

УДК 656.13.02

## РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЕМПІРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУХУ ТРАНСПОРТУ

Трушевський В. Е., Турпак С. М., Грицай С. В.

### CALCULATION OF TRAFFIC LIGHT SIGNALIZATION REGIMES CONSIDERING TRAFFIC EMPIRICAL CHARACTERISTICS

Trushevsky V., Turpak S., Gritsay S.

*Досліджено процес руху транспорту на під'їздах до регульованих перехресть. Встановлено фактичні параметри гальмування транспортних засобів під час зміни світлофорного сигналу із дозволяючого на заборонний. Уточнено розрахункові формули основного та додаткового тактів світлофорного регулювання. Відповідно до проведених розрахунків, час початку гальмування після появи зеленого миготливого сигналу 3,5 с, величина сповільнення 85 % забезпечення становить 3,43 м/с<sup>2</sup>, що не перевищує максимально припустимого значення 4 м/с<sup>2</sup>. Результати можуть бути використані для визначення оптимальних режимів регулювання на перехрестях.*

**Ключові слова:** світлофорне регулювання, мінімальний часовий проміжок, основний такт фази регулювання, безпека дорожнього руху.

**Постановка проблеми.** Перехрестя є одним із найбільш складних об'єктів транспортної інфраструктури в системі дорожнього руху. Організація безпечного для водіїв та пішоходів світлофорного регулювання на них є важливою науковою задачею. Теоретичні методи розрахунку елементів світлофорного циклу були створені за часів порівняно невисокої інтенсивності руху транспорту, тому потребують постійного удосконалення з огляду на існуючі фактичні зміни параметрів транспортного потоку.

Актуальним є дослідження фактичних параметрів руху транспортних засобів при гальмуванні для зупинки перед заборонним сигналом світлофора на перехрестях. Це дозволить удосконалити метод визначення елементів світлофорного циклу в залежності від встановлених параметрів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Визначення оптимальних з точки зору мінімізації затримок учасників дорожнього руху структур і параметрів циклів світлофорного регулювання за умови забезпечення необхідного рівня безпеки дорожнього руху є складною задачею [1]. Для розв'язання слід врахувати як характеристики руху транспортних за-

собів, так і специфічну поведінку водіїв у певних дорожніх умовах.

Оптимізація параметрів світлофорного регулювання не лише збільшує пропускну здатність перехресть та зменшує транспортні затримки, а й зменшує рівні конфліктності потоків [2]. За результатами досліджень [3] встановлено, що на поведінку водія при зміні світлофорного сигналу впливає тривалість циклу регулювання. Заміри, проведені у різних областях, у містах та у сільській місцевості, дали суттєво різні результати. Так, у сільській місцевості водії довше реагують на появу заборонного сигналу. Зміна часу реакції водія впливає на пропускну здатність ділянки вулично-дорожньої мережі при світлофорному регулюванні [4]. Для точного визначення параметрів світлофорного регулювання необхідно оцінити реакцію водіїв на зміну світлофорних сигналів у конкретних умовах. Дослідження [5] підтверджує, що врахування моделі поведінки водія при появі жовтого світлофорного сигналу можуть зменшити кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Для наближення моделі до реальної обстановки слід враховувати тип транспортного засобу та стан дорожнього покриття.

За інформацією Управління безпеки дорожнього руху МВС України [6], протягом 2016-го року на вулично-дорожній мережі сталося 25547 ДТП, у яких завдано шкоди життю і здоров'ю людей. У цих випадках загинули 3187 та поранено 32079 осіб. Показовим є те, що серед причин ДТП з постраждалими частка порушень правил проїзду перехресть складає 6 %, а порушень світлофорних сигналів – 0,6 %. В той-же час, перевищення безпечної швидкості стало причиною 18 % ДТП. Зважаючи на [4, 5], можна припустити, що воно також було першопричиною частини ДТП на регульованих перехрестях.

Для імітації поведінки водіїв в момент появи жовтого сигналу розроблено сучасну багатокомпо-

ментну математичну модель [7]. Функціонування моделі базується на статистичних даних, зібраних у ході експериментів. Однак, слід зауважити, що структура режиму світлофорного регулювання у США не передбачає зеленого миготливого сигналу, тому результати потребують адаптації для умов України.

Вплив початкової швидкості та відстані до стоп-лінії як вирішальних факторів для вибору між зупинкою та продовженням руху проаналізовано у статті [8]. Врахування реального часу реакції водіїв на появу заборонного сигналу, а також параметрів руху транспортних засобів, що наближаються до стоп-лінії регульованого перехрестя під час появи заборонного сигналу, дозволить зменшити аварійність на цих перехрестях. Результати подібних експериментів, проведених у США, призвели до позитивного ефекту. В зоні контрольних перехрестів аварійність зменшено на 8 %, травматизм – на 12 %, а кількість ДТП за участю пішоходів та велосипедистів – на 37 % [9].

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що поведінка водіїв, які наближаються до стоп-лінії регульованого перехрестя в момент появи заборонного сигналу визначається не лише Правилами дорожнього руху [10], але й суб'єктивною оцінкою водіями дорожніх умов, адекватність якої залежить від фізичного та емоційного стану водія. Рішення про зупинку чи проїзд стоп-лінії ухвалюється на основі багатьох факторів, оцінка яких водіями має суб'єктивний характер. Під час визначення параметрів світлофорної сигналізації слід врахувати фактичну реакцію водіїв на зміну сигналу, аби керуючий вплив світлофорної сигналізації відповідав реальним характеристикам дорожнього руху.

**Мета статті.** Метою досліджень є експериментальна перевірка відповідності існуючих теоретичних методів розрахунку параметрів світлофорного регулювання вимогам безпеки дорожнього руху на перехрестях та удосконалення в частині розрахунку мінімального часового проміжку та тривалості основного такту фази регулювання.

**Основний зміст.** Дослідження проводились на 15 світлофорних об'єктах міста Запоріжжя, що характеризуються високою аварійністю. До основних причин ДТП на цих перехрестях належить порушення водіями сигналів регулювання. В якості прикладу розглянуто 3 об'єкти: вул. Набережна – вул. Фортечна, вул. Набережна – вул. Немировича-Данченка, вул. Космічна – вул. Столярна, міста Запоріжжя. Вони є типовими представниками усієї дослідженої групи. Перший об'єкт є регульованим пішохідним переходом. Інші – перехрестями з відповідно високою та низькою інтенсивністю руху з поперечних напрямів.

На цих перехрестях, починаючи від стоп-лінії були встановлені маячки з інтервалом 5 метрів один від одного. Ці маячки використовувались в якості орієнтирів при визначенні місцезнаходження автомобілів на початку гальмування. Момент початку гальмування фіксувався візуально по ввімкненню задніх стоп-сигналів автомобілів при перегляді відеозапису.

Миттєва швидкість транспортних засобів в момент початку гальмування фіксувалася радарним вимірювачем «Іскра-1» (Україна).

Час початку вимоги на гальмування транспортних засобів фіксувався по сигналам світлофора [11], при цьому за першу секунду була прийнята перша секунда зеленого миготливого сигналу. У якості вихідних даних для подальшого аналізу прийнято результати 48 вимірювань. Визначали момент початку гальмування, фактичну миттєву швидкість автомобіля в цей момент, відстань від точки початку гальмування до стоп-лінії. В якості об'єктів спостереження обиралися лише ті автомобілі, які не проїхали перехрестя без зупинки.

Типова схема розміщення технічних засобів організації дорожнього руху на перехресті, приладів та обладнання при проведенні експериментальних досліджень зображена на рис. 1.

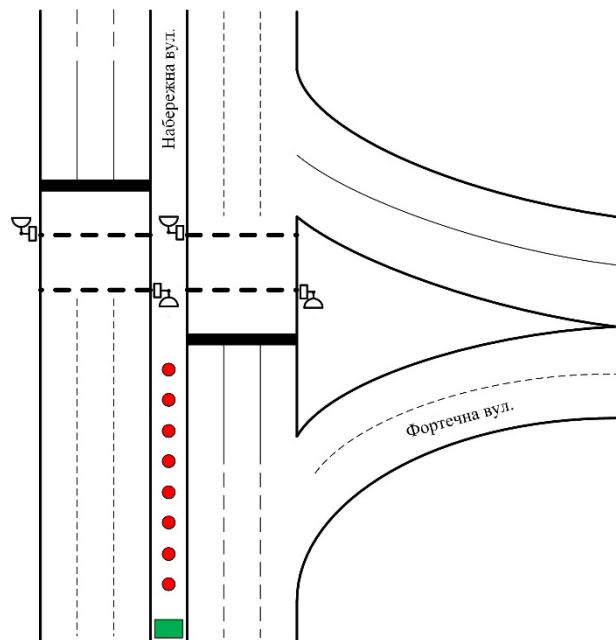
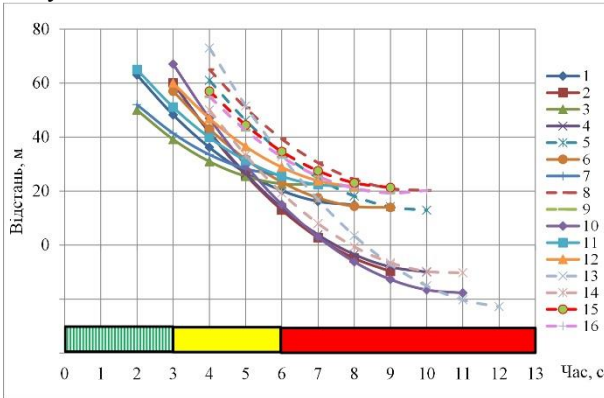


Рис. 1. Схема проведення експериментальних досліджень на перехресті вул. Набережна – вул. Фортечна:  
- маячки, що знаходяться на відстані 5 м один від одного;  
- місце розташування приладів (радар та відеокамера)

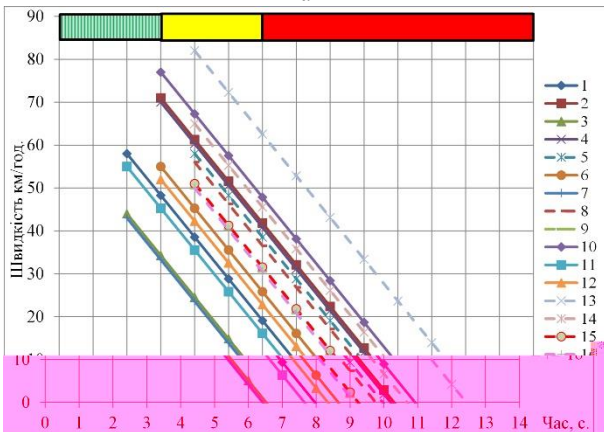
Знаючи швидкість автомобіля в момент початку гальмування і відстань від місця початку гальмування до стоп-лінії світлофора, можна вирахувати, чи встигне автомобіль з комфортним сповільненням зупинитися перед стоп-лінією. Значення сповільнення приймається  $2,75 \text{ м/с}^2$  (середнє з діапазону  $2,5 \dots 3,0 \text{ м/с}^2$ ), що рекомендується для розрахунку тривалості проміжних тактів при введенні світлофорного регулювання [12].

По результатам досліджень були побудовані графіки теоретичної залежності відстаней від стоп-лінії (рис. 2, а, рис. 4, а) та швидкостей руху автомобілів (рис. 2, б, рис. 4, б) від часу. На них по осі абсцис показується час та паралельно їй на координатній області кольором – відповідні світлофорні сигнали.

По графікам на рис. 2, а – рис. 4, а можна спостерігати зміну положення автомобіля відносно стоп-лінії від початку гальмування до його зупинки та відповідний цьому положенню світлофорний сигнал. На цих графіках вісь абсцис відповідає стоп-лінії на шляху прямування автомобілів. По графікам на рис. 2, б - 4, б можна аналізувати зміну швидкості тих самих автомобілів та визначити початкову швидкість, час від моменту початку гальмування до зупинки.



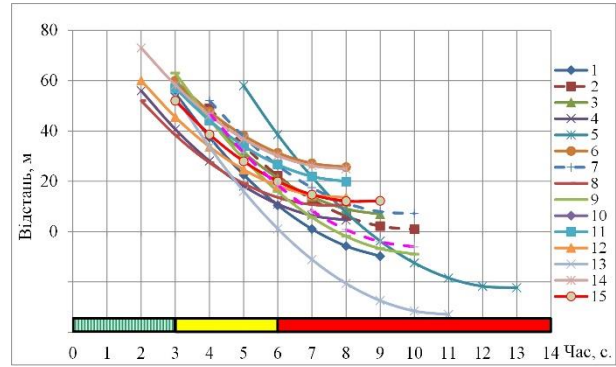
а



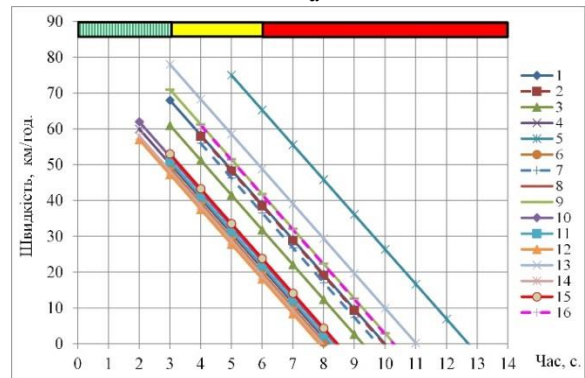
б

Рис. 2. Результати дослідження вул. Космічна – вул. Столярна: а – графік залежності відстані від часу; б – графік залежності швидкості від часу

Проаналізувавши отримані графіки (рис. 2–4), можна стверджувати, що більшість водіїв починає гальмування на такій відстані від світлофора, яка дає їм можливість загальмувати із комфортним сповільненням, не проїхавши стоп-лінію. Однак, в потоках, що досліджувалися, наявні водії, які мають більш небезпечну манеру керування. Так, наприклад, на рис. 2, а, автомобілі 5, 7, 10 розпочали гальмування на відстанях, які виключають зупинку перед стоп-лінією за умови гальмування із комфортним сповільненням. Транспортні засоби, графіки руху яких на рис. 2, а, рис. 3, а перетнули вісь абсцис, зупинялися із більшим сповільненням та (або) за стоп-лінією. Якщо крива руху певного автомобіля на рис. 2, а – рис. 4, а, а не перетинається з віссю абсцис, значить він зупинився перед стоп-лінією або гальмував із меншим сповільненням чи проїхав частину шляху накатом.

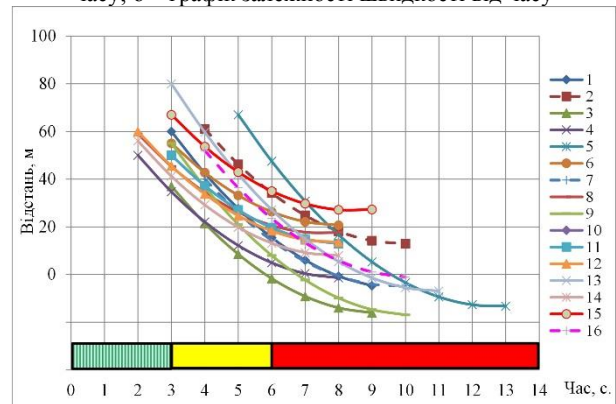


а

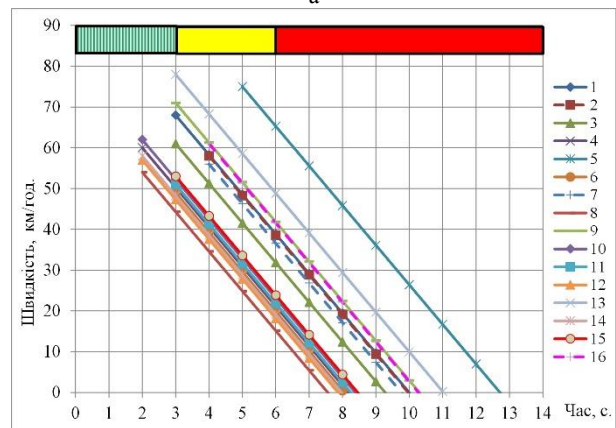


б

Рис. 3. Результати досліджень вул. Набережна – вул. Неміровича-Данченка: а – графік залежності відстані від часу; б – графік залежності швидкості від часу



а



б

Рис. 4. Результати досліджень вул. Набережна – вул. Фортечна: а – графік залежності відстані від часу; б – графік залежності швидкості від часу

З огляду на доволі поширене перевищення дозволеної швидкості руху (рис. 2, б – рис. 4, б), гальмування із більшим сповільненням негативно впливає на ризик попутного зіткнення: водій, що рухається позаду, не встигає зреагувати на початок гальмування.

Також можна встановити, що більше 30 % водіїв починають гальмувати на четвертій секунді (тобто на першій секунді жовтого сигналу), і менше 5 % водіїв починають гальмування на п'ятій секунді. Водіїв, які починали б гальмування на останній секунді жовтого сигналу, не виявлено.

Проміжок часу від початку зеленого миготливого сигналу, за який 85 % водіїв розпочали гальмування склав 3,5 с (рис. 5).

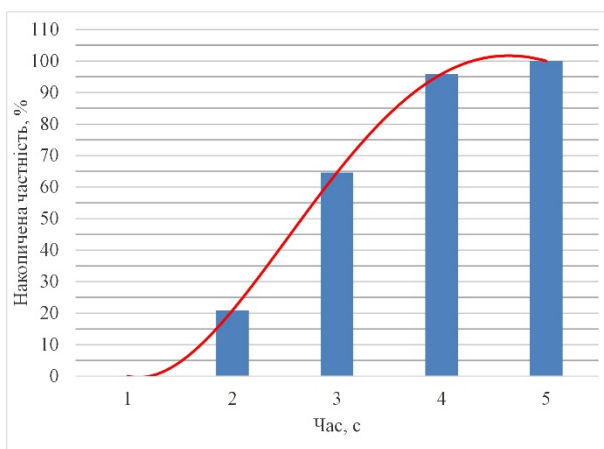


Рис. 5. Час початку гальмування 85 % забезпечення

Для того, аби з'ясувати, якому закону розподілу відповідає сповільнення транспортних засобів та визначити сповільнення 85 % забезпечення користуються програмою Statistica. За допомогою програми проводимо перевірку гіпотез про закони розподілу, що виконується з використанням критерію згоди Пірсона чи критерію згоди Колмогорова-Смирнова.

Висновок про відповідність емпіричного розподілу обраному теоретичному задаються рівнем значущості, який зазвичай дорівнює 0,05 чи 0,1. Гіпотезу про те, що даний емпіричний розподіл відповідає обраному теоретичному закону розподілу можна прийняти:

- за критерієм Колмогорова-Смирнова – у випадку, коли гранична імовірність прийняття гіпотези перевищує заданий рівень значущості, або є несуттєвою (n.s.);
- за критерієм Пірсона – у випадку, коли гранична імовірність прийняття гіпотези перевищує заданий рівень значущості.

Отримані результати вказують на те, що сповільнення транспортних засобів відповідає гамма-розподілу (табл. 1).

По отриманих в програмі Statistica результатам, за допомогою цієї ж програми будуємо гистограму (рис. 6) та кумуляту накопичених частот (рис. 7) на якій визначаємо величину сповільнення 85 % забезпечення.

Таблиця 1

**Результати тесту відповідності законів розподілу**

Діапазон	Кількість спостережень	Кумулята	Очікувана кількість	Відсоток
<= 1,98286	14	14	13,59891	19,70856
2,65571	21	35	22,42782	32,50409
3,32857	23	58	18,74578	27,16779
4,00143	8	66	9,51144	13,7847
4,67429	0	66	3,44511	4,99291
5,34714	2	68	0,97994	1,4202
< безкін.	1	69	0,29101	0,42175

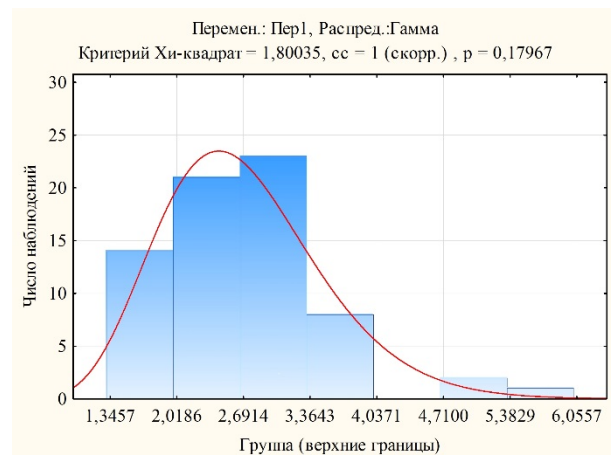


Рис. 6. Вікно з гистограмою розподілу

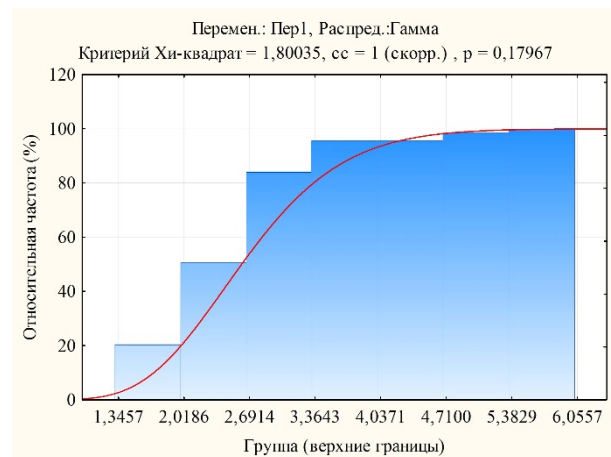


Рис. 7. Сповільнення 85 % забезпечення

Величина сповільнення 85 % забезпечення дорівнює 3,43 м/с<sup>2</sup>, що, однак, не перевищує максимального значення прискорення, рекомендованого для практичних розрахунків (4 м/с<sup>2</sup> [13]). У зв'язку з цим пропонується внести деякі уточнення до формул, по яким розраховується тривалість додаткового такту.

Формула для розрахунку мінімальної тривалості додаткового такту має вигляд [12]:

$$t_n = \delta_1 + \frac{V}{2a} + \frac{B + l_a}{V}, \quad (1)$$

де  $\delta_1$  – час реакції водія, с;

$V$  – швидкість руху 85 % забезпечення, м/с;  
 $a$  – сповільнення автомобіля, м/с<sup>2</sup>;  
 $B$  – ширина перехрестя, м;  
 $l_a$  – довжина автомобіля, м.

Замість величини  $\delta_1$  запропоновано підставити величину  $t_2$  – час 85 % забезпечення початку гальмування, яка за результатами розрахунків становить 3,5 с. Величину  $a$  пропонується прийняти 3,43 м/с<sup>2</sup>.

Якщо використовувати таку формулу, то величина додаткового такту значно збільшиться, просте частка ефективного часу (до початку гальмування) перейде з основного такту в додатковий. Аби компенсувати цю різницю, слід змінити формулу для розрахунку тривалості основного такту [12], виклавши її таким чином:

$$t_{oi} = \frac{y_i}{Y} (T_o - L) - t_2, \quad (2)$$

де  $y_i$  – фазовий коефіцієнт  $i$ -ої фази регулювання;

$Y$  – сумарний фазовий коефіцієнт перехрестя;

$T_o$  – тривалість циклу регулювання, с;

$L$  – втрачений в циклі час, с.

Таким чином, в результаті проведеного дослідження визначені залежності елементів світлофорного циклу від фактичних параметрів руху транспортних засобів при гальмуванні для зупинки перед заборонним сигналом. На їх основі уточнено формули для розрахунку основних і додаткових тактів.

У відомій формулі для розрахунку тривалості додаткового такту не враховувалася наявність у режимі роботи світлофора зеленого миготливого сигналу. З його введенням відповідно до [11], поява жовтого сигналу не є несподіваною для водіїв, отже момент, коли вони розпочинають гальмування, змінюється. Тому можна перерозподілити ефективний та втрачений час світлофорного циклу між основним та додатковим тактами, зважаючи на фактичну поведінку водіїв.

**Висновок.** Встановлено, що фактичні значення уповільнення транспортних засобів при гальмуванні перед заборонним сигналом відрізняються від розрахункових. За допомогою програми Statistica визначено сповільнення 85 % забезпечення, яке склало 3,43 м/с<sup>2</sup>. Запропоновано уточнений вид формул основного та додаткового тактів регулювання з урахуванням моменту початку гальмування 3,5 с.

### Література

1. Трушевський В.Е. Особливості розрахунку режимів світлофорного регулювання при здійсненні управління за сигнальними групами / В.І. Єресов, В.Е. Трушевський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №4/3. – С. 9–13.
2. Wong S. C., Sze N. N., Li Y. C. Contributory factors to traffic crashes at signalized intersections in Hong Kong // Accident Analysis & Prevention. – 2007. – Т. 39. – №. 6. – С. 1107-1113.

### References

3. Empirical analysis and modeling of stop-line crossing time and speed at signalized intersections / K. Tang, F. Wang, J. Yao, J. Sun // International journal of environmental research and public health. – 2016. – Т. 14. – №. 1. – С. 9.
4. Боровской А.Е. Влияние времени реакции водителя на пропускную способность автомобильной дороги / А.Е. Боровской, А.Г. Шевцова // Вестник развития науки и образования. – 2014. – №. 2. – С. 24-30.
5. Elhenawy M. Classification of driver stop/run behavior at the onset of a yellow indication for different vehicles and roadway surface conditions using historical behavior / M. Elhenawy, A. Jahangiri, H. A. Rakha, I. El-Shawarby // Procedia Manufacturing. – 2015. – Т. 3. – С. 858-865.
6. Сайт Управління безпеки дорожнього руху МВС України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sai.gov.ua>.
7. Amer A. M. M. A behavioral modeling framework of driver behavior at onset of yellow a indication at signalized intersections / A. M. M. Amer, H.A. Rakha, I. El-Shawarby // Transportation Research Board 89th Annual Meeting. – 2010. – №. 10-3794
8. Liu C. A review of the yellow interval dilemma / C. Liu, R. Herman, D.C. Gazis // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 1996. – Т. 30. – №. 5. – С. 333-348.
9. Retting R.A. Changes in crash risk following re-timing of traffic signal change intervals / R.A. Retting, J.F. Chapline, A.F. Williams // Accident Analysis & Prevention. – 2002. – Т. 34. – №. 2. – С. 215-220.
10. Правила дорожнього руху України: офіц. текст. – Введ. 2001–10–10. – К.: Моноліт, 2017. – 57 с.
11. Державний стандарт України ДСТУ 4092–2002 "Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосовування та вимоги безпеки". – Введ. 2002–06–03. – К.: Держстандарт України, 2002. – 27 с.
12. Кременец Ю.А. Технические средства регулирования дорожного движения: Учебник для автомобильно-дорожных вузов и факультетов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский. – М.: Транспорт, 1981. – 252 с.
13. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения. Учебник для вузов / Ю.А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с. Сервис на транспорте : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / [В.М.Николашин, Н.А.Зудилин, А.С.Синицына и др.] ; под ред. В.М. Николашина. — 4-е изд., перераб. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 304 с.

- at signalized intersections. International journal of environmental research and public health, 14(1), 9.
4. Borovskoi, A. E., & Shevtsova, A. H. (2014). Vliyanye vremeny reaktsyy vodytelya na propusknuyu sposobnost avtomobylnoi dorohy. Vestnyk razvytyia nauky u obrazovanyia, (2), 24-30.
  5. Elhenawy, M., Jahangiri, A., Rakha, H. A., & El-Shawarby, I. (2015). Classification of driver stop/run behavior at the onset of a yellow indication for different vehicles and roadway surface conditions using historical behavior. Procedia Manufacturing, 3, 858-865.
  6. Road safety department of the Ministry of Police [Virtual Resource]. – Available at: <http://www.sai.gov.ua>.
  7. Amer, A. M. M., Rakha, H. A., & El-Shawarby, I. (2010). A behavioral modeling framework of driver behavior at onset of yellow a indication at signalized intersections. In Transportation Research Board 89th Annual Meeting (No. 10-3794).
  8. Liu, C., Herman, R., & Gazis, D. C. (1996). A review of the yellow interval dilemma. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 30(5), 333-348.
  9. Retting, R. A., Chapline, J. F., & Williams, A. F. (2002). Changes in crash risk following re-timing of traffic signal change intervals. Accident Analysis & Prevention, 34(2), 215-220.
  10. Pravyla dorozhnoho rukhu Ukrainy. (2017). Monolit.
  11. Derzhavnyi standart Ukrainy DSTU 4092–2002 "Svitlofory dorozhni. Zahalni tekhnichni vymohy, pravyla zasto-sovuvannia ta vymohy bezpeky". (2002). Derzhstandart Ukrainy.
  12. Kremenets Yu. A. (1981) Tekhnicheskyye sredstva rehulyrovannia dorozhnoho dvyzhenia. Transport.
  13. Kremenets, Yu. A., Pecherskyi, M. P., & Afanasev, M. B. (2005). Tekhnicheskyye sredstva orhanyzatsyy dorozhnoho dvyzhenia. Akademknyha.

**Трушевський В. Э., Турпак С. Н., Грицай С. В. Расчет режимов светофорного регулирования с учетом эмпирических характеристик движения транспорта.**

*Исследован процесс движения транспорта на подъездах к регулируемым перекресткам. Определены фактические параметры торможения транспортных средств при смене светофорного сигнала с разрешающего на запрещающий. Уточнены расчетные формулы основного и дополнительного тактов светофорного регулирования. Согласно проведенным расчетам, время начала торможения после появления зеленого мигающего сигнала 3,5 с, величина замедления 85 % обеспечения составляет 3,43 м/с<sup>2</sup> и не превышает максимально допустимого значения 4 м/с<sup>2</sup>. Результаты могут быть использованы для определения оптимальных режимов регулирования на перекрестках.*

**Ключевые слова:** светофорное регулирование, минимальный временной промежуток, основной такт фазы регулирования, безопасность дорожного движения.

**Trushevsky V., Turpak S., Gritcay S. Calculation of traffic light regulation regimes, taking into account empirical characteristics of transport motion.**

*Theoretical methods for calculating elements of the traffic light cycle were created at relatively low traffic intensity levels, therefore, they require constant improvement because of actual changes in the parameters of the traffic flow. Taking into account the real time drivers' reaction to the forbidden signal, as well as the initial speed at the time of the forbidden signal, will reduce the accident rate at these intersections. In the course of the research, an experimental verification of the conformity of existing theoretical methods for the calculation of the parameters of traffic light control to the requirements of road safety at intersections has been carried out. The actual parameters of the traffic of vehicles during braking for the stop before the traffic light signal are determined. The experiment was conducted at intersections by visualizing the distance from the start of braking to the stop-line and measuring the initial speed of vehicles. Using graph-analytical and statistical analysis of experimental data on changes in the speed of movement and time of braking of cars, clarification of the calculated formulas of the parameters of the traffic-light control was performed.*

*According to the calculations, the start time of braking after the appearance of the green flashing signal is 3.5 s, the value of the deceleration of 85 % of the guarantee is 3.43 m/s<sup>2</sup>, which does not exceed the maximum permissible value of 4 m/s<sup>2</sup>. The corresponding refinement of formulas for calculating the duration of the main step and the transition interval of the adjustment phase is proposed.*

**Keywords:** traffic control, minimum time interval, main control phase, traffic safety.

**Трушевський Вячеслав Едуардович** – канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних технологій ЗНТУ, м. Запоріжжя, e-mail: aspirerzr@gmail.com.

**Турпак Сергій Миколайович** – д-р техн. наук, проф., професор кафедри транспортних технологій ЗНТУ, м. Запоріжжя, e-mail: turpak@i.ua

**Грицай Сергій Васильович** – старший викладач кафедри транспортних технологій ЗНТУ, м. Запоріжжя, e-mail: sergaua@hotmail.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 02.03.2018