

УДК 656.11

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАТРИМОК НА ПІДХОДАХ
ДО РЕГУЛЬОВАНИХ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДІВ ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ КООРДИНАЦІЇ****Грицунь О.М.****STUDY ON TRANSPORT DELAYS TO APPROACHES ADJUSTABLE
CROSSWALK THE DIFFERENT MODES OF COORDINATION****Hrytsun O.**

У роботі розглядаються результати досліджень транспортних затримок на регульованих пішохідних переходах за різних відстаней між стоп-лініями та інтенсивності руху. Уточнено розуміння поняття «транспортна затримка», описано процес утворення черг перед світлофорними об'єктами. Наведені математичні моделі визначення транспортних затримок на стоп-лініях світлофорних об'єктів в умовах координації дозволяють визначити раціональні режими регулювання з погляду мінімізації втрати часу у транспортних та пішохідних потоках.

Ключові слова: транспортна затримка, миттєва швидкість руху, інтенсивність руху, регульований пішохідний перехід, основні такти, проміжні такти, потік насичення.

Вступ. Зростання кількості автомобілів і обсягів перевезень спричиняє збільшення інтенсивності руху, що в умовах міст сприяє виникненню транспортних проблем, наслідком чого є зменшення показників ефективності транспортної системи та безпеки дорожнього руху. Повністю ліквідувати негативні наслідки автомобілізації неможливо, тому для покращення роботи магістральної вулично-дорожньої мережі (ВДМ) впроваджують координоване управління, суть якого полягає в тому, що між суміжними за напрямком руху світлофорними об'єктами встановлюється взаємозв'язок, який забезпечує зміщення увімкнення зелених сигналів [1,2].

Постановка проблеми. Впровадження сучасних автоматизованих систем управління дорожнім рухом (АСУДР) дасть можливість не лише зменшити затримки і черги на завантажених підходах до перехрестя, тривалість руху транспортних засобів (ТЗ) між районами міста, але й кількість дорожньо-транспортних подій (ДТП), рівень шуму і викидів в атмосферу відпрацьованих газів за рахунок зменшення кількості гальмувань, прискорень та інших маневрів [3]. Найбільш відчутно ці негативні чинни-

ки впливу проявляються на регульованих перехрестях з магістральними вулицями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існуючі роботи щодо систем координованого управління вказують, що найважливішим чинником під час оцінки ефективності їх роботи є швидкість руху. Правильний вибір її проектної величини у таких системах дозволяє з великою точністю розрахувати величину періоду часу, за який групі ТЗ гарантується безупинний проїзд через усі перехрестя вулиці, де застосовується координоване управління. Для найкращої роботи такого управління бажано досягати постійного кута нахилу ліній швидкості руху у системі координат «відстань-час». Щоб досягти такого результату, необхідне регулювання швидкісного режиму. За іншого випадку, у міру зміни величини та складу транспортного потоку (ТП) за різних довжин ділянок вулиць між перехрестями, досягти постійності кута нахилу неможливо, оскільки відбувається процес дифузії ТП. Різними авторами встановлюються межі відстаней між перехрестями, за яких ефективність роботи системи координованого управління є найбільшою. Така відстань, виходячи з певних груп чинників, які визнані найважливішими, становить 100 – 800 м [4], 150 – 600 м [5], 100 – 300 м [5], 600 – 800 м [7].

Отже, проведення постійних досліджень за швидкістю руху на магістральних вулицях, де впроваджено системи координованого управління, дає можливість розробляти чіткі та точні алгоритми для програм координації, що робить транспортну систему ефективнішою, підвищуючи продуктивність роботи рухомого складу, умови безпеки руху та екологічні параметри урбанізованих просторів.

Мета статті. Визначити величину транспортних затримок на вулицях з координованим управлінням за різних відстаней між стоп-лініями та інтенсивності руху.

Результати досліджень. Взявши за основу, результати досліджень, які опубліковані у праці, ви-

значено закономірності утворення та розпаду груп автомобілів за різного складу ТП та довжини ділянок вулиць між перехрестями. До того ж враховується, що перехрестя мають різні геометричні параметри.

Для початку, необхідно розглянути поняття «транспортна затримка», суть якого полягає у визначенні причин погіршення дорожніх умов, а саме зменшення швидкості руху ТП, спричиненої схемами регулювання сигналів світлофора, наявності зупинок громадського транспорту, нерегульованих пішохідних переходів, неоднорідності складу потоку, наявності і частота перехресть в одному рівні з іншими вулицями, геометрії ВДМ (ширини проїзної частини, кількості смуг руху, ширини ділянки перед перехрестям, поздовжнього профілю цієї ділянки, наявності (або відсутності) зон стоянки, радіусів поворотів), стану дорожнього покриття, умов видимості на перехрестях та на перехрестях тощо [7–8].

Враховуючи те, що із постійною тенденцією збільшення інтенсивності руху кількість нерегульованих перехресть зменшується, основну увагу зосереджуємо на дослідженні транспортних затримок в умовах світлофорного регулювання на перехрестях, пішохідних переходах та ділянках вулиць між ними.

Затримка на регульованих перехрестях залежить в основному від режиму роботи світлофорної сигналізації, оскільки заборонний сигнал формує ТЗ в окремі групи під час руху. Довжина черги перед світлофором за такої схеми залежить від насиченості ТП і тривалості заборонного сигналу. Після ввімкнення дозвільного сигналу світлофора перший автомобіль черги розпочинає рух з деякою затримкою, яка рівна втраті часу на реакцію водія і початку руху з місця. При цьому, інтенсивність в перерізі стоп-лінії поступово зростає і досягає через деякий час постійного значення, яке називають потоком насичення. Затримка в русі на початку основного такту називається стартовою затримкою – це втрачений час у фазі регулювання, оскільки рух в цей період практично відсутній [1–4,9–10].

Дослідження транспортних затримок на регульованих перехрестях проводилися протягом тривалого періоду часу, але досі не отримано точних результатів, таких, як у розділах теорії масового обслуговування. Причиною є той факт, що мікроскопічний рух автомобілів не завжди може розглядатися як стаціонарний процес, оскільки в ньому спостерігаються періодичні зміни. Отже, ми можемо прогнозувати лише наближений аналіз ситуацій. Іншою причиною є те, що автомобілі, які прибувають до стоп-лінії, вже піддалися дії ряду регульованих перехресть, через які вони пройшли. Тому все зводиться до багатофазної системи масового обслуговування, в якій важко визначити навіть характеристики прибуття автомобілів [10]. Для того, щоб підвищити ймовірність прогнозування підходу впорядкованої групи автомобілів до суміжних перехресть, необхідно вводити координоване регулювання, яке дозволить зменшити затримки шляхом зміщення

ввімкнення дозвільного сигналу світлофора на наступних перехрестях. Розглянемо декілька підходів для визначення затримки на координованих регульованих перехрестях.

У роботі [1] запропоновано мінімізувати час затримки автомобілів f_i на кожному окремо взятому перехресті (i -му перехресті) під час координованого управління:

$$f_i = \int_0^t I_{i-1} \left[t_{\text{кри}} + \frac{I_{i-1} \cdot \tau}{C_i} - \tau \right] d\tau, \quad (1)$$

де I_{i-1} – інтенсивність ТП, що прибуває в моменту закінчення дозвільного сигналу світлофора, авт./с; $t_{\text{кри}}$ – тривалість заборонного сигналу світлофора, с; C_i – інтенсивність роз'їзду черги, авт./с; τ – час проїзду ділянки координації, с;

У праці [10] дослідники стверджували: якщо регульовані перехрестя знаходяться на великих відстанях (від 500 до 800 метрів), то потік автомобілів, який прибуває до стоп-лінії, може розглядатися як стаціонарний, а інтервали часу між ТЗ підпорядковуються закону Гіпер-Ерланга. Виходячи з цього, виведена формула, яка описує сумарну затримку автомобілів W за цикл регулювання [10]:

$$W = \frac{q_M q R^2}{2(q_M - q)}, \quad (2)$$

де q і q_M – відповідно інтенсивність прибуття та інтенсивність насичення потоку відправлень, од./год; R – тривалість горіння червоного сигналу, с.

Розглянемо більш детально формулу визначення транспортної затримки, представлену американським дослідником Робертсоном, яка відповідає сучасній методиці оцінки рівня обслуговування координованих регульованих перехресть [2]:

$$q_2(t) = \frac{1}{1 + \alpha\beta\tau} q_1(t) + \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha\beta\tau} \right) q_2(t-1), \quad (3)$$

де q_1 – кількість автомобілів у групі на досліджуваному перехресті, які зупинені в момент часу t , од./с; q_2 – кількість автомобілів у групі, що проїхали суміжне перехрестя без зупинки в момент часу t , од./с; τ – час проїзду ділянки координації, с; α, β – параметри розпаду груп автомобілів, t – дискретний інтервал часу.

Застосовуючи формулу (3), можна визначити загальну кількість автомобілів, які проїдуть суміжні координовані перехрестя без зупинок, транспортні затримки, процес розпаду груп автомобілів та ефективність управління рухом ТЗ. Ця формула є вбудованою у програми імітаційного моделювання руху

ТЗ, зокрема такі, як VISSIM, PARAMICS, TRANSYT, що здатні враховувати не лише дорожню ситуацію на розглянутому перерізі дороги, а й вплив адаптивного координованого регулювання на роботу суміжних перехресть. У вказаних програмах використовуються моделі затримок, які описуються детерміновано і стохастично, щоб відобразити як сталість, так і випадковість особливостей ТП. В основі детермінованих моделей є функціональна залежність між окремими показниками, наприклад, швидкістю і дистанцією між автомобілями в потоці, у стохастичних – ТП розглядається як імовірнісний процес. Такі моделі мають велику популярність, оскільки можуть використовуватися для аналізу інтенсивності руху за різних режимів регулювання [7].

Основною умовою, яка закладена у всі зазначені імітаційні моделі, є те, що автомобілі прибувають до перехрестя випадково, характер їх руху виражається через часові інтервали між ТЗ і підпорядковується ймовірнісному закону Гіпер-Ерланга. Цей закон враховує, що ТЗ під'їжджають до перехрестя вільно або зв'язано.

Перевагою таких моделей є точність визначення затримки перед регульованим перехрестям, оскільки програма враховує динамічний габарит, час необхідний для приведення автомобіля в рух тощо. Крім цього, вони не враховують автомобілі, які покидають перехрестя на заборонний сигнал світлофора, так званий процес «прориву».

Недоліком цих моделей є те, що автомобілі, які пройшли стоп-лінію і якийсь час залишаються нерухомими в зоні перехрестя, очікуючи дозволяючого сигналу наступної фази регулювання для того щоб виконати маневр повороту (ліворуч або праворуч), не підлягають обліку.

Для визначення транспортних затримок на магістральних вулицях обрано структуру найпростішого координованого світлофорного циклу між двома регульованими пішохідними переходами, де наявні транспортна і пішохідна фаза. Відомі формули розрахунку фазових коефіцієнтів враховують транспортний і пішохідний напрямки одночасно, вибираючи максимальну тривалість основного такту. Формули для визначення перехідного інтервалу транспортної і пішохідної фази стандартизовані і залежать від швидкості руху транспорту, ширини проїзної частини і довжини переходу. Тому оптимізувати можна лише тривалість основних тактів, оскільки геометричні параметри переходу є незмінними [9].

Для розрахунку окремо пішохідної фази регулювання використовують формулу Вебстера, яка враховує кориговане значення фазового коефіцієнта шляхом розв'язання системи рівнянь [4]:

$$\begin{cases} T_{\text{ц}}^* = (1,5T_{\text{ц}} + 5) / [1 - (y_{\text{н}} + y^*)] \\ T_{\text{о}}^* = [(T_{\text{ц}} - T_{\text{н}})y^*] / (y_{\text{н}} + y^*) \end{cases} \quad (4)$$

де $T_{\text{ц}}^*$ та $T_{\text{н}}^*$ – тривалість циклу регулювання до та після коригування відповідно, с; $y_{\text{н}}$ та y^* – сума

максимальних фазових коефіцієнтів, в яких тривалість основних тактів не коригується та коригується відповідно; $T_{\text{о}}^* = t_{\text{мш}}$ – сума скоригованої тривалості основних тактів (час основного такту для пішоходів), с; $T_{\text{н}}$ – втрачений час у циклі регулювання, с.

Розв'язавши систему рівнянь відносно $T_{\text{ц}}^*$, отримаємо рівняння:

$$T_{\text{ц}}^* = \frac{B}{2A} + \sqrt{\frac{B^2}{4A^2} - \frac{C}{A}} \quad (5)$$

де $A = 1 - y_{\text{н}}$; $B = 2,5 \cdot T_{\text{н}} - T_{\text{н}} \cdot y_{\text{н}} + T_{\text{о}}^* + 5$;

$C = (T_{\text{н}} + T_{\text{о}}^*) \cdot (1,5 \cdot T_{\text{н}} + 5)$;

Недолік цього методу полягає у тому, що визначення параметрів світлофорного режиму регульованого пішохідного переходу не враховує потреб пішоходів, тобто відповідає мінімальній тривалості зеленого сигналу для пішоходів, враховуючи при цьому максимізацію пропускну здатності переходу для ТЗ [4].

Для того щоб повністю оцінити значення затримок за різної довжини ділянки між стоп-лініями на основі розпаду груп автомобілів та складу ТП, зроблено такі обмеження:

- дослідження проводиться між двома регульованими пішохідними переходами;
- ТЗ зупинені перед початком руху на стоп-лінії генеруючого світлофора;
- якщо ТП на підході до генеруючого світлофора не є насиченим, необхідно перервати спостереження до моменту насичення;
- враховується ТП на підході до стоп-лінії, який складається з 70 – 75% легкових автомобілів;
- відстань між регульованими пішохідними переходами не перевищує 800 метрів;
- дослідження проводилися на магістральних вулицях 2x2 і 3x3 смугами руху, шириною 3,75 м кожна;
- пропуск пішоходів здійснювався в одній фазі і поетапно (у випадку поетапного пропуску, ширина розділової смуги становила 6 м);
- інтенсивність ТП коливалася в межах 400 – 1100 од./год.

Результати транспортних затримок за цієї системи обмежень аналізувалися на основі сформованої черги ТЗ під час заборонного сигналу суміжного світлофора. Величина затримок визначалася роздільно для кожної фази регулювання. Пізніше визначалося середньозважене значення затримок для всіх фаз регулювання протягом тривалості дослідження.

Тривалість циклу ($T_{\text{ц}}$) для координованих регульованих пішохідних переходів визначалася під час розв'язування рівняння (5). Крім цього виконувалася рівність $25 < T_{\text{ц}} < 120$ с., а значення тривалості основного такту для транспорту становило не ме-

ніше 7 с. Для визначення перехідного інтервалу пішохідної фази змінювалися геометричні параметри проїзної частини, а саме довжина пішохідного переходу (7,5 – 28,5 м), розрахункова швидкість руху пішоходів приймалася 1,3 м/с. З метою забезпечення безпечного проїзду ТЗ через світлофорний об'єкт, розраховувалася тривалість проміжного такту для транспортного напрямку, яка залежить від середньої швидкості автомобіля під час руху на підході до стоп-лінії без гальмування. Зміну середньої швидкості руху залежно зміни довжини ділянки між перехрестями в умовах координованого регулювання зображено на рис. 1, яка побудована на основі результатів досліджень.

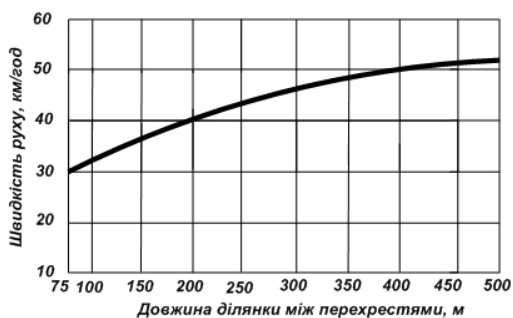


Рис. 1. Залежність зміни середньої миттєвої швидкості руху від довжини ділянки між перехрестями дво- та трисмугових вулиць в умовах координованого регулювання

Грунтуючись на цьому, розраховано режими світлофорного регулювання і визначено транспортні затримки за чотирьох випадків:

- пропуск пішоходів здійснювався поетапно у дві фази регулювання, кількість смуг руху – 2 з шириною 3,75 м кожна (рис. 2);

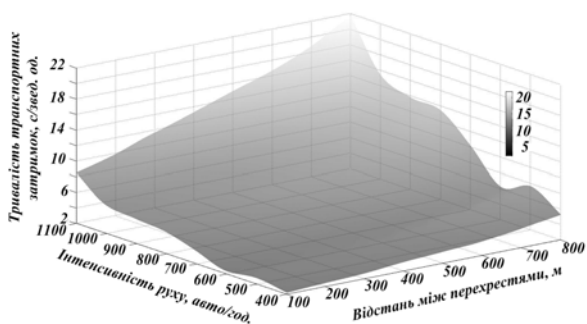


Рис. 2. Зміна величини транспортних затримок залежно інтенсивності руху і довжини ділянки між стоп-лініями за умови поетапного пропуску пішоходів (довжина пішохідного переходу – 7,5 м)

- пішоходи переходять проїзну частину в одній фазі регулювання, довжина переходу становить 21 м, яка включає в себе 4 смуги руху з шириною 3,75 м кожна та розділову смугу шириною 6 м. (рис. 3);

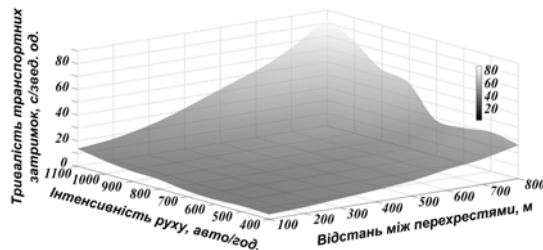


Рис. 3. Зміна величини транспортних затримок залежно інтенсивності руху і довжини ділянки між стоп-лініями за умови поетапного пропуску пішоходів (довжина пішохідного переходу – 21 м)

- пропуск пішоходів здійснювався поетапно у дві фази регулювання, кількість смуг руху – 3 з шириною 3,75 м кожна (рис. 4);

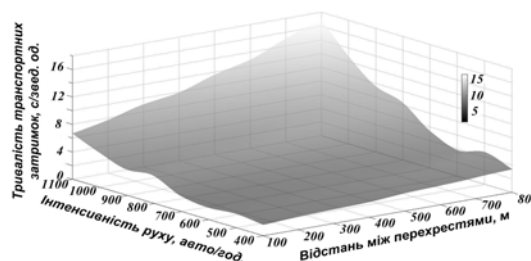


Рис. 4. Зміна величини транспортних затримок залежно інтенсивності руху і довжини ділянки між стоп-лініями за умови поетапного пропуску пішоходів (довжина пішохідного переходу – 11,25 м)

- пішоходи переходять проїзну частину в одній фазі регулювання, довжина переходу становить 28,5 м, яка включає в себе 6 смуг руху з шириною 3,75 м кожна та розділову смугу шириною 6 м. (рис. 5).

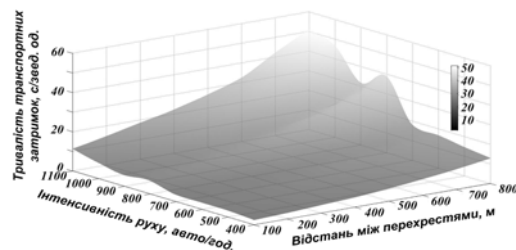


Рис. 5. Зміна величини транспортних затримок залежно інтенсивності руху і довжини ділянки між стоп-лініями за умови поетапного пропуску пішоходів (довжина пішохідного переходу становить 28,5 м)

Наведені теоретичні положення й результати досліджень свідчать про існування більших можливостей в моделюванні дорожніх ситуацій. Залежно наявної інформації й особливостей завдання, можна різним чином формалізувати схему пошуку обґрунтування раціональних режимів управління. Найважливішою умовою при цьому є перевірка несуперечності й достатності обмежуючих чинників.

Висновки. Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що із збільшенням відстані між стоп-лініями та інтенсивності руху в умовах координованого регулювання, тривалість транспортних затримок зростає. Проте, мінімальні затримки спостерігаються під час режиму регулювання, який забезпечує поетапний пропуск пішоходів. Застосування наведеного способу дозволить підвищити швидкість ТП та пропускну здатність, зменшити витрати палива, загазованості повітряного басейну тощо.

У подальшому необхідно дослідити основні чинники, які впливають на затримки пішоходів та розробити алгоритм управління світлофорною сигналізацією на перехресті таким чином, щоб задовольнити потреби у безпечному переміщенні пішоходів та мінімізації затримки транспортних і пішохідних потоків у системах регулювання.

Л і т е р а т у р а

1. Капитанов В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В. Т. Капитанов, Е. Б. Хилажев – М.: Транспорт, 1985. – 94 с.
2. Wasson, J. Reconciled Platoon Accommodation at Traffic Signals [Text] / J. Wasson, M. Abbas, D. Bullock, A. Rhodes, C. Zhu. – Indianapolis, December 1999. – 217.
3. Susilo B.H. Modification of saturation flow by width of road approach / B.H. Susilo, Y. Solihin // Procedia social and behavioral science. – 2011. – Vol. 16. – P. 620-629.
4. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения : [ученик для вузов] / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М. : Изд-ий центр «Академия», 2005. – 279 с.
5. Traffic Signal Timing Manual / P. Koonce [and others] – McLean: US Department of Transportation, 2008. – 264 p.
6. Tepley S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Third Edition / S. Tepley, D.I. Allingham, D.B. Richardson, B.W. Stephenson. – Toronto: Institute of Transportation Engineers, District 7, 2008. – 230 p.
7. Highway Capacity Manual / Washington: TRB, 2000. – 1134 p.
8. Akcelik R. Queue discharge flow and speed models for signalized intersection / R. Akcelik, M. Besley // Proceedings of 15th International Symposium on transportation and traffic flow theory. – Adelaide, 2002. – P. 1-20.
9. Ramsay E. Signalized intersection capacity reduction of trucks / E. Ramsay, J. Bunker, R. Troutbeck // Proceedings of the 4th International conference on traffic and transportation studies. – Swissotel, 2004. – P. 793-802.
10. Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением / М.: Транспорт, 1983. – 243 с.

R e f e r e n c e s

1. Kapytanov V.T. Management transportnyu flows in City / V.T. Kapytanov, E.B. Hylazhev – М. : Tran-Sport, 1985. – 94 p.
2. Wasson, J. Reconciled Platoon Accommodation at Traffic Signals [Text] / J. Wasson, M. Abbas, D. Bullock, A. Rhodes, C. Zhu. – Indianapolis, December 1999. – 217 p.
3. Susilo B.H. Modification of saturation flow by width of road approach / B.H. Susilo, Y. Solihin // Procedia social and behavioral science. – 2011. – Vol. 16. – P. 620-629.

4. Kremenets Y.A. Tehnycheskye sredstva organization of road movement [Textbook for Universities] / Y.A. Kremenets, M.P. Pechersk, M.B. Afanasyev. - Moscow: Publishing th center "Academy", 2005. – 279 p.
5. Traffic Signal Timing Manual / P. Koonce [and others] – McLean: US Department of Transportation, 2008. – 264 p.
6. Tepley S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Third Edition / S. Tepley, D.I. Allingham, D.B. Richardson, B.W. Stephenson. – Toronto: Institute of Transportation Engineers, District 7, 2008. – 230 p.
7. Highway Capacity Manual / Washington: TRB, 2000. – 1134 p.
8. Akcelik R. Queue discharge flow and speed models for signalized intersection / R. Akcelik, M. Besley // Proceedings of 15th International Symposium on transportation and traffic flow theory. – Adelaide, 2002. – P. 1-20.
9. Ramsay E. Signalized intersection capacity reduction of trucks / E. Ramsay, J. Bunker, R. Troutbeck // Proceedings of the 4th International conference on traffic and transportation studies. – Swissotel, 2004. – P. 793-802.
10. Inose H., Hamada T. Traffic Management / Trans. from English. - М. : Transport, 1983. – 243 p.

Грицунь О.М. Исследование транспортных задержек на подходе к регулируемому пешеходному переходу при различных режимах координации

В работе рассматриваются результаты исследования транспортных задержек на регулируемых пешеходных переходах при различных расстояний между стоп-линиями и интенсивности движения. Уточнено понимание понятия «транспортная задержка», описан процесс образования очередей перед светофорных объектов. Приведены математические модели определения транспортных задержек на стоп-линиях светофорных объектов в условиях координации позволяют определить рациональные режимы регулирования с точки зрения минимизации потери времени в транспортных и пешеходных потоках.

Ключевые слова: транспортная задержка, мгновенная скорость движения, интенсивность движения, регулируемый пешеходный переход, основные такты, промежуточные такты, поток насыщения.

Hrytsun O. Study on transport delays to approaches adjustable crosswalk the different modes of coordination

We consider the results of studies of transport delays on regulated pedestrian crossings at different distances between the brake lines and traffic. Clarified understanding of the concept of "transport delay", describes the formation of queues in front of traffic lights objects. The mathematical model determining traffic delays on brake lines, traffic lights objects in terms of co-ordination can determine rational regulatory regimes in terms of minimizing the time lost in traffic and pedestrian flows.

Keywords: transport delay, instantaneous speed, traffic, crosswalk adjustable, fixed cycles, intermediate cycles, the flow of saturation.

Грицунь О.М. – аспірант кафедри транспортних технологій, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, e-mail: oleggrutsyn1993@gmail.com.

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**