \frac{1}{N_r} \times \frac{(y \times (t_{OT}^r + \Delta))^2}{2 \left( 1 - \frac{y \times (t_{OT}^r + \Delta)}{t_{OT}^r + 1} \right) (t_{OT}^r + 1)^2} \right). \quad (16)$$

Перетворюючи це співвідношення, переходимо до повного рівняння 4-го ступеня, коренями якого є тривалості основного такту світлофорного циклу, до якого включено транспортні напрями. Перед перетворенням зробимо декілька замін:

$$N_n = a; t_{OT}^r = x; t_{III}^r = b; t_{OT}^n = c; \Delta = d; K = e; \Delta = f; y = g. \quad (17)$$

Отримане рівняння має такий вигляд:

$$\begin{aligned} & x^4 \cdot ad \cdot (1-g)^2 + x^3 [ad(1-g) \cdot ((2-g(1+f)) + \\ & + (b+c+f)(1-g)) - 0,9d g^2 (1-g)] + \\ & x^2 [ad(1-g)((1-gf^2) + (b+c+f)(2-g(1+f))) + \\ & + f(b+c)(1-g) - 0,9d^2 e (f-1)^2 (1-g) - \\ & - 0,9d g^2 (1-g) \cdot 3f] + x [ad(1-g)((b+c+f) \times \\ & \times (1-gf) + f(b+c)(2-g(1+f))) - \\ & - 0,9d^2 e (f-1)^2 (2-g(1+f)) - 0,9d e (1-g) g^2 \cdot 3f^2] + \\ & + [ad(1-g)f(b+c)(1-gf) - \\ & - 0,9d^2 e (f-1)^2 (1-gf) - 0,9d g^2 (1-g) f^3] \end{aligned} \quad (18)$$

Отримане рівняння (18) розв'язуємо за методом Феррарі, отримуючи чотири корені.

### 5. Інтерпретація отриманих результатів

Оскільки ліва частина рівняння (годинна сумарна тривалість затримок пішоходів) прямо залежить від значення тривалості основного такту транспортної фази, що визначається при розв'язанні рівняння, то споміж усіх дійсних коренів слід обирати мінімальний. Це значення буде забезпечувати рівність та мінімальність годинних транспортних та пішохідних затримок. Крім того, значення тривалості транспортної основної такту для транспорту відповідає тривалості зеленого сигналу транспортного світлофора. З цього можна зробити висновок, що воно не може бути меншим за 7 с, а разом з перехідними інтервалами та основним тактом пішохідної фази не повинно перевищувати 120 с [11].

У табл. 1 наведено деякі результати розв'язку рівняння, що потрапляють до припустимого діапазону

З метою дослідження залежності між зазначеними вище аргументами та тривалістю основного такту для транспортних напрямів проведено повний факторний числовий експеримент. До плану включено максимальні, мінімальні та середні значення усіх аргументів. Для кожної комбінації з плану визначено мінімальний корінь рівняння, що відповідає наведеним вище обмеженням.

Отриману вибірку піддано статистичному дослідженню, в результаті якого отримано лінійну регресійну залежність, що дозволяє встановити міру впливу кожного з аргументів на корені рівняння:

$$t_{OT}^r = -111,92 - 0,06 N_n - 0,25 t_{III}^r - 0,87 t_{III}^n + 0,04 N_r + 7,96 K + 1,8 \Delta + 306,12 y. \quad (19)$$

Адекватність отриманої моделі підтверджується значеннями кількох характеристик. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,66, коефіцієнт детермінації 0,44, розрахункове значення критерію Фішера 175,09 (при теоретичному значенні 2,51). Статистичну оцінку значимості коефіцієнтів регресійного рівняння виконано за критерієм Стьюдента. Розрахункові значення критерію для вільного члена регресійного рівняння та коефіцієнтів при сімох змінних відповідно дорівнюють: -2,7; -13,26; -0,54; -0,17; 11,57; 8,65; 16,52; 26,51 при табличному значенні 2,446. Таким чином встановлено,

що тривалості перехідних інтервалів дуже слабо впливають на значення основного такту транспортної фази.

Таблиця 1

Деякі результати розв'язку рівняння (18)

$N_{п, \text{піш/год}}$	300	500	400	650	200	100	1000	700	800
$t_{п,с}^r$	7	10	12	6	12	8	13	15	20
$t_{п,с}^n$	7	8	7	6	7	6	7	6	8
$N_{т, \text{од/год}}$	200	800	500	900	400	700	500	700	500
K	4	2	3	2,1	3,6	10	2	2	3,5
$\Delta$	40	28	36	20	39	25	41	40	41
y	0,04	0,2	0,3	0,15	0,4	0,5	0,6	0,6	0,45
$t_{от,с}^r$	36	28	14	18	24	23	31	53	41

На основі наведеного способу розраховано режими світлофорного регулювання на п'яти перехрестях у

м. Запоріжжі, що підтверджується актом про запровадження результатів наукового дослідження, виданим одному з авторів статті – В. Е. Трушевському підприємством «Символ», що спеціалізується на будівництві та утриманні світлофорних об'єктів.

7. Висновки

Запропоновано спосіб визначення тривалості основного такту транспортної фази на регульованому пішохідному переході. Визначена тривалість буде оптимальною за критерієм рівності та мінімальності затримок учасників дорожнього руху, що рухаються через регульовану ділянку. Застосування наведеного способу дозволить підвищити безпеку руху в зоні регульованих переходів завдяки зменшенню кількості порушень Правил дорожнього руху пішоходами та підвищити пропускну здатність пішохідних переходів як для транспортних засобів, так і для пішоходів завдяки врахуванню основних факторів, що впливають на затримки учасників дорожнього руху.

Література

1. Руководство по регулированию дорожного движения в городах [Текст] / Москва: Стройиздат, 1974. – 99 с.
2. Методические рекомендации по регулированию пешеходного движения [Текст] / Москва: ВНИИБД МВД СССР, 1977. – 55 с.
3. Guo, H. Reliability analysis of pedestrian safety crossing in urban traffic environment [Text] / H. Guo // Safety Science. – 2012. – Vol. 50, Issue 4. – P. 968–973. doi: 10.1016/j.ssci.2011.12.027
4. Noland, R. Pedestrian travel times and motor vehicle traffic signals [Text] / R. Noland // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 1996. – Vol. 1553, Issue 1. – P. 28–33. doi: 10.3141/1553-04
5. Abrams, C. Selection of Pedestrian Signal Phasing [Text] / C. Abrams // Transportation Research Record. – 1977. – Vol. 629.
6. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения [Текст] : уч. для вузов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.
7. ОДМ 218.6.003-2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. [Текст] / Москва: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
8. Капитанов, В. Т. Управление транспортными потоками в городах [Текст] / В. Т. Капитанов, Е. Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985. – 94 с.
9. Скульбеденко, Н. А. Методики расчета средней задержки транспортных средств и пешеходов на регулируемых пересечениях [Текст] / Н. А. Скульбеденко, А. А. Антонова, А. С. Линицкий. – Ирк. гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2009. – 21 с.
10. Иносе, Х. Управление дорожным движением [Текст] / Х. Иносе, Т. Тамада; М. – Транспорт, 1983. – 247 с.
11. Левашев, А. Г. Проектирование регулируемых пересечений [Текст] : уч. пос. / А. Г. Левашев, А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. – Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2007 – 208 с.