

# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.051

doi: 10.26906/SUNZ.2024.3.011

Є. В. Любий, К. І. Дорофєєв

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕДСИГНАЛІВ

**Анотація.** У представленій статті проаналізовано досвід використання передсигналів для вирішення проблемного питання щодо ефективного управління транспортними потоками на регульованих перехрестях. За результатами проведеного аналізу встановлено, що основними напрямками використання передсигналів як засобів управління транспортними потоками на міських магістралях є пріоритизація руху громадського транспорту на підході до перехрестя та вже безпосередньо на ньому, а також оптимізація світлофорного регулювання локальних перехресть або групи перехресть. Основними критеріями щодо оцінювання заходів щодо підвищення ефективності управління транспортними потоками на регульованих перехрестях з використанням передсигналів можна вважати транспортні затримки, витрати часу користувачів громадського транспорту, рівень обслуговування перехрестя та довжина черги транспортних засобів. Основними засобами, що використовуються для оцінювання ефективності роботи світлофорних систем з використанням передсигналів є імітаційне моделювання, для чого застосовуються найпопулярніші серед фахівців галузі програмні продукти – VISSIM, SUMO, AIMSUN. Потенційним напрямом подальших досліджень є розробка принципів вибору і обґрунтування місць розташування передсигналів на міських магістралях.

**Ключові слова:** дорожній рух, світлофорне регулювання, регульовані перехрестя, передсигнал, транспортні затримки, пропускна здатність.

### Вступ

**Постановка завдання.** Підвищення рівня автомобілекористування міського населення впливає на рівень і якість транспортного обслуговування учасників дорожнього руху, особливо в міських умовах. Міські перехрестя є одним із основних місць концентрації конфліктних ситуацій для учасників дорожнього руху і головним джерелом виникнення транспортних затримок. На даний час вже відомо багато практик щодо скорочення затримок транспортних потоків як на регульованих, так і на нерегульованих перехрестях, впровадження яких дозволяє покращити якість транспортного обслуговування різних учасників дорожнього руху.

Відомо, що левова частка затримок транспортних засобів за умов руху в міських умовах відбувається саме на регульованих перехрестях, тому і увага фахівців (вчених і практиків) більше прикута саме до вирішення проблеми взаємодії транспортних потоків на цих елементах міської вулично-дорожньої мережі, як в локальному вигляді (окремі перехрестя), так і системному (група перехресть). Основними засобами мінімізації транспортних затримок на регульованих перехрестях є: визначення оптимальних світлофорних циклів; впровадження координації роботи світлофорних об'єктів; використання елементів адаптивних і інтелектуальних систем управління транспортними потоками; застосування передсигналів. Використання останніх, на даний час, не є розповсюдженою практикою, що пов'язано, в більшому ступені, з їх непопулярністю і необхідністю додаткового обґрунтування, а також специфікою застосування – в основному, використовуються в системах або на елементах вулично-дорожньої мережі, де існує потреба в наданні пріоритетного руху, наприклад, надання

пріоритету в русі міському громадському транспорту або спецтранспорту. Але не дивлячись на це доцільно більш глибоко розглянути практику використання передсигналів з точки зору покращення якості рівня транспортного обслуговування учасників дорожнього руху на регульованих перехрестях або підходах до них, що і є **основною метою** даної статті.

### Виклад основного матеріалу

Загальна концепція використання передсигналів була запроваджена для скорочення втрат часу на регульованих перехрестях, а перші передсигнали були апробовані та встановлені в 1954 році в Дюссельдорфі [1]. Слід розуміти, що на практиці реалізація передсигналів є обмеженою. Це можна пов'язати із необхідністю виділення додаткової території на вулично-дорожній мережі під їх облаштування, що є надскладною задачею для сучасних міст з їх усталеним плануванням і забудовою. Але в останні часи почало з'являтися все більше прикладів впровадження систем з передсигналами, особливо це стосується міст країн азійського регіону, де вирішуються проблеми пріоритизації руху громадського транспорту на магістралях.

В сучасній практиці ефективної організації дорожнього руху найчастіше під передсигналами розуміють додаткові світлофори, які розміщуються перед регульованими перехрестями та забезпечують певний рівень пріоритету для руху окремих систем транспорту (громадських транспорт, транзитні транспортні потоки, спецтранспорт), дозволяючи їм оминати черги з транспортних засобів, що виникають перед цими перехрестями [2]. Але це не єдиний можливий варіант використання передсигналів у галузі управління транспортними потоками.

Передсигнали можуть використовуватись для підвищення ефективності координованого управ-

ліній транспортними потоками. У такому разі передсигнали встановлюються з метою підтримки параметрів групи транспортних засобів, що рухаються в скоординованих системах на магістралях, для зберігання структури і динамічних властивостей пачки зеленої хвилі. А також можуть застосовуватись для коригування подачі транспортних засобів, що прибувають до скоординованої магістралі або її ділянки з другорядних напрямків або проїздів (виїздів з прилеглих територій). В такому разі, в основному, передбачається встановлення передсигналів з організацією стоп-ліній поза перехрестя, використовуючи надлишкову тривалість зеленого сигналу.

Поширене розповсюдження отримали передсигнали для регулювання дорожнього руху на підходах і в межах залізничних переїздів. Метою встановлення передсигналу в цьому випадку є зменшити, а в оптимальному варіанті – ліквідувати ймовірність зупинки транспортних засобів на залізничній колії під час червоної фази циклу світлофору [3]. До того ж можна знайти приклади використання передсигналів для управління рухом велосипедистів [4, 5], хоча попит на велосипеди часто є занадто низьким, щоб виправдати такий управління дорожнім рухом [6].

Отже, з представленого вище, можна констатувати, що основними напрямками удосконалення організації дорожнього руху із використанням передсигналів є:

- пріоритезація руху громадського транспорту в межах регульованих перехресть на міських магістралях;
- підвищення ефективності світлофорного регулювання локальних перехресть або групи перехресть (координації роботи світлофорних об'єктів) на міських магістралях;
- та інші випадки, що зустрічаються значно рідше, до яких можна віднести – регулювання руху транспортних засобів і забезпечення його безпеки в межах залізничних переїздів; організація ефективної взаємодії вело- і транспортних потоків; надання пріоритету в русі спецтранспорту.

В подальшому матеріалі статті будуть представлені та описані приклади використання передсигналів для перших двох напрямів, оскільки вони характеризуються найбільшим поширенням і проробкою їх теоретичної та практичної складової.

**Пріоритезація руху громадського транспорту.** Надання громадському транспорту пріоритету є важливим і необхідним заходом для підвищення його привабливості та скорочення транспортних затримок у містах. Слід розуміти, що досягнення максимального скорочення затримок автобусного сполучення позитивно вплине й на загальний міський трафік [7].

Надання пріоритету громадському транспорту у поєднанні з використанням передсигналів можна вважати типовою формою управління пріоритетом автобусів, яка вивчалася і вивчається багатьма дослідниками всьому світу [8]. Вперше концепція використання передсигналів у цьому напрямку була висунута Міністерством транспорту Британії в 1991 р. [7].

У свою чергу, перший ґрунтовний теоретичний аналіз використання передсигналів для вирішення

проблем з організацією пріоритетного руху громадського транспорту був представлений авторами роботи [9], але запропонована ними реалізація передбачала постійну роботу передсигналу незалежно від часу прибуття автобусу. Типова схема передсигналу, що використовується з метою надання пріоритету громадському транспорту представлена на рис. 1.

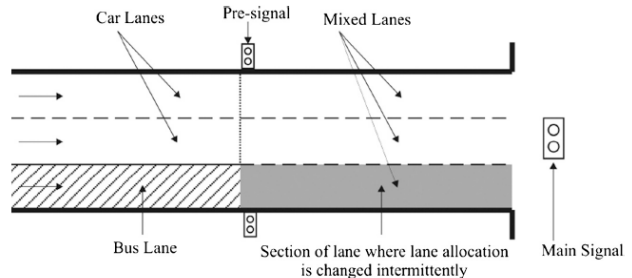


Рис. 1. Типова схема встановлення передсигналу для надання пріоритету руху громадському транспорту [10]

Автори роботи [10] проводили оцінювання переваг використання послідовних (групи) перехресть рпи вирішенні задачі надання пріоритету в русі громадському транспорту. За цільову функцію використано затримки і запропоновано метод оптимізації синхронізації сигналів і розподілу смуг руху. Результати дослідження засвідчують, що реалізація запропонованого методу може скоротити затримку транспортних засобів і значно покращити пропускну здатність перехресть. Для реалізації пріоритету громадського транспорту в роботі [11] запропоновано алгоритм передсигнального адаптивного управління трафіком для задоволення потреб приватного та громадського транспорту, що працює в режимі реального часу.

Автори іншої роботи [12] також досліджувалось питання ефективності надання пріоритету руху автобусам з використанням передсигналу. В наступній роботі [13] авторами було удосконалено координаційні зв'язки основного і передсигналу, а також склали криві прибуття та відправлення транспортного засобу відповідно до правил прибуття та відправлення на основний сигнал. До того ж у роботі запропоновано метод розрахунку зміни затримки громадського транспорту та інших транспортних засобів до і після встановлення передсигналу.

Оптимізації стратегії скоординованого управління основного сигналу і передсигналу для пріоритизації руху громадського транспорту присвячена робота [14] Для отримання результатів внесених в координацію змін авторами змодельовані різні ситуації за допомогою програмного забезпечення VISSIM.

В роботі [8] авторами запропоновано використовувати передсигнали для надання пріоритету громадському транспорту на підході до регульованого перехрестя, за рахунок чого у цих транспортних засобів виникає можливість обирати будь-яку смугу з переліку наявних для продовження руху. Встановлено, що після впровадження tandem design на перехресті затримка автобусів зменшується на 27,9%, а затримка транспортних засобів, що повертають ліворуч, на 5,9%.

Нову схему динамічного розподілу смуги руху автобусів запропонували автори [15], що дозволяє оптимізувати обрані параметри, мінімізуючи загальну затримку (включаючи затримку автобуса і затримку транспортних засобів), схема представлена на рис. 2. Недоліком статті є відсутність практичної реалізації запропонованої схеми.

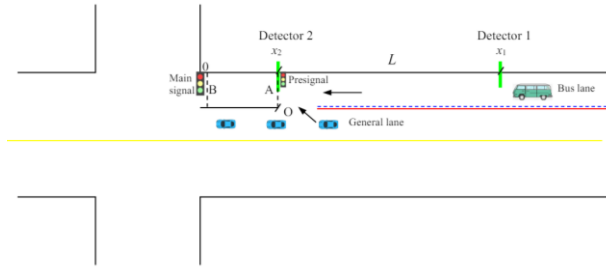


Рис. 2. Схема проектування динамічного розподілу для смуги громадського транспорту [15]

В статті [16] представлено принципи оптимізації управління передсигналами, щодо налаштування сигналів на основі мінімізації загальних витрат часу користувачів транспорту. Розроблено модель для опису динаміки черги для змішаних смуг руху після світлофора, а також для смуг для автобусів та автомобілів перед світлофором. З використанням AIMSUN виконано тестування, аналіз і оцінку ефективності запропонованих принципів оптимального управління, де враховано стохастичні прибуття транспортних засобів до перехрестя.

Автори [17] запропонували метод оцінювання довжини черги транспортних засобів, перед перехрестями, де використовуються передсигнали для надання пріоритету руху автобусам. Цей метод базується на використанні теорії ударних хвиль. Результати імітаційних експериментів показують, що запропонований метод на основі ударних хвиль є ефективним для оцінки довжини черги, пов'язаної з передсигналами для надання пріоритету автобусам.

В роботі [18] представлено теоретичні дослідження щодо доцільності використання передсигналів для збільшення пропускної здатності перехресть з автомобільним і автобусним рухом, які ґрунтуються на припущенні про те, що час, необхідний для роз'їзду сукупності класів транспортних засобів, дорівнює сумі часу, який би знадобився для роз'їзду кожного класу транспортних засобів окремо. Стаття не містить прикладу практичної реалізації запропонованої теорії. Результати імітаційного експерименту в роботі [19] також підтверджують ефективність використання передсигналів для пріоритизації руху автобусів на перехресті. Додатково авторами були змодельовані ситуації з середнім і високим рівнем інтенсивності трафіку, за яких використання розробленого алгоритму управління світлофорними об'єктами дозволяє скоротити загальні транспортні затримки на 30,1%.

**Управління дорожнім рухом на локальних перехрестях і в скоординованих системах з використанням передсигналів.** Іншим потужним напрямом застосування передсигналів у галузі організації

дорожнього руху є забезпечення ефективного руху транспортних засобів на елементах міської вулично-дорожньої мережі, з метою скорочення транспортних затримок. Авторами роботи [20] досліджувалась фактична дорожньо-транспортна ситуація на складному перехресті, де в'їзд на перехрестя з'єднаний з двома частинами, головною дорогою і дорогою, яка є вїздом з прилеглої території. Для підвищення якості транспортного обслуговування на цьому об'єкті авторами було використано передсигнали, ефективність використання яких підтверджена результатами мікромоделювання руху транспортних засобів на цьому перехресті з використанням VISSIM.

В роботі [21] авторами було проаналізовано вплив використання передсигналів на пропускну здатність регульованих перехресть. В результаті чого встановлено, що використання передсигналів дозволяє збільшити пропускну здатність регульованих перехресть.

В статті [22] запропоновано оптимізаційну модель розподілу смуг руху та синхронізації основного сигналу і передсигналу на перехресті, обладнаному двома світлофорами: основним і передсигналом (tandem intersection або tandem design), рис. 3. Крім того, в роботі доведено що, за однакової кількості смуг на всіх підходах до перехрестя, середня транспортна затримка зменшиться, за умов якщо розподіл транспорту смугами буде пропорційним до частки поворотних транспортних засобів.

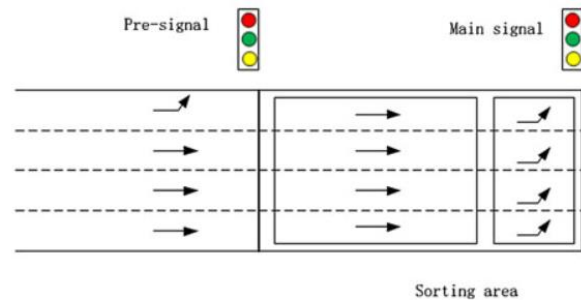


Рис. 3. Приклад використання передсигналу на підході до tandem intersection [22]

Рішення схожих задач до тих, що розглядалися в [22] з використанням передсигналів, представлено в роботі [23], рис. 4. Для оцінки ефективності запропонованих заходів із координації роботи основного світлофору і передсигналу використані засоби мікромоделювання VISSIM. За основні індикатори покращення транспортної ситуації на перехресті обрано три параметри: максимальну довжину черги, час зупинки та затримки транспортних засобів.

Авторами роботи [24] досліджено потенційну пропускну здатність перехресть за умов використання передсигналів. До того ж в статті представлено розрахунок довжини зони очікування основного попереднього сигналу у відповідності до взаємозв'язку між пропускну здатністю та швидкістю прибуття транспортних засобів. Результати показують, що використання передсигналів може покращити пропускну здатність перехресть і зменшити затримки транспортних засобів.

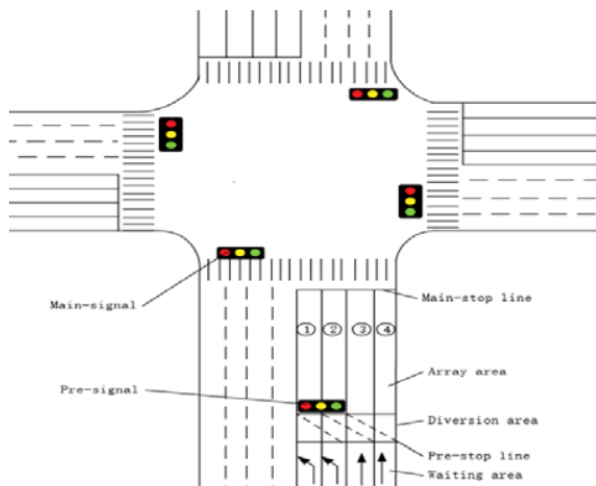


Рис. 4. Принципова схема перехрестя з обладнанням передсигналу лише на одному підході (single tandem intersection) [23]

Робота [25] присвячена розробці оптимальної стратегії управління дорожнім рухом на tandem intersection з передсигналами. Для отримання результатів авторами запропоновано вдосконалений метод розподілу смуг руху, який дозволяє уникати встановлення смуг руху з однаковим напрямком руху впритул одна до одної, наскільки це можливе, запропоновано оптимізаційну модель для мінімізації середньої затримки транспортного засобу та проведено експериментальне дослідження на перевантаженому перехресті в Чанчуні, Китай. Результати показують, що використання запропонованого методу розподілу смуг руху дозволяє зменшити середню затримку транспортних засобів на 22,9% і збільшити пропускну здатність перехрестя на 18,6%.

Оптимізації роботи основного і передсигнального світлофорів присвячена робота [26] на перехрестях з контрпотоковою смугою для лівоповоротних потоків (contraflow left-turn lane). Авторами запропоновано модифікований метод на основі ударних хвиль для оцінки максимальної довжини черги для лівого повороту на перехрестях, обладнаних світлофорними об'єктами, враховуючи унікальну поведінку черги перед передсигналом. Розроблена модель дає обґрунтовану оцінку максимальної довжини черги для лівоповоротного руху на перехрестях, обладнаних світлофорними об'єктами, що мають схему contraflow left-turn lane. Також було запропоновано процедуру, яка допоможе визначити мінімальну відстань між перехрестями, що регулюються світлофорними об'єктами, для впровадження схеми з contraflow left-turn lane.

В статті [27] розглядається питання використання принципу попереднього сортування і управління рухом за участі передсигналу (presorting and presignaling), який адаптовано під існуючий попит на рух автономних транспортних засобів. У цьому випадку передсигнал використовується як засіб для надання пріоритету в русі автономних автомобілів (рис. 5), ефективність використання яких доведена із застосуванням засобів мікросимуляції SUMO, на прикладі невеликих перехресть Німеччини.

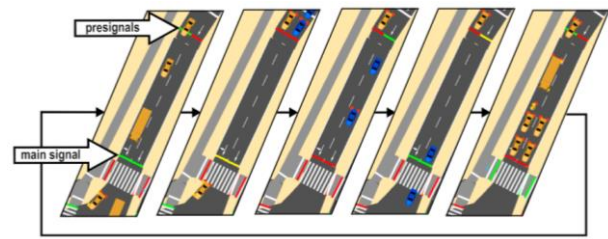


Рис. 5. Приклад роботи «попередньо відсортованого та попередньо сигналізованого» північного під'їзду до перехрестя Гостманнплац (автономні автомобілі позначені синім кольором) [27]

Підсумовуючи проведений аналіз практики використання передсигналів, можна сказати, що на сьогоднішній день науковці провели велику кількість досліджень щодо обладнання під'їзних доріг і перехресть передсигналами, їх налаштування та оцінки переваг їх впровадження як для пріоритизації руху громадського транспорту, так і для оптимізації роботи локальних і скоординованих систем світлофорних об'єктів. При цьому основною метою встановлення передсигналів є скорочення затримок транспорту і, як наслідок збільшення пропускну здатності перехресть. Основним засобом оцінки ефективності застосування передсигналів є проведення імітаційного експерименту з використанням програмних продуктів: VISSIN, SUMO, AIMSUN.

## Висновки

Авторами чисельних досліджень доведено ефективність використання передсигналів для підвищення пропускну здатності регульованих перехресть, що дозволяє покращити транспортну ситуацію на них, особливо це стосується останнім за часом публікацій, де розглядаються питання дослідження транспортних систем з технологіями підключених та підключених автоматизованих транспортних засобів (Connected and Connected Automated Vehicle Technology).

Основними критеріями щодо оцінювання ефективності управління світлофорними об'єктами, в складі яких наявні передсигнали, є: транспортні затримки (громадського та (або) індивідуального транспорту), рівень обслуговування перехрестя, довжина черги та втрати часу учасниками руху (найчастіше користувачів громадського транспорту).

Результати аналізу практики використання передсигналів свідчать про відсутність цікавості та досвіду їх використання для оптимізації дорожнього руху на регульованих перехрестях серед вітчизняних науковців і практиків. На даний момент складно пояснити в чому саме полягають головні причини такої незацікавленості українських фахівців у використанні передсигналів. З позиції практиків - можливо в необхідності витрачання додаткових коштів на їх придбання і обладнання і, як наслідок, необхідності додаткового налаштування вже мінімум двох світлофорних об'єктів на синхронну роботу.

Викликає цікавість такий напрям досліджень як визначення та обґрунтування умов для вибору місць розташування передсигналів на міських магістралях.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Von Stein, W., 1961. Traffic flow with pre-signals and the signal funnel. Theory of Traffic Flow, Elsevier, Amsterdam.
2. Pre-signals for Transit Priority [Електронний ресурс] One center research. URL: <https://umtcresearch.wordpress.com/2016/05/17/>
3. Ogden, B. D., 2001. Presignals: Current Applications and Issues. Transportation Research Record, 1762(1), 25-31. DOI: <https://doi.org/10.3141/1762-04>
4. Kuijper, D.H., 1982. The OFOS: A Description of the "Expanded Waiting Lane for Cyclists" (De OFOS: Een Beschouwing over de Opgeblazen Fietsopstelstrook). Verkeerskunde, 33(9), 472–476.
5. Wheeler, A.H., M.A.A., Leicester, G., Underwood, 1993. Advanced Stop-Lines for Cyclists. Traffic Engineering & Control, 34(2), 54–60.
6. Wheeler, A. 1995. Advanced Stop-Lines for Cyclists: A Simplified Layout. Traffic Engineering & Control, 36(5), 283–289.
7. Transit Signal Priority: A Planning and Implementation Handbook. URL: <https://trid.trb.org/View/772546>.
8. Sun, Y, Li, J, Wei, X, Jiao, Y., 2021. Tandem Design of Bus Priority Based on a Pre-Signal System. Sustainability, 13(18):10109. URL: <https://doi.org/10.3390/su131810109>.
9. Wu, J., Hounsell, N., 1998. Bus priority using pre-signals. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 32(8), 563-583.
10. Guler, S.I., Menendez, M., 2014. Analytical formulation and empirical evaluation of pre-signals for bus priority. Transportation Research Part B: Methodological, 64, 41–53.
11. He, H., Guler, S.I., Menendez, M., 2016. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal. Transp. Res. Part C Emerg. Technol., 64, 28–44.
12. Zhang, W., Wang, W., 2004. Study on the pre-signal setting method of intersection based on bus priority traffic. Road Traffic Technol., 21, 101–104.
13. Zhang, W., Lu, H., 2005. Bus priority pre-signal control intersection vehicle delay analysis. China Highw. J., 18, 78–82.
14. Zhang, B., Cheng, W., 2016. Study on the coordination control strategy of pre-signal bus priority intersection. Roads Mot. Transp., 5, 28–32.
15. Chen, Qun, Tang, Yi, Wang, Yan, 2022. Dynamic Sharing Scheme and Design Optimization of Bus-Only Lanes Based on Presignal and Detector Settings Before Intersections. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4168506>
16. M., Khwais, J., Haddad, 2022. Optimal Presignal Control for Two-Mode Traffic at Isolated Signalized Intersections. Transportation Science, 57(2), 376-398. DOI: <https://doi.org/10.1287/trsc.2022.1172>.
17. Y., Liang, Z., Wu, J., Li, F., Li, Y., Wang, 2018. Shockwave-Based Queue Length Estimation Method for Presignals for Bus Priority. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 144(9). DOI: <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000175>.
18. Xuan, Y., Gayak, V.V., Cassidy, M.J., Daganzo, C.F., 2012. Presignal Used to Increase Bus- and Car-Carrying Capacity at Intersections, Theory and Experiment. Transportation Research Record, 2315, 191-196. DOI: 10.3141/2315-20
19. Y., Bie, Zh., Liu, H., Wang, 2020. Integrating Bus Priority and Presignal Method at Signalized Intersection: Algorithm Development and Evaluation. J. of Transportation Eng, Part A: Systems, 146(6). DOI: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000360>.
20. Zhao, J.; Wu, J., 2010. Application of Microscopic Simulation Technology in a Pre-Signal Control Method at a Complex Intersection; Asme Press: New York, NY, USA.
21. Xuan, Y., Daganzo, C.F., Cassidy, M.J., 2011. Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases. Transp. Res. Part B Methodol., 45, 769–781.
22. Zhou, Y. Zhuang, H., 2014. The optimization of lane assignment and signal timing at the tandem intersection with pre-signal. J. Adv. Transp., 48, 362–376.
23. Y, Liu, 2020. The Modeling and Simulation of the Tandem Intersection Considering the Vehicle Operation Law. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 3(4), 145-159, DOI: 10.25236/AJETS.2020.030414.
24. Zhou, Y.P., Zhuang, H.B., 2013. Traffic Performance of Signalized Intersections with Protected Pre-Signal Established Upstream. Appl. Mech. Mater., 253–255, 1299–1306.
25. J., Wan, C., Wang, Y., Bie, 2023. Optimal Traffic Control for a Tandem Intersection With Improved Lane Assignments at Presignals, in IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, doi: 10.1109/MITS.2023.3269670.
26. P., Liu, J., Wu, H., Zhou, J., Bao, Zh., Yang, 2019. Estimating Queue Length for Contraflow Left-Turn Lane Design at Signalized Intersections. J. of Transportation Engineering, Part A: Systems, 145(6). DOI: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000240>.
27. M., Barthauer, B., Friedrich, 2020. Evaluation of presorted and presignaled intersections with respect to traffic efficiency and traffic safety. Transportation Research Procedia, 47, 307-314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.103>.

Received (Надійшла) 10.04.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.07.2024

### The practice of using pre-signals

Yevhen Liubiyi, Kostiantyn Dorofieiev

**Abstract.** The article analyzes the experience of using pre-signals to solve the problematic issue of effective traffic management at signalized intersections. Based on the results of the analysis, it has been found that the main directions of using pre-signals as a means of traffic control on cities highways are the prioritization of public transport on the approach to the intersection and directly at it, as well as the optimization of traffic signal control of local intersections or a group of intersections (coordination). The key criteria for evaluating measures to improve the efficiency of traffic flow management at controlled intersections with the use of pre-signals are traffic delays, time spent by public transport users, the level of service and the queue of vehicles. The main means used to assess the efficiency of traffic signal systems with the use of pre-signals is simulation modeling, for which the most popular software products among industry experts are used - VISSIM, SUMO, AIMSUN. A potential area for further research is the development of principles for selecting and justifying the location of pre-signals on cities highways.

**Keywords:** traffic, traffic signal control, signalized intersections, pre-signal, traffic delays, capacity.