

Солодкий С.Й., Ройко Ю.Я., Давосир В.А.
Національний університет «Львівська політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ПРАКТИЧНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СМУГ РУХУ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

У роботі розглянуто результати експериментальних вимірювань черг транспортних засобів та практичної пропускної здатності смуг руху, які обслуговують прямі транспортні потоки на регульованих перехрестях. Визначено основні чинники, які визначають закономірності формування черг та їх роз'їзду залежно від часових параметрів світлофорного регулювання та ступеня однорідності (за складом руху) транспортних потоків.

Ключові слова: транспортний потік, склад транспортного потоку, інтенсивність руху, практична пропускна здатність, регульоване перехрестя, світлофорна сигналізація.

Постановка проблеми. Пропускна здатність та інтенсивність руху на регульованих перехрестях залежать від їх геометричних особливостей, режиму роботи засобів регулювання (світлофорів) і характеристик транспортного потоку (ТП) [1–4]. Найважливішими серед них є: ширина ділянки перед перехрестям, поздовжній профіль цієї ділянки, наявність (або відсутність) зон стоянки на цій ділянці, ширина проїзної частини перехрестя, ширина проїзної частини на виході із зони перехрестя, радіуси поворотів та тривалість фази дозволяючого (зеленого) сигналу світлофора [1, 5–8]. До характеристик ТП відносяться: характер розподілу руху і склад ТП, який прибуває до перехрестя (інтенсивність прибуття); розподіл маневрів повороту; наявність (або відсутність) пішоходів і загальні характеристики водіїв [1,2,4,7]. Ці характеристики співвідносяться з величиною і місцезнаходженням перехрестя в межах міста, тому їх точна кількісна оцінка неможлива. Прибуття транспортних засобів (ТЗ) на перехрестя багато в чому залежить від співвідношення тривалості циклів на суміжних світлофорах, а також від режиму роботи кожного із них [2,7]. Для оцінки пропускної здатності та інтенсивності руху на перехресті важливо правильно обрати показник якості функціонування перехрестя. Швидкість та щільність руху (або коефіцієнт завантаження дороги рухом) використовувати не можна. Найбільш задовільним показником є тривалість затримки перед перехрестям, яку визначити в умовах руху досить складно. Найчастіше для характеристики якості функціонування перехрестя використовують коефіцієнт завантаження перехрестя рухом, який визначається як відношення кількості завантажених фаз дозволяючого сигналу протягом деякого проміжку часу до загальної кількості фаз дозволяючого сигналу протягом цього ж періоду часу [1,7]. Фаза дозволяючого сигналу вважається завантаженою, коли на всіх смугах є ТЗ, які готові виїхати на перехрестя за появи такого сигналу, здійснюють рух під час всієї його тривалості і немає випадків, коли із за малої щільності руху між ТЗ, які виїжджають на перехрестя, утворюються інтервали значної тривалості. Такі фази називають повністю насиченими [1,2,4,7,8].

На магістральних вулицях великих міст повністю насичені фази спостерігаються постійно протягом періоду найбільш інтенсивного руху. До того ж, такими вони є не лише на магістральних напрямках перехрестя, але й на другорядних підходах. У таких випадках завжди проектується режим світлофорної сигналізації із жорсткими програмами управління, які ґрунтуються на співставленні інтенсивності прибуття та потоку насичення. Під потоком насичення розуміють граничну пропускну здатність напрямку в умовах світлофорного регулювання. Суть жорсткого програмного управління у тому, що тривалість тактів та фаз є фіксованою у часі протягом всього періоду функціонування такого алгоритму. Відповідно, основні затримки ТЗ на регульованих перехрестях пов'язані із режимом роботи світлофорної сигналізації.

Середня тривалість затримки окремого ТЗ на підході до регульованого перехрестя з фіксованим (жорстким) циклом може визначатись за формулою [1–4]

$$d = \frac{T_u(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2N(1-x)} - 0,65 \left(\frac{T_u}{N^2} \right)^{1/3} x^{2+5\lambda}, \quad (1)$$

де $T_{\text{ц}}$ – тривалість світлофорного циклу, с; λ – відношення тривалості горіння зеленого сигналу до тривалості циклу; x – ступінь насичення напрямку руху; N – інтенсивність руху ТЗ на досліджуваному напрямку, од/с.

Співставляючи кількість ТЗ, які підходять до перехрестя за час заборонного сигналу до кількості ТЗ, які проходять стоп-лінію на дозволяючий сигнал, можна зробити висновки про ефективність роботи світлофорної сигналізації і практичну пропускну здатність регульованого перехрестя. При цьому, знаючи затримку, яка припадає на один ТЗ, можна прогнозувати процес накопичення черг на підходах до регульованих перехресть.

У зв'язку з цим, **метою роботи** є визначення довжини черг та практичної пропускну здатності смуги руху на регульованому перехресті залежно від ступеня однорідності (за складом руху) ТП та режиму роботи світлофорної сигналізації із жорсткими програмами управління.

Результати досліджень. Об'єктами дослідження обрано регульовані перехрестя із жорстким циклом регулювання на магістральних вулицях міста Львова: вулиць Городоцька – Виговського (підхід з вулиці Городоцька до центру та від центру); вулиць Городоцька – Кульпарківська (підхід з вулиці Городоцька до центру); вулиць Стрийська – Сахарова (підхід з вулиці Стрийська до центру); вулиць Стрийська – Володимира Великого (підхід з вулиці Стрийська від центру); вулиць Кульпарківська – Садова (підхід з вулиці Кульпарківська від центру), а також регульований пішохідний перехід через вулицю Кульпарківська. Ці перехрестя знаходяться в різних районах міста та відрізняються між собою режимом роботи світлової сигналізації, інтенсивністю і складом ТП, тому дозволяють вивчити проблему утворення затримок та черг ТЗ більш детально для подальшого повірення закономірностей. Характерна спільна ознака цих перехресть полягає у тому, що у пікові періоди тут спостерігається різке зростання інтенсивності, яке супроводжується утворенням черг ТЗ. Зазначимо також, що дослідження проводилися у ранковий та вечірній пікові періоди на смугах, які обслуговують лише прямі ТП магістральних вулиць загальноміського значення. Це дозволить порівняти отримані результати між собою під час аналізу.

Вимірювання проводилися за допомогою відеокамери, яка фіксувала інтенсивність, склад та черги ТЗ на кожному із підходів до перехрестя протягом десяти циклів регулювання в період максимального насичення. Вони встановлювались і працювали таким чином, щоб охопити підхід і смугу руху до перехрестя, світлофорний об'єкт з режимом роботи та момент прибуття ТЗ до стоп-лінії на заборонний сигнал і їх роз'їзд на дозволяючий (рис. 1).

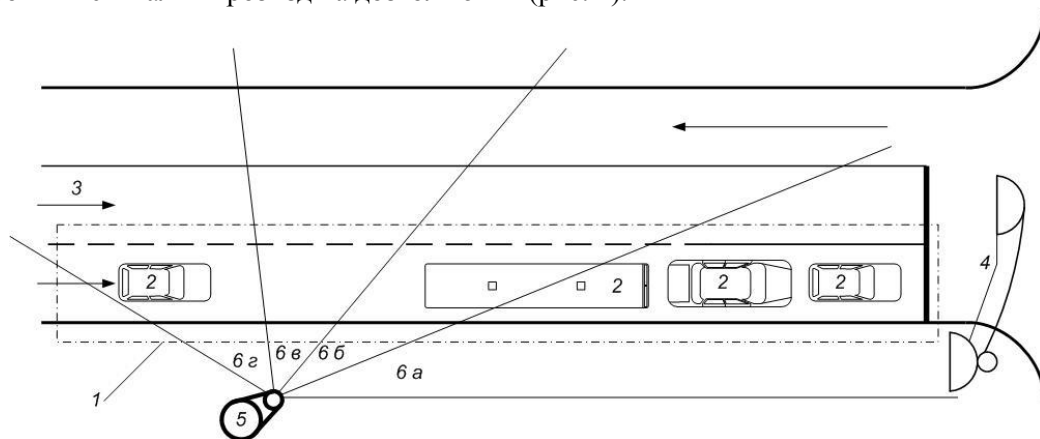


Рисунок 1. Схема розташування відеокамери під час виконання вимірювання

Дослідник розташовує відеокамеру (5) на тротуарі біля перехрестя таким чином, щоб на початок відеофіксації було видно момент ввімкнення заборонного (або дозволяючого) сигналу світлофора (4) та досліджувану смугу руху (1). Дозволений напрямок руху на смузі позначено цифрою (3). У процесі накопичення ТЗ (2) перед стоп-лінією дослідник повертає камеру, поступово змінюючи положення зони фіксації (6а – 6г), і завершує фіксацію в момент прибуття останнього ТЗ в чергу. Аналогічний порядок дій відбувається під час фіксування роз'їзду ТЗ через стоп-лінію в момент дії дозволяючого сигналу.

Після експериментальних вимірювань на кожному з обраних об'єктів (регульовані перехрестя та пішохідний перехід) побудовано діаграми, які показують фактичну інтенсивність прибуття ТЗ до стоп-лінії за час дії заборонного сигналу (рис. 2, а) та тих, які пройшли на дозволяючий сигнал

світлофора (рис. 2, б), а також склад ТП (рис. 2, в). На рис. 2 такі діаграми показано для перехрестя вулиць Городоцька – Виговського (підхід з вулиці Городоцька до центру).

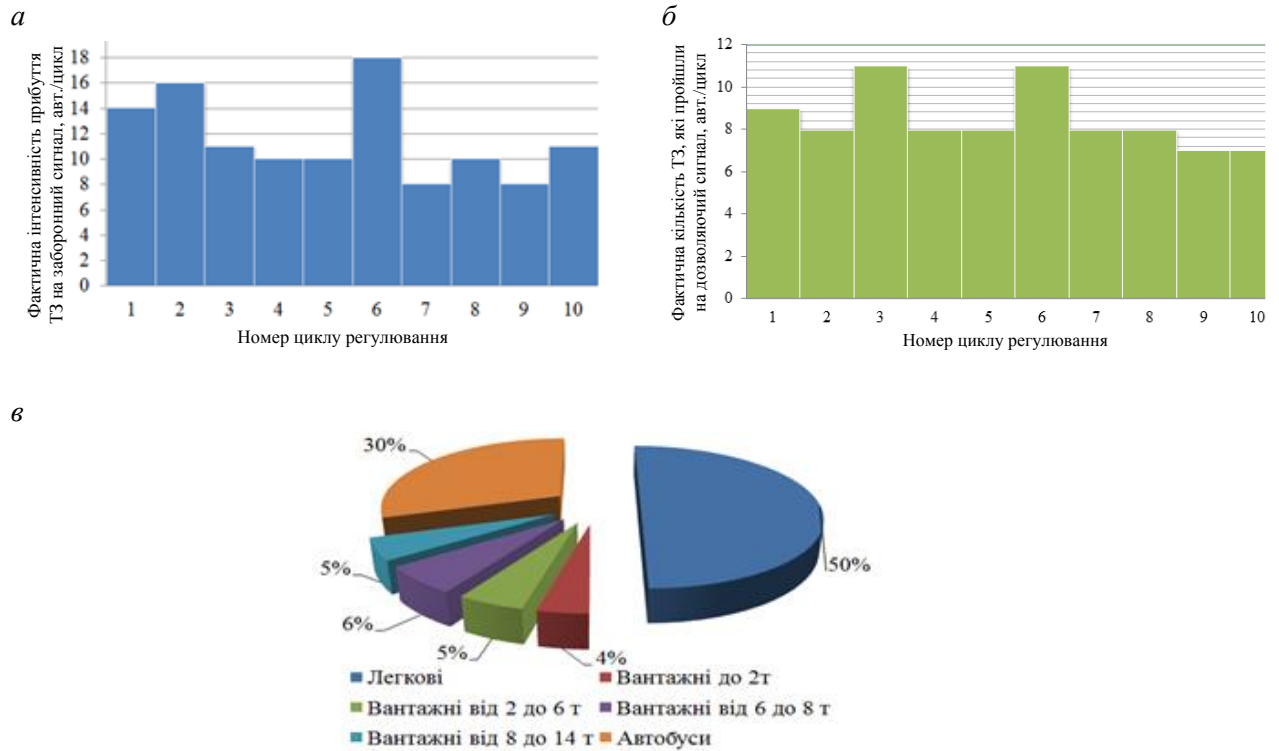


Рисунок 2. Результати вимірювання фактичної інтенсивності прибуття ТЗ до стоп-лінії за час дії заборонного сигналу (а) та тих, які пройшли на дозволяючий сигнал світлофора (б), а також складу ТП (в) на перехресті вулиць Городоцька – Виговського (підхід з вулиці Городоцька до центру)

На першому етапі аналізу зосередимо свою увагу на затримках та чергах, які виникають у смугах, що обслуговують прямі ТП під час горіння заборонного сигналу. Опрацювавши результати вимірювання на всіх об'єктах дослідження за 10 циклів та, перевівши їх у годинне вираження, отримаємо зведені дані, які відображені на рис. 3.

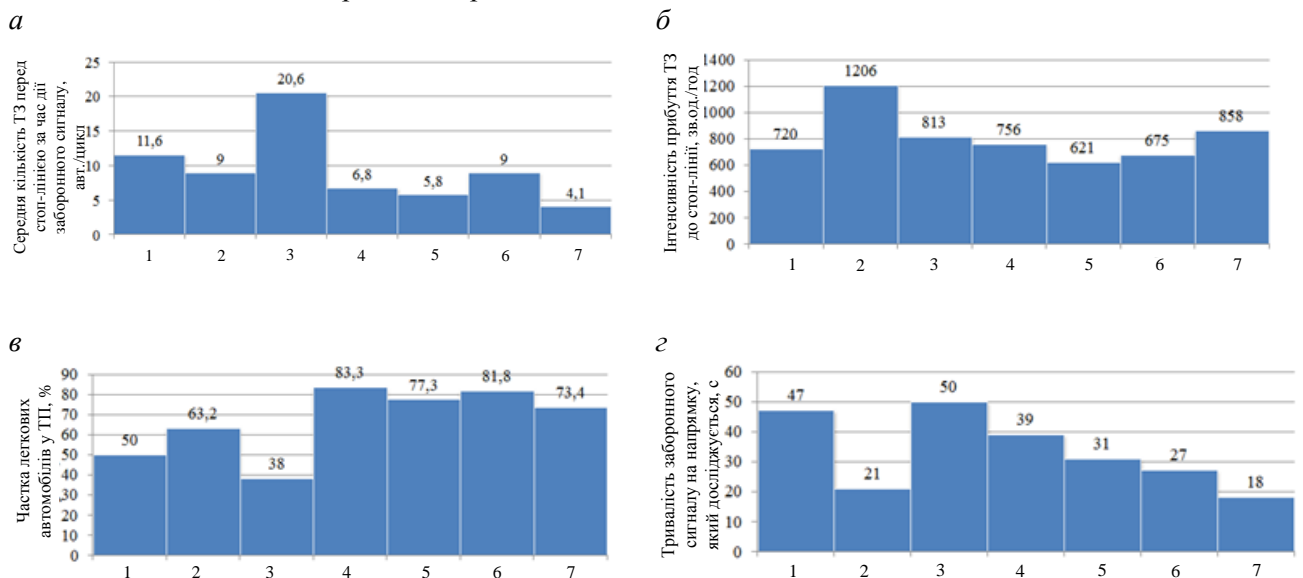


Рисунок 3. Зведені результати вимірювань середньої кількості ТЗ перед стоп-лінією за час дії заборонного сигналу (а), інтенсивності прибуття ТЗ до стоп-лінії (б), рівня однорідності ТП (в) та режиму регулювання (г) на регульованих перехрестях вулиць: 1, 2– Городоцька – Виговського (підхід з вулиці Городоцька до центру та від центру); 3 – Городоцька – Кульпарківська (підхід з вулиці Городоцька до центру); 4 – Стрийська – Сахарова (підхід з вулиці Стрийська до центру); 5 – Стрийська – Володимира Великого (підхід з вулиці Стрийська від центру); 6 – Кульпарківська –

Садова (підхід з вулиці Кульпарківська від центру), 7 – регульований пішохідний перехід через вулицю Кульпарківська

На рис. 3, а найбільша кількість ТЗ, що прибувають до стоп-лінії за час заборонного сигналу спостерігається на перехресті вулиць Городоцька – Кульпарківська. Це пояснюється двома чинниками: відносно велика тривалість заборонного сигналу (50 с) у порівнянні з іншими об'єктами дослідження; напрямок, який обрано для дослідження (до центру) в час пік має велику інтенсивність прибуття ТЗ. Підхід, який розташований на перехресті вулиць Городоцька – Виговського характеризується великою часткою громадського транспорту (міські, приміські та міжміські пасажирські перевезення), тому на рис. 3, б спостерігається висока зведена інтенсивність (1206 од./год), що в 1,94 рази більша за найменшу зведену інтенсивність серед досліджуваних об'єктів. На рис. 3, в найбільший рівень однорідності ТП є на підході по вулиці Стрийська (до центру) перехрестя вулиць Стрийська – Сахарова і становить 83,3% легкових автомобілів у загальній структурі ТП, а найменший рівень однорідності на підході по вулиці Городоцька (до центру) перехрестя вулиць Городоцька – Кульпарківськ – 38%. Як видно з рис. 3, г, на перехрестях вулиць Городоцька – Виговського (підхід по вулиці Городоцька у напрямку до центру), Городоцька – Кульпарківська (підхід по вулиці Городоцька у напрямку до центру) та Стрийська – Сахарова (підхід по вулиці Стрийська у напрямку до центру) передбачено великі тривалості горіння заборонного сигналу. Таке рішення часто пояснюється складністю перехрестя та значними інтенсивностями на всіх підходах до нього.

Для виведення загальної закономірності, яка б характеризувала процес накопичення черги з урахуванням інтенсивності прибуття ТЗ (з розрахунку на одну смугу) до регульованого перехрестя, враховуючи режим регулювання та склад ТП, розрахункову тривалість заборонного сигналу прийнято з кроком 20 с. За результатами експериментальних досліджень отримано таку залежність (рис. 4).

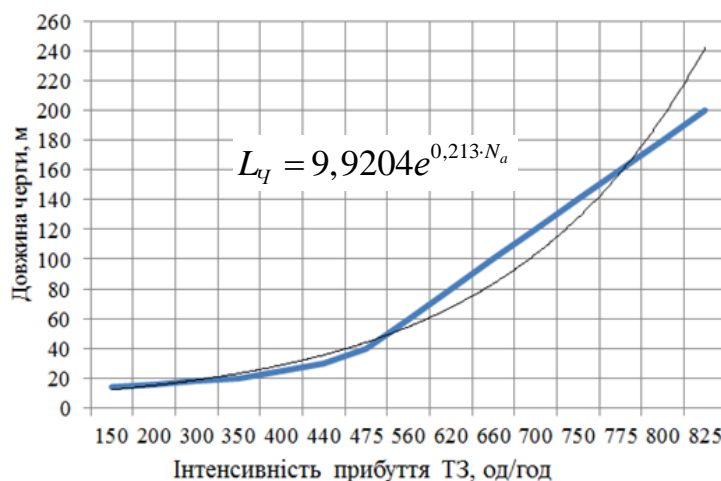


Рисунок 4. Зміна довжини черги у смузі руху, яка обслуговує прямі ТП перед стоп-лінією на регульованому перехресті залежно від інтенсивності прибуття ТЗ

На наступному етапі проведемо детальний аналіз процесу роз'їзду черг ТЗ на об'єктах досліджень, ґрунтуючись на результатах експериментальних вимірювань.

Так, для підходу з вулиці Городоцька (до центру) регульованого перехрестя вулиць Городоцька – Виговського, за час дозволяючого сигналу, який становить 20 с, через стоп-лінію проходить в середньому 9 ТЗ, що становить 2,2 с на один ТЗ. На підході з вулиці Городоцька (від центру) регульованого перехрестя вулиць Городоцька – Виговського за час дозволяючого сигналу 44 с, через стоп-лінію проходить в середньому 18 ТЗ, що становить 2,4 с на один ТЗ. Головною відмінністю цих двох об'єктів дослідження від інших є те, що на перехресті Городоцька – Виговського облаштовано підземні пішохідні переходи, а відтак, пішоходи не взаємодіють з ТП і не можуть впливати на динамічні характеристики (розгін) ТЗ, що проходять перехрестя на основний (дозволяючий) сигнал. На інших об'єктах дослідження результати є такими: підхід з вулиці Городоцька (до центру) регульованого перехрестя вулиць Городоцька – Кульпарківська – дозволяючий сигнал 26 с, стоп-лінію проходить в середньому 10 ТЗ, середній час на один ТЗ – 2,6 с; підхід з вулиці Стрийська (до центру) регульованого перехрестя вулиць Стрийська – Сахарова –

дозволяючий сигнал 37 с, стоп-лінію проходить в середньому 14 ТЗ, середній час на один ТЗ – 2,6 с; підхід з вулиці Стрийська (до центру) регульованого перехрестя вулиць Стрийська – Володимира Великого – дозволяючий сигнал 25 с, стоп-лінію проходить в середньому 8 ТЗ, середній час на один ТЗ – 3,1 с; підхід з вулиці Кульпарківська (від центру) регульованого перехрестя вулиць Кульпарківська – Садова – дозволяючий сигнал 49 с, стоп-лінію проходить в середньому 13 ТЗ, середній час на один ТЗ – 3,8 с; підхід з вулиці Кульпарківська (від центру) через регульований пішохідний перехід – дозволяючий сигнал 57 с, стоп-лінію проходить в середньому 16 ТЗ, середній час на один ТЗ – 3,6 с

Після опрацювання результатів експериментальних вимірювань кількості ТЗ, які пройшли стоп-лінію регульованого перехрестя у смузі прямого руху за час основного дозволяючого сигналу протягом 10 циклів у пікові години (повне насичення напрямків руху), проведемо аналіз взаємозв'язку між практичною пропускну здатністю (P_{np}^e) цих смуг руху та тривалістю основного дозволяючого такту (t_o). За результатами експериментальних вимірювань визначено, що найбільший вплив на процес роз'їзду черги в умовах світлофорного регулювання має величина однорідності ТП. До того ж, всі смуги руху, які досліджувались за однакових погодних умов, знаходяться на горизонтальних прямих ділянках вулиць з асфальтобетонним рівним покриттям. Врахувавши ці чинники, визначимо закономірності зміни практичної пропускну здатності смуги руху, яка обслуговує лише прямі ТП в умовах світлофорного регулювання за умови, коли частка легкових автомобілів у потоці 50 – 70%; 70 – 80%; 80 – 95%. Графічні залежності наведено на рис. 5.

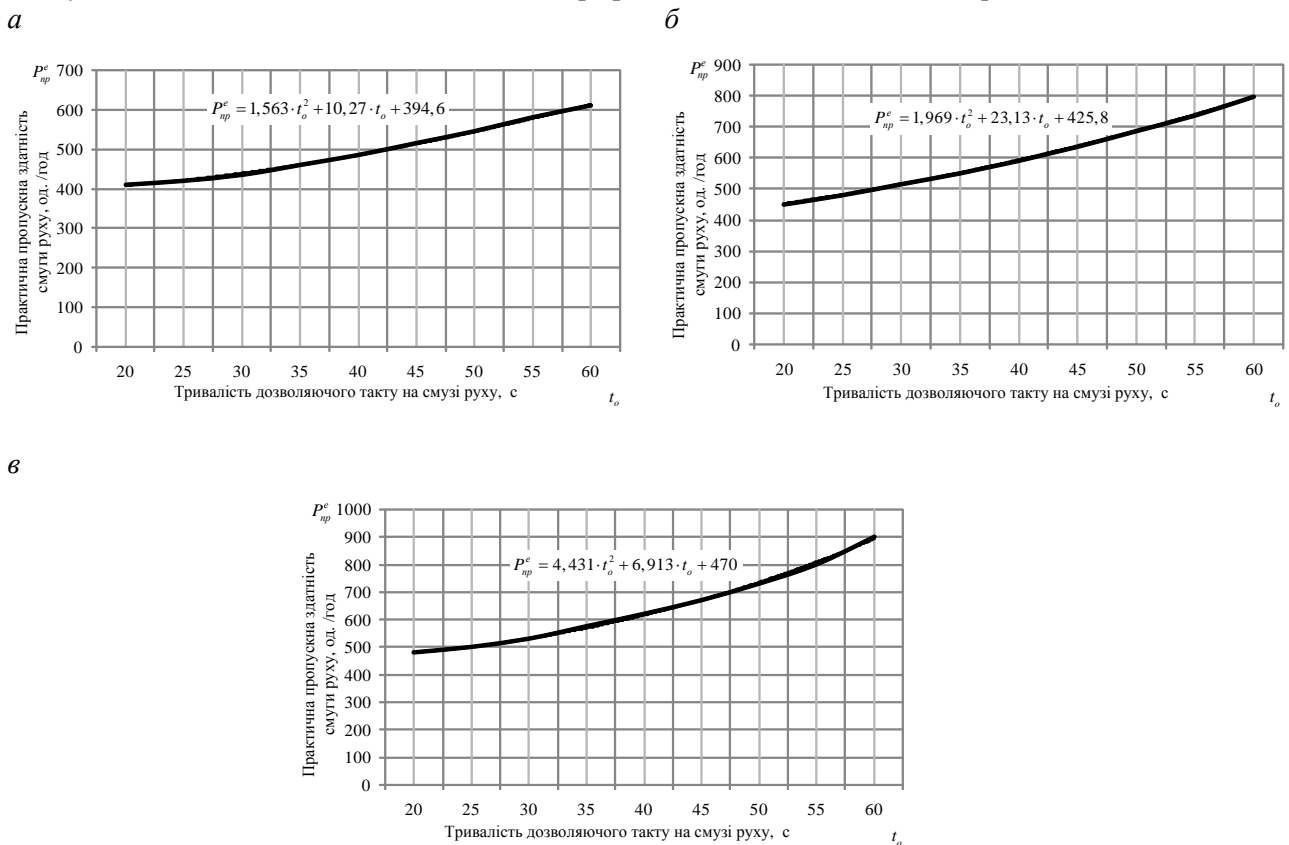


Рисунок 5. Зміна практичної пропускну здатності смуги руху, яка обслуговує прямі ТП на регульованому перехресті залежно від частки легкових автомобілів у ньому: а – 50 – 70%; б – 70 – 80%; в – 80 – 95%

З рис. 5, а можна зробити висновок, що при зміні тривалості основного дозволяючого сигналу від 20 до 60 с величина практичної пропускну здатності збільшувалась з 420 зв. од./год. до 610 зв. од./год. (фактичне збільшення становило 45%). Аналізуючи рис. 5, б бачимо, що за такої ж зміни тривалості основного дозволяючого сигналу величина практичної пропускну здатності збільшилась з 450 зв. од./год. до 795 зв. од./год. (фактичне збільшення становило 77%). На рис. 5, в, де однорідність транспортного потоку набуває найбільших значень, величина практичної пропускну здатності збільшилась з 480 зв. од./год. до 900 зв. од./год., тобто фактичне збільшення становить близько 86%.

Як видно з рис. 5, між практичною пропускною здатністю смуги руху, яка обслуговує прямі ТП та тривалістю основного дозволяючого такт існує пряма залежність, тенденції в якій є змінними від складу ТП.

Висновки. За результатами досліджень можна зробити такі загальні висновки:

у смугах руху, які обслуговують лише прямі ТП за зміни величини інтенсивності руху від 150 до 825 зв.од./год довжина черги може змінюватись від 15 до 200 м;

визначено, що залежність між практичною пропускною здатністю смуги на регульованому перехресті (P_{np}^e) та тривалістю дозволяючого сигналу у фазі регулювання (t_o) за різного складу ТП є прямою. При зміні t_o від 20 с до 60 с: за частки 50 – 70%, P_{np}^e збільшується з 420 зв. од./год. до 610 зв. од./год.; за частки 70 – 80% P_{np}^e зростає з 450 зв. од./год. до 795 зв. од./год.; 80 – 95% P_{np}^e з 480 зв. од./год. до 900 зв. од./год.

Такі результати досліджень мають важливе значення під час оцінки потоків насичення для смуг руху на регульованих перехрестях, оскільки дають можливість більш раціонально здійснити перерозподіл тривалості сигналів, змінити ступені насичення у фазах регулювання та зменшити сумарні тривалості затримки на напрямках руху.

1. Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху [Гаврилов Е. В., Дмитриченко М. Ф., Доля В. К. та ін.]; за ред. М. Ф. Дмитриченка. – К. : Знання України, 2007. – 452 с. – (5 кн./Гаврилов Е. В., Дмитриченко М. Ф., Доля В. К. та ін.; кн. 4).
2. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник /За заг. ред. В. П. Поліщука; О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін. – К. : Знання України, 2012. – 467 с.
3. Врубель Ю. А. Потери в дорожньому русі / Ю. А. Врубель. – Минск : БНТУ, 2003. – 380 с.
4. Chen X. Capacity reliability of signalized intersections with mixed traffic conditions /X. Chen, C. Chao, D. Li, C. Dong // Tsinghua science and technology. – 2009. – Vol. 14. – Num. 3. – P. 333-340.
5. Shao Chang-qiao. Study of the saturation flow rate and its influence factors at signalized intersections in China /Chang-qiao Shao, Jian Rong, Xiao-ming Liu //Procedia Social and Behavioral Sciences. – 2011. – 16. – P. 504-514.
6. Формальчик Є.Ю. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Є.Ю. Формальчик, І.А. Могила, В.Е. Трушевський, В.В. Гілевич. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 236 с.
7. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М: ИКЦ "Академкнига", 2005. – 279 с.
8. Лобашов О.О. Практикум з дисципліни «Організація дорожнього руху»: навч. посіб. / О.О. Лобашов, О.В. Прасоленко. Харків: ХНАМГ, 2011. – 221 с.

REFERENCES

1. Dmytrychenko, M. (2007) Systemology on transport. Traffic organization [Sustemologija na transporti. Organizacija dorozhnogo ruchy]. Kiev, Znannja Ukrainy Publ. 452 p.
2. Polishchuk, V. (2012) The organization and regulation of traffic [Organizacija i regylyuvannja dorozhnogo ruchy]. Kiev, Znannja Ukrainy Publ. 467 p.
3. Vrubel', Ju (2003). *Potery v dorozhnom dvizhenii [Potery v dorozhnom dvizhenii]*. Minsk: BNTU, 380 p.
4. Chen, X. (2009) Capacity reliability of signalized intersections with mixed traffic conditions. Tsinghua science and technology. pp. 333-340.
5. Shao, Chang-qiao. (2011) Study of the saturation flow rate and its influence factors at signalized intersections in China. Procedia Social and Behavioral Sciences. pp. 504-514.
6. Fornalchuk, Ye. (2018) Road traffic management on controlled intersections in cities: monograph [Upravlinnia dorozhnim rukhom na rehuliovanykh perekhrestyakh u mistakh: monohrafiia]. Lviv, Lviv Polytechnic Publ. 236 p.
7. Kremenets, Yu. (2005) Technical means for traffic management [Tekhnicheskiye sredstva orhanyzatsyy dorozhnogo dvizheniya]. Moskva, IKTS "Akademkniga". 279 p.
8. Lobashov, O. (2011) Practicum on discipline "Traffic management" [Praktykum z dystsypliny "Orhanizatsiia dorozhnogo rukhu"]. Kharkiv, KhNAMH. 221 p.

Солодкий С.И., Ройко Ю.Я., Давосир В.А. Определение практической пропускной способности полосы движения на регулируемом перекрестке.

В работе рассмотрены результаты экспериментальных измерений очередей транспортных средств и практической пропускной способности полос движения, которые обслуживают прямые транспортные потоки на регулируемых перекрестках. Определены основные факторы, которые определяют закономерности формирования очередей и их разъезда в зависимости от временных параметров светофорного регулирования и степени однородности (по составу движения) транспортных потоков.

Ключевые слова: транспортный поток, состав транспортного потока, интенсивность движения, практическая пропускная способность, регулируемый перекресток, светофорная сигнализация.

S. Solodkyu, Yu. Royko, V. Davosyr. Determination of practical capacity of traffic lanes on controlled intersections

Results of experimental measurements of vehicle queues and practical capacity of traffic lanes that serve straight traffic flows on controlled intersections are reviewed in this work. The main factors that determine the regularities of queue formation and

their crossing depending from time parameters of traffic light control and degree of homogeneity (by composition) of traffic flows are determined.

Keywords: traffic flow, traffic flow composition, traffic intensity, practical capacity, controlled intersection, traffic light signalization.

АВТОРИ:

СОЛОДКИЙ С.Й., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів, e-mail: Solodkyu@lp.edu.ua

РОЙКО Юрій Ярославович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: jurij.rojko@gmail.com

ДАВОСИР Владислав Андрійович, студент кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: davosir2012@yandex.ua

АВТОРЫ:

СОЛОДКЫЙ С.И., доктор технических наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника», заведующий кафедрой автомобильных дорог и мостов, e-mail: Solodkyu@lp.edu.ua

РОЙКО Юрий Ярославович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных технологий, Национальный университет «Львовская политехника», e-mail: jurij.rojko@gmail.com

ДАВОСЫР Владислав Андреевич, студент кафедры транспортных технологий, Национальный университет «Львовская политехника», e-mail: davosir2012@yandex.ua

AUTHORS:

Serhii SOLODKYI, Doctor of Science in Engineering, Professor, Lviv Polytechnic National University, Head of highways and bridges Department, e-mail: Solodkyu@lp.edu.ua.

Yuriy ROYKO, PhD in Engineering, Assoc. Professor of Transport technologies Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: jurij.rojko@gmail.com

Vladyslav DAVOSYR, student Transport technologies Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: davosir2012@yandex.ua

Стаття надійшла в редакцію 02.05.2019 р.