

УДК 656.078

DOI: 10.33868/0365-8392-2024-1-278-60-67

© І. О. Хітров, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, ORCID: 0000-0003-2310-1472, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua;

© Ihor Khitrov, Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Transport Technology and Technical Service Department, ORCID: 0000-0003-2310-1472, e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua;

© В. М. Никончук, докт. екон. наук, професор кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, ORCID: 0000-0001-7515-6016, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua (Національний університет водного господарства та природокористування)

© Viktoriia Nykonchuk, DSc (Economics), Professor of the Transport Technology and Technical Service Department, ORCID: 0000-0001-7515-6016, e-mail: v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua (National University of Water and Environmental Engineering)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПЕРЕХРЕСТЯ ДОРІГ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF TRAFFIC LIGHT CONTROL AT ROAD INTERSECTIONS

Анотація. Стаття присвячена дослідженню світлофорного регулювання одного з проблемних перехресть з інтенсивними транспортними потоками міста Рівного з метою підвищення безпечності та ефективності його функціонування. За результатами досліджень змодельовано дорожні умови з перерозподілом сигнального плану у програмі PTV Vissim, проведено аналіз та вказано альтернативні шляхи вирішення проблем.

Ключові слова: перехрестя, транспортний засіб, транспортний потік, світлофорне регулювання, моделювання дорожніх умов.

Abstract. From the functional point of view, the intersection is the most complex element of the road network. It is here that the traffic flows in different directions cross, and various maneuvers take place. This indicates that the intersection is a place with an increased concentration of conflict situations and an increased risk of traffic accidents.

At most high-flow intersections, traffic is controlled by traffic lights, and their inefficient operation can lead to unnecessarily long wait times and overall increase in traffic delays.

The research analyzed a regulated intersection at the crossing of Stepana Bandery and Viacheslava Chornovola main streets in the city of Rivne. This intersection is characterized by constant significant traffic jams.

To simulate traffic conditions at this intersection, the research used PTV Vissim software. Observations of traffic flows, their distribution by directions, and traffic light regulation parameters were used as initial data for modeling the intersection traffic scheme.

The main problem that must be solved when considering isolated traffic light intersections is the calculation and optimization of the signal plan, which involves: determining the number of phases; determining cycle duration; distribution, i.e. determining parts of available green time for each phase; modeling of traffic situations that may arise due to the passage of priority vehicles, congestion of vehicles in intersection areas during peak periods or other situations. At the same time, it is necessary to achieve the best possible characteristics of the intersection functioning.

According to the research results, the road conditions were modeled and the signal plan was optimized with the use of PTV Vissim software. Simulation modeling of the intersection included drawing a road network, installing traffic lights (signal controllers) with a description of their work (choosing the type of light signaling devices, creating signal groups and traffic light signals, parameters for coordinating signals), forming pedestrian zones and a node, performing calculations with subsequent analysis of the received data.

In order to improve the efficiency of the intersection, two options for the operation of the traffic light controllers are offered:

1. Lengthening of the "green" phase, for the convenience of turning to the left (by reducing the phase of oncoming traffic in one direction by 5 seconds). The total duration of the cycle of 70 seconds will not change;

2. Implementation of the third phase – fully pedestrian in all directions, lasting 20 seconds. The total duration of the cycle will increase to 90 seconds.

A more progressive measure can be the introduction of adaptive systems, which are based on new traffic monitoring technologies and allow obtaining accurate data on traffic flows in real time and performing adaptive control of traffic lights, that is, adapting the signal plan in real time to changes in traffic flows.

Keywords: intersection, vehicle, traffic flow, traffic signal control, road conditions modeling.

Вступ

Транспорт і якість суспільного життя нерозривно пов'язані між собою. На цей зв'язок значною мірою впливає роль, яку відіграють у нашому житті автомагістралі, вулиці та тротуари. Відмінне транспортне сполучення має вирішальне значення для розвитку національної економіки.

У функціональному значенні перехрестя є найскладнішим елементом дорожньої мережі. Саме тут перетинаються шляхи транспортних потоків різних напрямків, відбуваються різні маневри. Це свідчить про те, що перехрестя є місцем із підвищеною концентрацією конфліктних ситуацій та підвищеним ризиком виникнення дорожньо-транспортних пригод.

На більшості перехресть з інтенсивним транспортним потоком дорожній рух регулюється світлофорами, і неефективне їхнє налаштування може призвести до невиправдано довгих періодів очікування проїзду та збільшення загальної затримки в русі.

Тому надзвичайно важливо правильно регулювати дорожній рух, щоб забезпечити раціональне використання потенціалу перехрестя, підвищення пропускної здатності всіх його елементів, безпечності проїзду та ефективності [1, 2].

Мета роботи. Основна проблема на більшості світлофорних об'єктах полягає в постійному зростанні кількості транспортних засобів та потребує постійного моніторингу і своєчасного реагування. Щоб покращити роботу світлофорів, перерозподілити транспортні потоки та зменшити загальну затримку в русі, необхідно дослідити моделювання режимів роботи світлофорної системи на чотиристоронньому перехресті з адаптуванням до умов руху.

Для дослідження було обрано регульоване перехрестя з насиченим транспортним потоком перетину магістральної вулиці районного значення В'ячеслава Чорновола та магістральної вулиці загальноміського значення Степана Бандери міста Рівного. Це перехрестя характеризується постійними значними заторами.

Базові положення дослідження. Основна роль світлофорів, тобто світлових сигналів для регулювання дорожнього руху на перехрестях, полягає в розділенні (зме-

ншенні) конфліктних ситуацій між транспортними засобами, пішоходами та іншими учасниками в місцях їх перетину. Світлові сигнали регулюють транспортні потоки в такий спосіб, щоб дозволити транспортним засобам однієї групи потоків (неконфліктних або конфліктних) проїхати в заданий проміжок часу (фазу), при цьому транспортні засоби другої групи потоків будуть зібрані в той самий час.

Розміщення транспортних засобів здійснюється на основі сигнального плану, який уніфіковано враховує всі потоки, згруповані в межах фаз. Основною проблемою, яку необхідно вирішити, коли мова йде про сигналізоване перехрестя, є розрахунок та оптимізація сигнального плану, що передбачає визначення тривалості циклу, кількості фаз, а також розрахунок розподілу інтервалів зеленого сигналу для кожної фази (короткі цикли тривалістю 60-90 секунд ідеальні для міських районів [3]). Світлофорні об'єкти можуть працювати у фіксованому режимі, коли сигнальні плани визначаються на основі попередньо зібраних даних про дорожній рух, а також як адаптивні системи, коли світлофорні об'єкти працюють залежно від зміни параметрів дорожнього руху, таких як потік, швидкість, щільність тощо.

Застосовані методи. Для моделювання умов проїзду транспортними засобами перехрестя зі світлофорним регулюванням застосовувалося програмне забезпечення PTV Vissim (мікроскопічне імітаційне моделювання поведінки транспорту) [4].

Основні результати

Перехрестя (вузол) – це ділянка, яка містить перетин або з'єднання двох чи більше проїзних частин, не віднесених до категорії під'їзних шляхів, і охоплена в межах продовження бічних узбіч або, за їхньої відсутності, бічними обмежувальними лініями проїзної частини.

Вибір відповідного типу перехрестя в кожній конкретній ситуації може бути досить складним і суперечливим рішенням. У всіх ситуаціях першочерговим завданням є досягнення найбезпечнішої практичної організації перехрестя, яка також забезпечує прийнятний рівень мобільності, тобто прагнення максимально підвищити безпеку

руху. Необхідно враховувати відносну безпеку і потреби всіх учасників дорожнього руху (зокрема людей з інвалідністю або з обмеженими можливостями пересування), особливо пішоходів і велосипедистів, оскільки їхні потреби можуть бути важливим фактором при виборі способу організації дорожнього руху і типу управління дорожнім рухом.

Перехрестя проєктуються відповідно до критеріїв міського дизайну, залежно від

його розташування та типу наявної або запланованої районної забудови, враховуючи поточну або майбутню потребу в новій або зміненій організації дорожнього руху на перехресті, світлофорного регулювання, очікуваної інтенсивності руху, габаритів транспортних засобів (конструктивні елементи досліджуваного перехрестя показано на **рис. 1**).

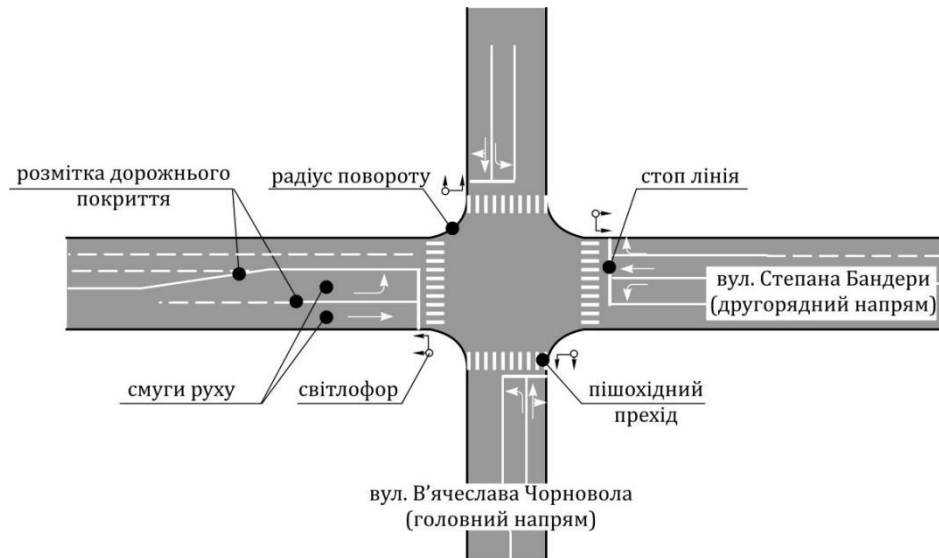


Рис. 1. Основні елементи досліджуваного чотиристороннього перехрестя (м. Рівне)

Організація дорожнього руху на перехресті переважно визначається інтенсивністю руху транспорту через нього. За невеликої інтенсивності руху перехрестя може функціонувати як нерегульоване, а в міру її

збільшення – організація дорожнього руху на перехресті стає можливою лише з використанням світлофорної сигналізації (**рис. 2**).



Рис. 2. Умови використання різних видів організації дорожнього руху на перехрестях [5]

Світлофорне регулювання – це один із заходів, що зазвичай використовується на перехрестях доріг для мінімізації часу в до-

розі та затримок транспортних засобів та/або пішоходів. Світлофорне регулювання на перехрестях дозволяє контролювати рух

транспортних засобів шляхом розподілу часових інтервалів, протягом яких окремі транспортні потоки на кожному під'їзді до перехрестя можуть використовувати наявний дорожній простір [6]. У Рівному керування регульованими перехрестями зі світлофорами здійснюється за допомогою фіксованого часу (всі параметри сигналів заздалегідь розраховуються і підтримуються постійними на основі даних про дорожній рух). Такий метод зазвичай показує хороші результати в нормальних умовах руху, але іноді він не справляється зі складними умовами руху, що змінюються в часі.

З позиції планування системи з фіксованим режимом найчастіше реалізуються як статичні, з постійною довжиною циклу протягом доби, так і динамічні, які враховують нестаціонарність транспортного потоку протягом доби. У динамічних системах добу розбивають на часові інтервали, припускаючи, що для кожного з них окремо транспортні потоки є постійними [7].

Існує три основні поняття, що описують послідовність сигналів світлофора: цикл, фаза і тривалість. *Цикл* – загальний час, необхідний для завершення однієї послідовності сигналів для всіх рухів на перехресті. *Фаза* – одиниця часу контролера,

пов'язана з одним або декількома рухами. *Тривалість* – кількість часу, який сигнал відображається у кожній фазі [8]. Крім того, група транспортного потоку визначається як один або більше сумісних рухів учасників, а кожна фаза має набір часових інтервалів для кожної групи транспортного потоку.

Основною проблемою, яку необхідно вирішити, розглядаючи ізольовані світлофорні перехрестя, є розрахунок та оптимізація сигнального плану, що передбачає: визначення кількості фаз; визначення тривалості циклу; розподіл, тобто визначення частин доступного зеленого часу за кожною фазою; моделювання дорожніх ситуацій, які можуть виникнути через проїзд пріоритетних транспортних засобів, скупчення транспортних засобів у зонах перехрестя в пікові періоди або інших ситуаціях. При цьому необхідно досягти найкращих можливих характеристик перехрестя.

На досліджуваному перехресті перетину автомобільних доріг реалізовано двофазне світлофорне регулювання з фіксованими циклами світлофорного регулювання головного напрямку вул. В'ячеслава Чорновола – 30 с, та другорядного напрямку – вул. Степана Бандери в 30 с (**рис. 3**).

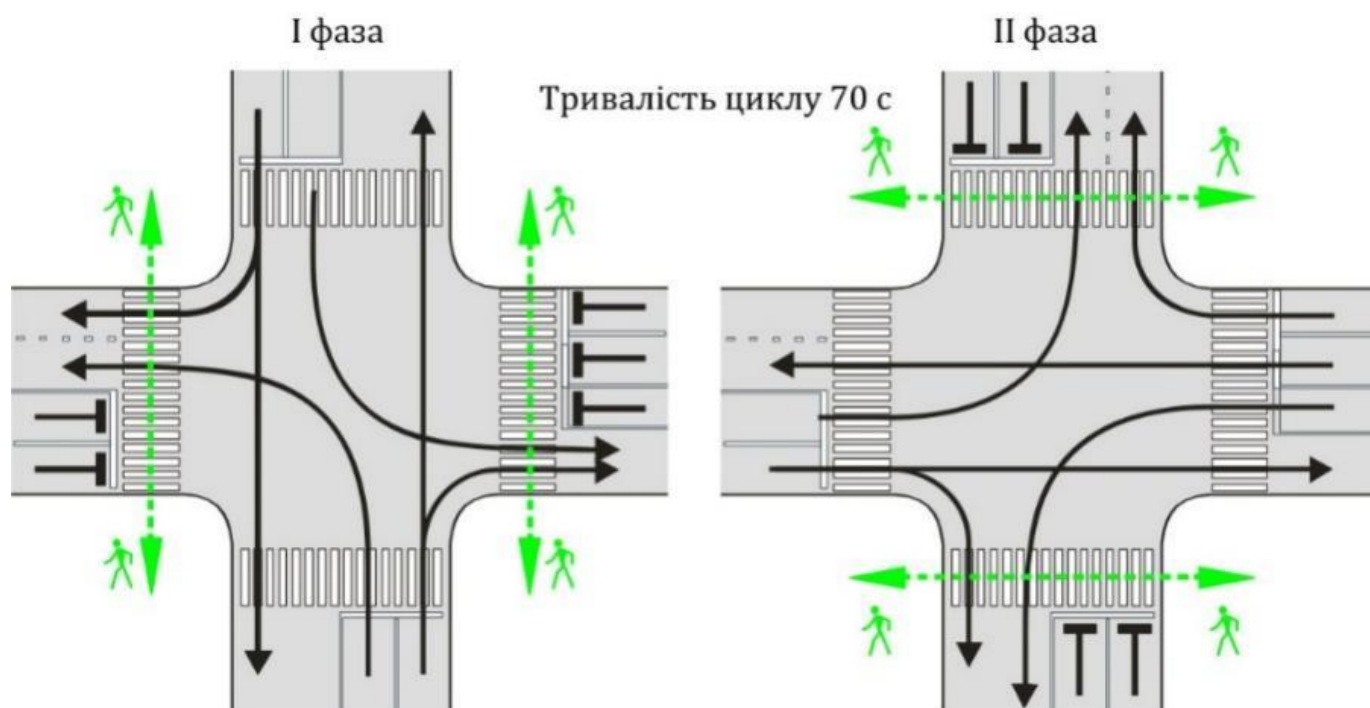
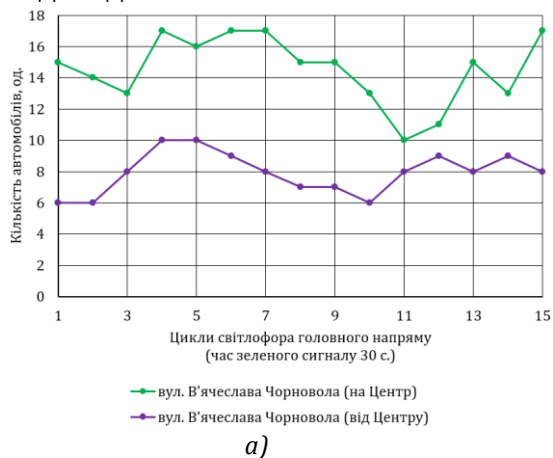


Рис. 3. Світлофорне регулювання перехрестя перетину вул. В'ячеслава Чорновола та вул. Степана Бандери (м. Рівне)

Потік транспортних засобів, які проїжджають перехрестя за один цикл дозвільного сигналу світлофора, нерівномірний, коливається від 17 до 6 автомобілів і залежить



від часового періоду. Найбільша кількість припадає на пікові періоди робочих поїздки (рис. 4).



Рис. 4. Кількість транспортних засобів, які проїжджають перехрестя за один цикл дозвільного сигналу світлофора для головного (а) та другорядного (б) напрямків

Збільшення кількості вантажних автомобілів і автобусів у транспортному потоці супроводжується зменшенням кількості транспортних засобів, які проїхали перехрестя, що пояснюється їх меншою швидкістю руху, більшою витратою часу на початок руху та іншими факторами (рис. 5).

Потік насичення – це потік транспортних засобів із черги перед стоп-лінією, які рушають на дозвільний сигнал світлофора [8]. За своєю суттю він є транспортним по-

током, що існує, коли проїзна частина (смуга руху) функціонує в умовах пропускну здатності.

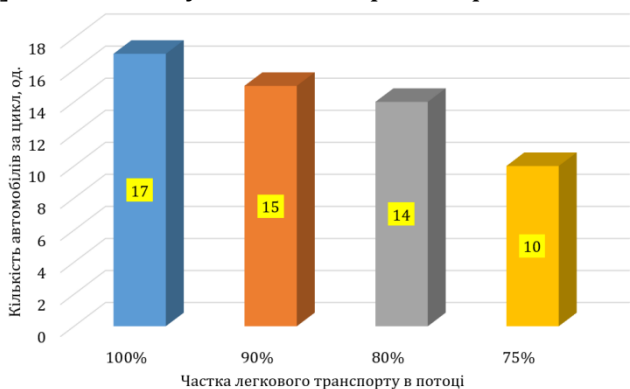


Рис. 5. Пропускна здатність перехрестя за один цикл світлофорного регулювання залежно від складу транспортного потоку

Важливим оціночним показником, який характеризує функціонування перехрестя і залежить насамперед від його геометричних параметрів, є ступінь насичення напрямків руху, тобто максимальної інтенсивності руху транспортних засобів на годину через перехрестя. Середнє значення інтенсивності руху складає 724 автомобілі за теоретично можливого 1200 автомобілів, однак не досягне за існуючими умовами (рис. 6).

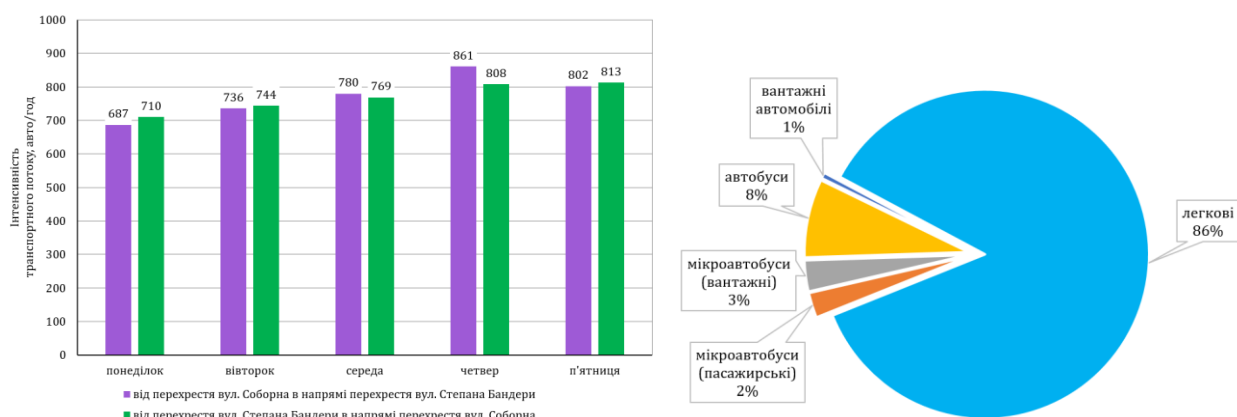


Рис. 6. Структура транспортного потоку головного напрямку – вул. В'ячеслава Чорновола (ранковий період: 8:00-9:00 год.)

Це перехрестя на 60-70% вичерпало пропускну здатність за обраними циклами світлофорного регулювання і потребує їхньої оптимізації, або суттєвих змін в організації дорожнього руху (рис. 7).

Кількість транспортних засобів у черзі впливає на пропускну здатність перехрестя та швидкості потоку. Зокрема, що зі збільшенням черги транспортних засобів до 20 одиниць пропускну здатність смуги зменшується в 1,5-2 рази.

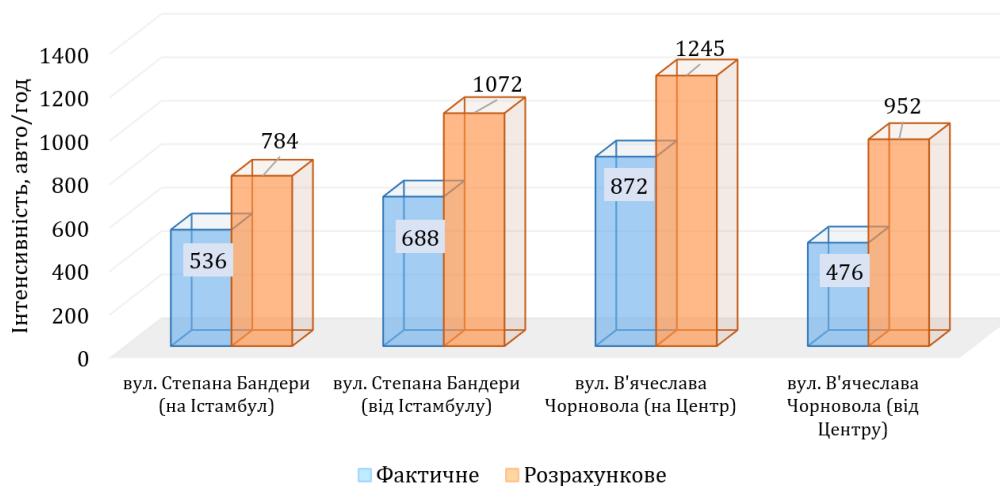


Рис. 7. Фактичне та розрахункове значення потоку транспортного насичення за напрямками (всереднені значення)

За результатами досліджень, змодельовано дорожні умови та здійснено оптимізацію сигнального плану у програмі PTV Vissim. Імітаційне моделювання перехрестя починається з нанесення дорожньої мережі, встановлення світлофорів (контролерів сигналів) з описом характеру роботи (вибір типу світлосигнальних пристроїв, створення сигнальних груп та сигналів світлофорів, внесення параметрів узгодження сигналів), формування пішохідних зон, вузла, здійснення обрахунку з подальшим аналізом отриманих даних.

З метою підвищення ефективності функціонування перехрестя пропонуються два варіанти роботи світлофорних контролерів (рис. 8):

1) подовження «зеленої» фази, для зручності повороту ліворуч (шляхом зменшення на 5 с фази зустрічного руху одного напрямку), загальна тривалість циклу в 70 с не зміниться;

2) додавання третьої фази – повністю пішохідної за всіма напрямками тривалістю 20 с. Загальна тривалість циклу збільшиться до 90 с.

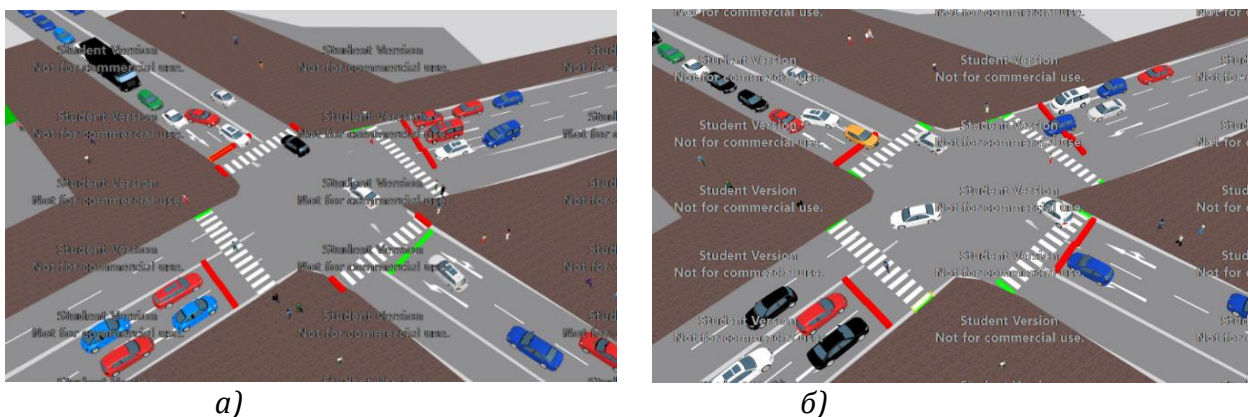


Рис. 8. Варіанти моделювання режимів роботи світлофорного регулювання шляхом подовження «зеленої» фази (а) та реалізації третьої пішохідної фази (б)

Такі зміни викликані тим, що на перехресті досить складно здійснювати лівий поворот. Хоча вибране перехрестя має дві (один напрямок – три) смуги руху, крайня з яких призначена для здійснення лівого повороту, кількість транспортних засобів, які можуть здійснити такий маневр за дозвільний сигнал світлофора все ж таки залишається низькою і в найкращому випадку становить 3-4 машини.

Також на зменшення пропускну здатності перехрестя з частим утворенням заторів впливає близьке розташування (за 500 м) іншого регульованого перехрестя як для головного, так і другорядного напрямку, черга транспортних засобів від яких досить часто досягає вибраного для досліджень перехрестя (рис. 9). Тому саме розрив транспортного потоку одночасно за всіма напрямками буде дієвим заходом, який, наприклад, можна реалізувати в пікові періоди накопичення транспорту.

Більш прогресивним заходом є запровадження адаптивних систем, які базуються на нових технологіях моніторингу дорожнього руху та дозволяють отримувати точні дані про транспортні потоки в реальному часі та здійснювати адаптивне керування світлофорами, тобто адаптацію плану сигналів у реальному часі до змін у транспорт-

них потоках (рис. 10). Програмне рішення, що базується на запропонованому алгоритмі спрощує використання системи, а також потребує значно менших витрат на його впровадження та обслуговування [9].

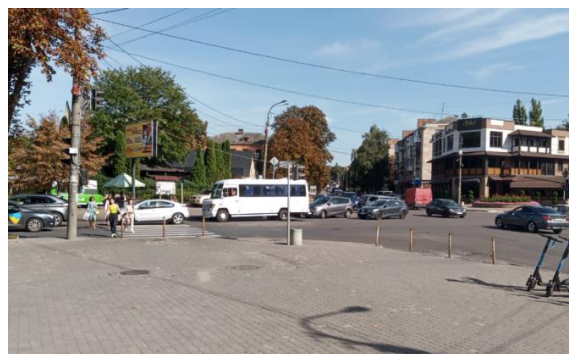


Рис. 9. Утворення затору на перехресті внаслідок значного накопичення транспортних засобів на виході

Однією з головних вимог для успішного розгортання ефективної, в межах усього міста, автоматизованої системи регулювання дорожнього руху є точна оцінка кількості транспортних засобів на дорогах (їхнього обліку можна досягти різними способами, наприклад, використовуючи індуктивні петлі, магнітні датчики або камери).

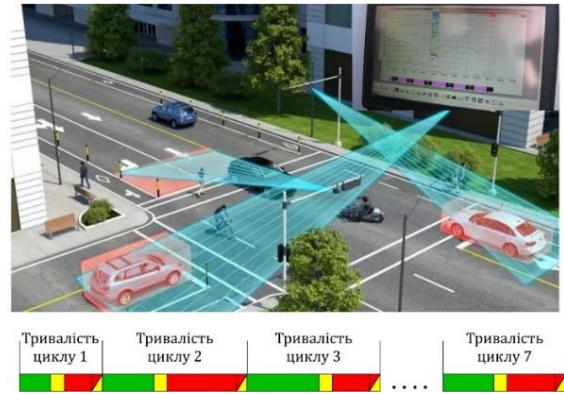


Рис. 10. Адаптивна система світлофорного регулювання

Висновки

Отже, досягнення ефективної роботи світлофорного регулювання проїзду перехрестя передбачає збір та інтерпретацію динамічних параметрів транспортних потоків; усунення або мінімізацію можливості виникнення заторів шляхом зміни тривалості як окремої фази, так і всього циклу роботи світлофора; визначення взаємозв'язку між параметрами черги транспортних засобів, що

виїжджають, та пропускную спроможністю перехрестя.

У разі застосування автоматичної системи отримані динамічні дані про транспортний потік слугуватимуть підґрунтям для побудови алгоритму контрольованого регулювання тривалості дозвільного інтервалу руху на формування черги автомобілів перед перехрестям.

References

1. Radivojević, M., Tanasković, M. & Stević Z. (2021). The adaptive algorithm of a four-way intersection regulated by traffic lights with four phases within a cycle. *Expert Systems with Applications*, Vol. 166, 114073.
2. Khitrov, I. (2023). Modelling of the safe traffic conditions of the inter-section with nearby railway tracks. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, Issue 1, 30-34. DOI: 10.33868/0365-8392-2022-1-273-30-34 [in Ukrainian].
3. National Association of City Transportation Officials. Signal Cycle Lengths. URL: <https://nacto.org/publication/urban-street-design-guide/intersection-design-elements/traffic-signals/signal-cycle-lengths/>.
4. PTV Vissim (2021). Germany. PTV Planning Transport. Verkehr AG.
5. Dziubynska, O. V., Smal, M. V. (2015). Orhanyzatsiia ta bezpeka dorozhnogo rukhu [Traffic organization and safety]. Lutsk: RVV Lutskoho NTU [in Ukrainian].
6. Lee, J., Park, B. (2012). Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), pp. 81–90.
7. Zijun Liang, Xuejuan Zhan, Wei Kong & Yun Xiao. (2023). Space-Time Resource Integrated Optimization Method for Time-of-Day Division at Intersection Based on Multidimensional Traffic Flows. *Journal of Advanced Transportation*, 1-18.
8. Fornalchyk, Ye. Yu., Mohyla, I. A., Trushevskiy V. E. & Hilevych V. V. (2018). Upravlinnia dorozhnim rukhom na reholovanykh perekhrestyakh u mistakh [Traffic management at regulated intersections in cities]. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki [in Ukrainian].
9. Han Zhang, Henry X. Liu, Peng Chen, Guizhen Yu & Yunpeng Wang. (2020). Cycle-Based End of Queue Estimation at Signalized Intersections Using Low-Penetration-Rate Vehicle Trajectories. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21 (8), 3257-3272.