

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ШЕВЧЕНКО ВОЛОДИМИР ВАДИМОВИЧ

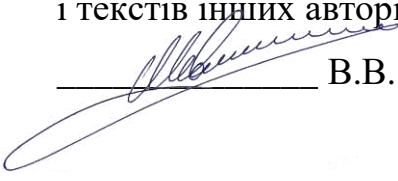
УДК 656.051

ДИСЕРТАЦІЯ  
ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КООРДИНОВАНОГО  
УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА МІСЬКИХ МАГІСТРАЛЯХ

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ: 275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
(НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ)  
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ: 27 ТРАНСПОРТ

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В.В. Шевченко

Науковий керівник: Горбачов Петро Федорович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Шевченко Володимир Вадимович.* Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». – Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ) Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-прикладної задачі визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях (ММ) з розділювальною смугою.

Актуальність роботи визначається необхідністю розвитку функціонуючих у містах України локальних систем світлофорного регулювання, які мають обмежену ефективність. Для визначення найкращого варіанту розвитку був проведений аналіз існуючих підходів до визначення параметрів роботи світлофорних об'єктів (СО) і методів побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів. В результаті було встановлено, що на даний час переконливих вказівок на ефективні напрями координації роботи СО в містах ще не існує, а більшість праць присвячена налаштуванню адаптивних СО на забезпечення ефективної реакції світлофорів на динамічний характер транспортних потоків (ТП), у тому числі в мережах, де функціонує декілька світлофорів на суміжних перехрестях.

Методичні керівництва з організації дорожнього руху (ОДР) різних країн світу в основному пропонують використовувати для створення планів координації (ПК) просторово-часову діаграму (ПЧД) лінійної координації, хоча при цьому визнають її занадто спрощений характер і не надають чітких рекомендацій стосовно особливостей її практичного використання. Іншим варіантом координації є використання створеного на цей час програмного забезпечення (ПЗ) з жорсткої або адаптивної координації, в якому також використовуються спрощені математичні моделі для створення ПК. При цьому, з фінансової точки зору, перехід до координованої

роботи локальних світлофорів у транспортних системах українських міст є найбільш доступним напрямом розвитку світлофорного управління (СУ) рухом.

Це вказало на потребу в удосконаленні існуючих методів формування планів магістральної координації, за рахунок поглибленого врахування головних особливостей процесу координованого руху транспортних засобів (ТЗ), які полягають в їх груповому прибутті з пачки зеленої хвилі (ЗХ) на чергове перехрестя; наявності ТЗ, що доповнюють пачку ЗХ, починаючи з другого перехрестя координованого фрагменту магістралі; і додаткових можливостях налаштування ПК, які забезпечуються наявністю на магістралі розділювальної смуги та світлофорних циклів (СЦ) з виділенням в окрему фазу лівим поворотом.

Розроблена в дослідженні двоетапна процедура створення лінійного ПК дозволила врахувати особливості групового прибуття пачки ЗХ до чергового регульованого перехрестя на ділянці ММ, що координується, і наблизила кінцеве рішення цієї задачі до глобального мінімуму часу очікування можливості проїзду ТЗ через регульоване перехрестя.

Створена в роботі за умови повного роз'їзду черги автомобілів протягом дозвільного сигналу аналітична модель затримок на регульованому перехресті надала можливості визначити граничний рівень завантаження другорядних підходів до ММ з координованим управлінням, який має враховуватися при побудові ПК. За допомогою імітаційного експерименту, вона також дозволила обґрунтувати можливість використання формули затримки Вебстера на другому, емпіричному етапі побудови плану.

Оцінка ймовірності виникнення неповної пачки автомобілів при координованому управлінні на ММ привела до отримання аналітичної залежності, яка збіглась з аналогічною ймовірністю в однолінійній системі масового обслуговування зі стандартною дисципліною обслуговування FIFO (First In First Out) і з показниковим законом розподілу часу обслуговування. Завдяки цьому діапазон застосування залежності шуканої ймовірності від навантаження розширився на регульовані перехрестя, що, внаслідок її зворотного лінійного характеру, дозволило позбавитися обмежень на вибір раціонального розміру пачки і робити його виходячи виключно з

міркувань мінімізації часу затримок учасників руху при поїздках координованим фрагментом ММ.

Об'єктом для вивчення характеристик координованого руху в роботі обраний фрагмент однієї з магістральних вулиць загальноміського значення міста Харкова – просп. Науки, від просп. Незалежності до вул. Мінської, який має розділювальну смугу, достатню довжину і кількість СО. На ньому спостерігається постійно висока інтенсивність руху (ІР) протягом навантаженого денного періоду робочої доби, яка приводить до високого рівня завантаження більшості під'їздів до регульованих перехресть і, відповідно, до значних затримок при його подоланні. Саме для цього випадку, за допомогою розробленого ПЗ, в дослідженні створений ПК роботи світлофорів, ефективність якого оцінювалась трьома різними способами: якісним, за допомогою сервісу Google Maps, методом «тестового автомобіля» і за допомогою сервісу TomTom.

Всі вони переконливо засвідчили перевагу ПК над функціонувавшем до нього локальним варіантом роботи світлофорів на досліджуваному фрагменті просп. Науки. Покращення умов руху вдалося досягти не лише на маршруті руху пачки ЗХ, а й для всіх інших напрямків руху, які його торкаються. При цьому, зростання швидкості поїздок відбулося на фоні значного підвищення ІР ТП, що свідчить про великий позитивний вплив координації роботи світлофорів на пропускну спроможність (ПС) ММ та її значні переваги по зрівнянню з функціонуванням локальних світлофорів в адаптивному режимі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що *вперше*:

- створено новий метод формування плану магістральної координації, який на відміну від існуючих, базується на визначенні загальної тривалості світлофорного циклу на перехрестях, що координуються, на основі вибору раціональної довжини пачки транспортних засобів у зеленій хвилі;
- отримано аналітичну оцінку ймовірності виникнення неповної пачки автомобілів у залежності від рівня завантаження напрямку руху, яка на відміну від існуючих, заснована на стандартних, для світлофорів з постійним циклом, припущеннях.

*Отримали подальший розвиток* методи світлофорного управління транспортними потоками в містах за рахунок визначення критичного навантаження на другорядних підходах до ММ, що координується.

*Удосконалені* методи планування розвитку систем ОДР у містах.

*Практичне значення результатів дослідження* полягає у створенні комп'ютерної програми формування раціонального плану координації на ММ з розділювальною смугою та впровадженні створеного за її допомогою плану на ділянці просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської в місті Харкові.

Ключові слова: дорожній рух; вулично-дорожня мережа; транспортний потік; світлофорний об'єкт; план координації; потік насичення; кількість зупинок.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Горбачов ПФ, Макарічев ОВ, Шевченко ВВ. Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць з трифазним циклом регулювання. Автомобільний транспорт. 2019;44:30-9. doi: [10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30](https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30)
2. Горбачов ПФ, Шевченко ВВ, Свічинський СВ. Визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до міської магістралі з координованим керуванням. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020;90:144-54. doi: [0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144](https://doi.org/0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144)
3. Горбачов ПФ, Макарічев ОВ, Шевченко ВВ. Імовірність виникнення неповної пачки автомобілів при координованому керуванні на міській магістралі. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2021;92(1):214-25. doi: [10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214](https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214)
4. Шевченко ВВ. Обґрунтування ефективного напрямку розвитку систем світлофорного управління з жорсткими циклами регулювання. Вісник машинобудування та транспорту. 2022;2(16):110-9. doi: [10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119](https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119)
5. Шевченко ВВ. Оцінка ефективності плану координації світлофорів на просп. Науки в м. Харкові. Комунальне господарство міст. 2022;6:206-15. doi: [10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215)

6. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі. Патент України на винахід № 122838. 2021 Січ 06.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Шевченко ВВ. Шлях до скорочення затримок транспортних засобів на регульованому перехресті міських вулиць. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. on-line конф. аспірант., мол. уч. та студ. до Дня науки; 2018 Трав 16-18; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2018. с. 77.

8. Горбачов ПФ, Ву Дик Мінь, Шевченко ВВ. Новий підхід до побудови жорстких світлофорних циклів для перехресть міських вулиць. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. on-line конф. аспірант., мол. уч. та студ. до Дня науки; 2019 Трав 15-17; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2018. с. 202-3.

9. Горбачов ПФ, Шевченко ВВ. Підхід до побудови плану координації для міської магістралі. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. освіти і мол. уч, присвячена Дню науки,; 2020 Трав 11-15; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка»; 2020. с. 20.

10. Шевченко ВВ. Координація роботи локальних світлофорів і розвиток систем управління дорожнім рухом. В: Матеріали V Всеукр. наук.-теор. on-line конф. Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання; 2023 Бер 23-24; Львів. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2023. с. 47-9.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Горбачов ПФ, Ву Дик Мінь, Шевченко ВВ. Новий підхід до побудови жорстких світлофорних циклів для перехресть міських вулиць. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України № 88689. 2019 Трав 20.

12. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі. Патент України на корисну модель № 137438. 2019 Жов 25.

13. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі міста. Патент України на корисну модель № 137517. 2019 Жов 25.

14. Горбачов ПФ, Тесленко МГ, Шевченко ВВ. Комп'ютерна програма «Програма для розрахунків параметрів координованого керування світлофорами на міській магістралі» («Wave»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України №116545. 2023 Лют 23.

## SUMMARY

*Shevchenko Volodymyr Vadymovych.* Determination of rational parameters of progressive traffic control on urban highways. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining the degree of doctor of philosophy in the specialty 275 – Transport Technologies (by Automobile Transport). – Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and applied problem of determining the rational parameters of coordinated traffic control on city highways with a median strip.

For this purpose, an analysis of existing approaches to determining the parameters of the operation of traffic lights and methods of building plans for trunk and network coordination of traffic lights was carried out. As a result, it was established that at this time there are no clear instructions on effective directions for the development of traffic light coordination systems in cities, and the majority of works are devoted to the adjustment of adaptive traffic light objects to ensure an adequate reaction of traffic lights to the dynamic nature of traffic flows, including in networks, where local traffic lights operate at adjacent intersections with pre-timed cycles. Road traffic control guidelines of various countries suggest using a space-time diagram of linear coordination to create coordination plans, although they recognize its oversimplified nature and do not provide clear recom-

mendations regarding the specifics of its practical use. Another option for coordination is to use existing hard or adaptive coordination software, which also use simplified models to create coordination plans. At the same time, the transition to the coordinated operation of traffic lights in the transport systems of Ukrainian cities is the most accessible direction for the development of traffic light control.

This indicated the need for the creation of a new method of forming highway coordination plans, which should take into account the peculiarities of this process, which consist in the group arrival of vehicles from the green wave pack to the next intersection, the presence of vehicles that complement the green wave pack starting from the second intersection sections and additional possibilities in setting up the coordination plan, which ensure the presence of a separate lane on the section and traffic light cycles of cycles with a left turn allocated in a separate phase.

The two-stage procedure for creating a coordination plan on an urban highway developed in the study takes into account the peculiarities of the group arrival of a green wave packet to the next regulated intersection on the coordinated urban highway section and allows to bring the final solution of this problem closer to the global minimum of the waiting time for the possibility of passing through the regulated intersection.

An analytical model of delays at a controlled intersection, created in the work under the condition of full departure of the queue of cars during the permission signal, allowed to determine the limiting level of loading of the secondary approaches to the city highway with coordinated control, which should be used in the construction of the coordination plan. With the help of a simulation experiment, it also allowed to substantiate the possibility of using Webster's delay formula at the first, analytical stage of plan construction.

The estimation of the probability of the occurrence of an incomplete pack of cars under coordinated control on an urban highway led to an analytical dependence that coincided with a similar probability in a standard single-line mass service system with a standard FIFO service discipline and with an exponential service time distribution law. Thanks to this, the dependence of the desired probability on the load expanded the range of application to adjustable traffic lights and, due to its inverse linear nature, made it pos-

sible to get rid of restrictions on the choice of the size of the bundle and to do it based solely on the considerations of minimizing the delay time of traffic participants when overcoming a coordinated section of the city highway.

A fragment of one of the central thoroughfares of the city of Kharkiv, avenue Sciences, from Nezalezhnosti Ave. to Minskaya St., which has a dividing strip, sufficient length and number of traffic lights. On it, there is a constantly high traffic intensity during the busy daytime period of the working day, which leads to a high level of loading of most approaches to regulated intersections and, accordingly, to significant delays when crossing it. Precisely for this case, with the help of the developed software, the study created a traffic light coordination plan, the effectiveness of which was evaluated in three different ways: qualitatively, using the Google Maps service, the "floating car" method, and using the TomTom service.

All of them convincingly testified to the superiority of the coordination plan over the local version of the operation of the traffic lights on the studied section of the avenue that functioned before it. Sciences. It was possible to improve traffic conditions not only on the route of the green wave bundle, but also for all other traffic directions that touch it. At the same time, the increase in the speed of trips took place against the background of a significant increase in the intensity of traffic flows, which indicates a great positive effect of the coordination of traffic lights on the capacity of the city highway and its significant advantages compared to the operation of local traffic lights in adaptive mode.

The scientific novelty of the obtained results is that for the first time:

- a new method of forming a highway coordination plan was created, which, unlike the existing ones, is based on determining the total duration of the traffic light cycle at coordinated intersections, based on the task of the rational length of a group of vehicles in a green wave;

- an analytical estimate of the probability of the occurrence of an incomplete pack of cars depending on the load level of the traffic direction was obtained, which, unlike the existing ones, is based on the standard assumption for traffic lights with a constant cycle.

Methods of traffic light management in cities were further developed.

The practical significance of the research results lies in the creation of a program for the formation of a rational plan of coordination on the city highway with a dividing strip and the implementation of the plan created with its help on the section of Ave. Sciences from Ave. Nezalezhnosti to St. of Minsk in the city of Kharkiv.

Keywords: road traffic, street-road network; city highway; traffic light object; coordination plan; delay time; number of stops.

#### List of candidate's publications

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Horbachov PF, Makarichev OV, Shevchenko VV. Otsinka zatrymok rukhu na rehulovanykh perekhrestyakh miskykh vulyts z tryfaznym tsyklom rehuliuвання [Estimation of delays on signalized intersections of urban streets with a three-phase signal]. Avtomobilnyi transport. 2019;44:30-9. doi: [10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30](https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30)
2. Horbachov PF, Shevchenko VV, Svichynskyi SV. Vyznachennia hranychnoho rivnia zavantazhennia druhoriadnykh pidkhodiv do miskoi mahistrali z koordynovanyim keruvanniam. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu. 2020;90:144-54. doi: [0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144](https://doi.org/0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144)
3. Horbachov PF, Makarichev OV, Shevchenko VV. Imovirnist vynyknennia nepovnoi pachky avtomobiliv pry koordynovanomu keruvanni na miskii mahistrali [Potential for incomplete bunching under the city's highway coordinated traffic management]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu. 2021;92(1):214-25. doi: [10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214](https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214)
4. Shevchenko VV. Obhruntuvannia efektyvnoho napriamu rozvytku system svitlofornoho upravlinnia z zhorstkymy tsyklamy rehuliuвання [Justification of effective direction to develop control systems of traffic lights with fixed cycles]. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu. 2022;2(16):110-9. doi: [10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119](https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119)
5. Shevchenko VV. Otsinka efektyvnosti planu koordynatsii svitloforiv na prosp. Nauky v m. Kharkovi [Evaluation of the effectiveness of the traffic light coordina-

tion plan on Nauki Avenue in Kharkiv]. Komunalne hospodarstvo mist. 2022;6:206-15. doi: [10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215)

6. Denysenko OV, Shevchenko VV, vynakhidnyky; Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet, Denysenko OV, Shevchenko VV, patentovlasnyky. Sposib koordynovanoho upravlinnia rukhu transportnykh zasobiv po mahistrali [Method of coordinated control of the movement of vehicles on the highway.]. Patent Ukrainy na vynakhid № 122838. 2021 Jan 06.

Scientific works certifying the approval of the dissertation materials:

7. Shevchenko VV. Shliakh do skorochennia zatrymok transportnykh zasobiv na rehulovanomu perekhresti miskykh vulyts [A way to reduce vehicle delays at a controlled intersection of city streets]. V: Materialy Vseukr. nauk.-prakt. on-line konf. aspirant., mol. uch. ta stud. do Dnia nauky; 2018 Trav 16-18; Zhytomyr. Zhytomyr: DU «Zhytomyrska politekhnika», 2018. s. 77.

8. Horbachov PF, Vu Dyk Min, Shevchenko VV. Novyi pidkhid do pobudovy zhorstkykh svitlofornykh tsykliv dlia perekhrest miskykh vulyts [Analytical assessment of the vehicles' delay at the signalized intersection of urban streets]. V: Materialy Vseukr. nauk.-prakt. on-line konf. aspirant., mol. uch. ta stud. do Dnia nauky; 2019 Trav 15-17; Zhytomyr. Zhytomyr: DU «Zhytomyrska politekhnika», 2019. s. 202-3.

9. Horbachov PF, Shevchenko VV. Pidkhid do pobudovy planu koordynatsii dlia miskoi mahistrali [An approach to building a coordination plan for an urban highway]. V: Materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. zdobuv. vyshch. osvity i mol. uch, prysviachena Dniu nauky,; 2020 Trav 11-15; Zhytomyr. Zhytomyr: DU «Zhytomyrska politekhnika»; 2020. s. 20.

10. Shevchenko VV. Koordynatsiia roboty lokalnykh svitloforiv i rozvytok system upravlinnia dorozhnim rukhom [Coordination of local traffic lights and development of traffic control systems.]. V: Materialy V Vseukr. nauk.-teor. on-line konf. Problemy z transportnymi potokamy i napriamy yikh rozviazannia; 2023 Ber 23-24; Lviv. Lviv: NU «Lvivska politekhnika», 2023. s. 47-9.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

11. Horbachov PF, Vu Dyk Min, Shevchenko VV. Novyi pidkhid do pobudovy zhorstkykh svitlofornykh tsykliv dlia perekhrest miskykh vulyts [A new approach to develop pre-timed signal cycles for urban intersections]. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir Ukrainy № 88689. 2019 Trav 20.
12. Denysenko OV, Shevchenko VV, vynakhidnyky; Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet, Denysenko OV, Shevchenko VV, patentovlasnyky. Sposib koordynovanoho upravlinnia rukhu transportnykh zasobiv po mahistrali [Method of coordinated control of the movement of vehicles on the highway]. Patent Ukrainy na korysnu model № 137438. 2019 Zhov 25.
13. Denysenko OV, Shevchenko VV, vynakhidnyky; Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet, Denysenko OV, Shevchenko VV, patentovlasnyky. Sposib koordynovanoho upravlinnia rukhu transportnykh zasobiv po mahistrali mista [Method of coordinated traffic management along the city highway]. Patent Ukrainy na korysnu model № 137517. 2019 Zhov 25.
14. Horbachov PF, Teslenko MH, Shevchenko VV. Komp'uterna prohrama «Prohrama dlia rozrakhunkiv parametriv koordynovanoho keruvannia svitloforamy na miskii mahistrali» («Wave») [Computer program «Program for calculating the parameters of coordinated control of traffic lights on the city highway (Wave)»]. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir Ukrainy №116545. 2023 Liut 23.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Перелік умовних скорочень .....                                                                                                                            | 15  |
| Вступ .....                                                                                                                                                | 16  |
| Розділ 1 Сучасний стан і проблеми світлофорного управління транспортними потоками в містах .....                                                           | 21  |
| 1.1 Огляд сучасних підходів до визначення параметрів роботи світлофорних об'єктів.....                                                                     | 23  |
| 1.2 Аналіз існуючих методів побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів.....                                                        | 34  |
| 1.3 Обґрунтування мети та постановка задач дослідження .....                                                                                               | 50  |
| Висновки по першому розділу .....                                                                                                                          | 56  |
| Розділ 2 Теоретичні основи формування методу координованого управління рухом транспортних засобів на міських магістралях.....                              | 59  |
| 2.1 Обґрунтування методу формування плану магістральної координації.....                                                                                   | 59  |
| 2.2 Аналітичне моделювання часу затримки транспортних засобів на ізольованому регульованому перехресті міських вулиць з трифазним циклом регулювання ..... | 69  |
| 2.3 Оцінка ймовірності виникнення неповної пачки транспортних засобів при координованому управлінні на міській магістралі .....                            | 79  |
| Висновки по другому розділу .....                                                                                                                          | 95  |
| Розділ 3 Експериментальні дослідження умов руху транспортних потоків на ділянці міської магістралі з розділювальною смугою .....                           | 97  |
| 3.1 Характеристика об'єкта проведення експериментальних досліджень та параметрів транспортного процесу на ньому.....                                       | 97  |
| 3.2 Оцінка часу затримки транспортних засобів на ізольованому перехресті зі світлофорним регулюванням .....                                                | 106 |
| 3.3 Експериментальне визначення граничного рівня завантаження для другорядних підходів до міської магістралі з координованим управлінням.....              | 112 |
| Висновки по третьому розділу .....                                                                                                                         | 116 |

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Розділ 4 Розробка практичних рекомендацій щодо координованого управління рухом на міській магістралі.....                                                                                            | 118 |
| 4.1 Розробка плану координації роботи світлофорів на ділянці просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінською.....                                                                              | 118 |
| 4.2 Оцінка ефективності розробленого плану координації та розробка практичних рекомендацій щодо подальшого використання результатів дослідження .....                                                | 125 |
| Висновки по четвертому розділу .....                                                                                                                                                                 | 154 |
| Висновки.....                                                                                                                                                                                        | 157 |
| Список використаних джерел .....                                                                                                                                                                     | 159 |
| Додаток А Параметри технічних засобів організації дорожнього руху, розташованих на перехрестях ділянки просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської, до впровадження плану координації..... | 159 |
| Додаток Б Результати обстеження інтенсивності руху транспортних потоків на перехрестях ділянки просп. Науки, що координується.....                                                                   | 200 |
| Додаток В Параметри роботи в плані координації світлофорних об'єктів, розташованих на ділянці просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської.....                                             | 210 |
| Додаток Г Результати поїздок плаваючого автомобілю по ділянці просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінської до та після впровадження плану координації.....                                  | 217 |
| Додаток Д Акти впровадження результатів дослідження.....                                                                                                                                             | 219 |
| Додаток Е Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації .....                                                                                              | 222 |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

|       |   |                                                            |
|-------|---|------------------------------------------------------------|
| НСМ   | – | Highway Capacity Manual                                    |
| ВДМ   | – | вулично-дорожня мережа                                     |
| ЗХ    | – | зелена хвиля                                               |
| ІР    | – | інтенсивність руху                                         |
| ЛП    | – | лівий поворот                                              |
| ММ    | – | міська магістраль (що координується)                       |
| ОДР   | – | організація дорожнього руху                                |
| ОТ    | – | основний такт світлофорного циклу                          |
| ПДР   | – | Правила дорожнього руху                                    |
| ПЗ    | – | програмне забезпечення                                     |
| ПК    | – | план координації                                           |
| ПТА   | – | поїздка тестового автомобіля                               |
| ПС    | – | пропускна спроможність                                     |
| ПЧД   | – | просторово-часова діаграма координації                     |
| СО    | – | світлофорний об'єкт                                        |
| СУ    | – | світлофорне управління                                     |
| СЦ    | – | цикл світлофорного регулювання (світлофорний цикл)         |
| ТЗ    | – | транспортний засіб                                         |
| ТП    | – | транспортний потік                                         |
| ХНАДУ | – | Харківський національний автомобільно-дорожній університет |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вибір найбільш ефективного напрямку розвитку існуючих систем ОДР є важливим питанням не лише для українських міст, а й для міст багатьох інших країн світу, що розвиваються. Технічною базою такого розвитку зазвичай являються локальні СО з жорсткими СЦ, які є найбільш доступним засобом розподілу у часі конфліктуючих транспортних і пішохідних потоків на перетинах вулиць і доріг в одному рівні. У містах розвинених країн, які вже подолали цей перехід, застосовуються дві різні альтернативи для цього розвитку: координоване СУ та адаптивні системи управління СО. Ці альтернативи не є взаємовиключними та можуть застосовуватися сумісно, що й робиться у багатьох випадках у розвинених країнах світу.

Паралельна робота транспортних систем різних міст з адаптивними СО у координованому та некоординованому режимах свідчить про приблизно рівну ефективність цих альтернатив і залишає країни, що розвиваються, без відповіді на питання чи доцільним є створення жорстких ПК на фрагментах вулично-дорожньої мережі (ВДМ) у містах. Для того, щоб відповісти на це актуальне питання, необхідне створення нового, ефективного методу розробки жорсткого ПК, який враховує об'єктивні властивості процесу координованого руху ТП на міських магістралях (ММ) і дозволить з'ясувати реальну результативність цього процесу з точки зору якості обслуговування учасників дорожнього руху.

Таким чином, створення нового методу формування жорсткого ПК та його практична реалізація на ММ є актуальним завданням, рішення якого створить основу для ефективного управління розвитком і підвищення якості функціонування міських систем ОДР у багатьох містах з локальними СО.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Завдання створення нового методу координації роботи локальних СО на міській магістралі відповідає Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. №

430-р; Стратегії підвищення безпеки дорожнього руху в Україні до 2024 року схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 р. № 1360-р; Державній програмі підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2023, схваленої постановою Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 р. № 1360-р; Регіональній Програмі підвищення рівня безпеки дорожнього руху на території Харківської області на період до 2023 року затвердженої рішенням Харківської обласної ради від 21 грудня 2021 року № 328-VIII; Програмі підвищення безпеки дорожнього руху в місті Харкові на 2021-2025 роки, затвердженої рішенням Харківської міської ради від 19.08.2020 №2286/20.

Запропоновані в роботі методики були використані під час виконання наступних науково-дослідницьких робіт (НДР): методика збору вихідних даних для визначення параметрів координованої роботи світлофорів була використана при виконанні НДР «Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька», № держреєстрації 0117U006848, методика створення ПК була використана при виконанні НДР «Розроблення схеми координації світлофорів на просп. Науки», № держреєстрації 0121U113663.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка методу визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на перехрестях магістральних вулиць з жорстким циклом світлофорного регулювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих методів визначення параметрів роботи СО і побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів;
- розробити метод формування плану магістральної координації;
- отримати аналітичні та експериментальні оцінки параметрів, необхідних для реалізації цього методу;
- створити за допомогою нового методу раціональний ПК роботи СО для реального об'єкта та реалізувати його на практиці;
- оцінити ефективність створеного плану та розробити практичні рекомендації щодо координації роботи СО з жорсткими циклами на ММ.

**Об'єкт дослідження** – процес організації та регулювання дорожнього руху

на магістральних вулицях.

**Предмет дослідження** – раціональні параметри координованого управління дорожнім рухом на перехрестях магістральних вулиць з жорстким циклом світлофорного регулювання.

**Методи дослідження.** При визначенні параметрів функціонування просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської у місті Харків були застосовані спостереження і вимірювання. Залежності часу затримки ТЗ на ізольованому регульованому перехресті міських вулиць та ймовірності виникнення неповної пачки ТЗ при координованому управлінні на ММ отримані з використанням методів теорій ймовірності й масового обслуговування. Новий метод створення ПК був розроблений з використанням аналізу, формалізації, гіпотетичного та індуктивного методів. Граничний рівень завантаження другорядних підходів до ММ з координованим управлінням визначався за допомогою імітаційного моделювання в програмі PTV® VISSIM. Обробка результатів експериментів проводилась із застосуванням регресійного аналізу. При оцінці ефективності ПК використовувались показники з математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що *вперше*:

- створено новий метод формування плану магістральної координації, який на відміну від існуючих, базується на визначенні загальної тривалості світлофорного циклу на перехрестях, що координуються, на основі вибору раціональної довжини пачки транспортних засобів у зеленій хвилі;
- отримано аналітичну оцінку ймовірності виникнення неповної пачки автомобілів у залежності від рівня завантаження напрямку руху, яка на відміну від існуючих, заснована на стандартних, для світлофорів з постійним циклом, припущеннях.

*Отримали подальший розвиток* методи світлофорного управління транспортними потоками в містах за рахунок визначення критичного навантаження на другорядних підходах до ММ, що координується.

*Удосконалені* методи планування розвитку систем ОДР у містах.

**Практичне значення результатів дослідження** полягає у створенні програ-

ми формування раціонального ПК на ММ з розділювальною смугою та впровадженні створеного за її допомогою плану на ділянці просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської у місті Харкові. Отримані у результаті дослідження нові знання та методи були використані в освітньому процесі студентів факультету транспортних систем ХНАДУ.

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно та наведені у роботах [1-14]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: проаналізовано існуючий стан питання оцінки часу затримки ТЗ на регульованих перехрестях [1], сучасні методи координації роботи СО [2] та аналітичні моделі довжини черги перед регульованим перехрестям [3]; створена імітаційна модель функціонування СО з трифазним СЦ і проведено експеримент з визначення затримки ТЗ на перехресті [1]; проведено імітаційний експеримент з визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до ММ з координованим управлінням [2]; формалізовані умови функціонування регульованого перехрестя [3]; проведено оцінку можливостей покращення умов руху в ПК за рахунок сканування лазерними променями кожного координованого перегону та визначення на цій основі середньої швидкості руху ТЗ, їх кількості у пачці та інтервалів руху, за якими корегується графік магістральної координації [6, 12, 13]; запропонований диференційований підхід до визначення плану роботи світлофорів з жорстким циклом [8, 11]; описаний підхід до побудови плану координації для міської магістралі [9]; проведено тестування програми «Wave» та надані рекомендації щодо покращення її функціоналу [14].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали й результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

- 83-87-й науково-технічних та науково-методичних конференціях ХНАДУ (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), 2019-2023 рр.);

- I міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт та інфраструктура» (м. Київ, НУБіП України, 2018 рік);

- Всеукраїнській науково-практичній Інтернет конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених присвяченій дню науки, (м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка», 2018-2020 роки);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», (м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 2018 рік);
- Науково-практичній on-line конференція з нагоди 90-річчя ДП «Державто-трансНДІпроект» «Наукове забезпечення розвитку автомобільного транспорту та його інтеграції до європейської транспортної системи», (м. Київ, ДП «Державтот-трансНДІпроект», 2020 рік);
- V Всеукраїнській науково-теоретичній on-line конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання», Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 2023 рік.

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 5 наукових статей у наукових фахових виданнях України і 1 патент на винахід, а також 4 тези доповідей у збірниках матеріалів вітчизняних конференцій, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір науково-практичного характеру, 2 патенти на корисні моделі, що відповідають профілю дисертації і 1 свідоцтво про реєстрацію авторського та суміжного права на комп'ютерну програму.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 224 сторінки, дисертація містить 29 рисунків та 28 таблиць, 6 додатків на 45 сторінках, список використаних джерел включає 190 найменувань, розміщених на 22 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ СВІТЛОФОРНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ В МІСТАХ

Проблема розподілу у часі конфліктуючих транспортних і пішохідних потоків є дуже поширеною по всьому світу та досі не має свого до кінця обґрунтованого й зрозумілого для практиків рішення навіть якщо приймати до уваги лише ТП. Вона стає особливо актуальною у містах, для яких характерною є висока ІР на багатьох ділянках ВДМ, а зробити всі перетини різних напрямків руху його учасників безперешкодними неможливо. Існують два основних метода розділення в часі транспортних і пішохідних потоків – надання пріоритетів кожному з них за допомогою Правил дорожнього руху (ПДР) або почергове надання права перетину конфліктного простору за допомогою світлофорів, який є більш застосованим у містах. Базовим варіантом СУ є жорстке регулювання руху за заздалегідь визначеними параметрами, яке є найбільш розповсюдженим в Україні та являється базою для розвитку більш досконалих методів управління рухом.

Основними параметрами жорсткого управління, які необхідно визначити при організації роботи СО є:

- кількість і тривалість основних тактів (ОТ) у СЦ;
- тривалість циклу;
- тривалість проміжних тактів.

У випадку координованої роботи декількох СО до цих параметрів додається відносний час початку циклу, тобто його зсув відносно початку циклу світлофору, прийнятого як базовий, з нульовим зсувом.

Питання визначення раціональних значень цих параметрів є на цей час не до кінця вирішеними та наукова робота над розвитком нових методик СУ ще активно продовжується із застосуванням різноманітних підходів, аналіз яких є головною задачею цього розділу. У цьому напрямі можна виділити два конкуруючих варіанти розвитку систем СУ на базі жорсткого регулювання: адаптивне та координоване

управління.

У першому випадку СО обладнуються датчиками руху ТЗ і програмами, які реагують на поточну транспортну ситуацію на перехресті. Адаптивне СУ безумовно є більш корисним на ізольованих перехрестях з випадковим прибуттям учасників руху до нього, по зрівнянню з жорстким регулюванням руху, і тут постає лише одне питання – високої вартості оснащення СО відповідним обладнанням.

Але в містах далеко не всі СО можуть вважатися ізольованими і може стати так, що скоординована робота декількох суміжних світлофорів буде більш ефективною з точки зору часу подолання відповідного фрагменту ВДМ, що, в першу чергу, стосується ділянок ММ. Вартість налаштування на сумісну роботу декількох СО є дуже скромною та навіть у локальному режимі роботи світлофорів може складатися лише з вартості GPS синхронізаторів, а результатом може стати значне скорочення часу очікування можливості подолання кожного чергового перехрестя та часу слідування взагалі.

Більше 50 років тому вчені вже намагалися надати відповідь на питання, щодо ефективності цих конкуруючих векторів розвитку та висловились на користь першочергового налаштування СО на координовану роботу. Так, досвід канадського міста Торонто [15] свідчить, що в умовах централізованої системи управління СО міста, найбільше скорочення часу поїздки досягається за рахунок жорсткої координації роботи світлофорів. Аналогічні дослідження, проведені у Глазго [16] показали, що координована схема управління зменшила середній час у дорозі на 12 %. Але на цей час згадані дослідження мало відомі та переважним вважається шлях розвитку адаптивних систем ОДР міст. У той же час, для сучасних умов функціонування систем ОДР в українських містах, з переважною більшістю жорстких СО, які функціонують у локальному режимі, необхідно повернутися до питання перспективності альтернативних шляхів розвитку цих систем – адаптованого чи координованого СУ. При цьому очевидно, що перехід на адаптивне управління можливий й на скоординованих СО та потенційно може тут бути навіть більш ефективним, ніж у локальному випадку.

## 1.1 Огляд сучасних підходів до визначення параметрів роботи світлофорних об'єктів

У сучасній практиці визначення параметрів роботи СО існує достатньо велика кількість досліджень, яка постійно зростає [16]. У цих дослідженнях можна виділити три основних підходи до вирішення поставлених задач у сфері СУ: розробка аналітичних моделей, використання засобів мікросимуляції об'єктів управління і розробка моделей на основі обчислювального інтелекту, рис. 1.1.

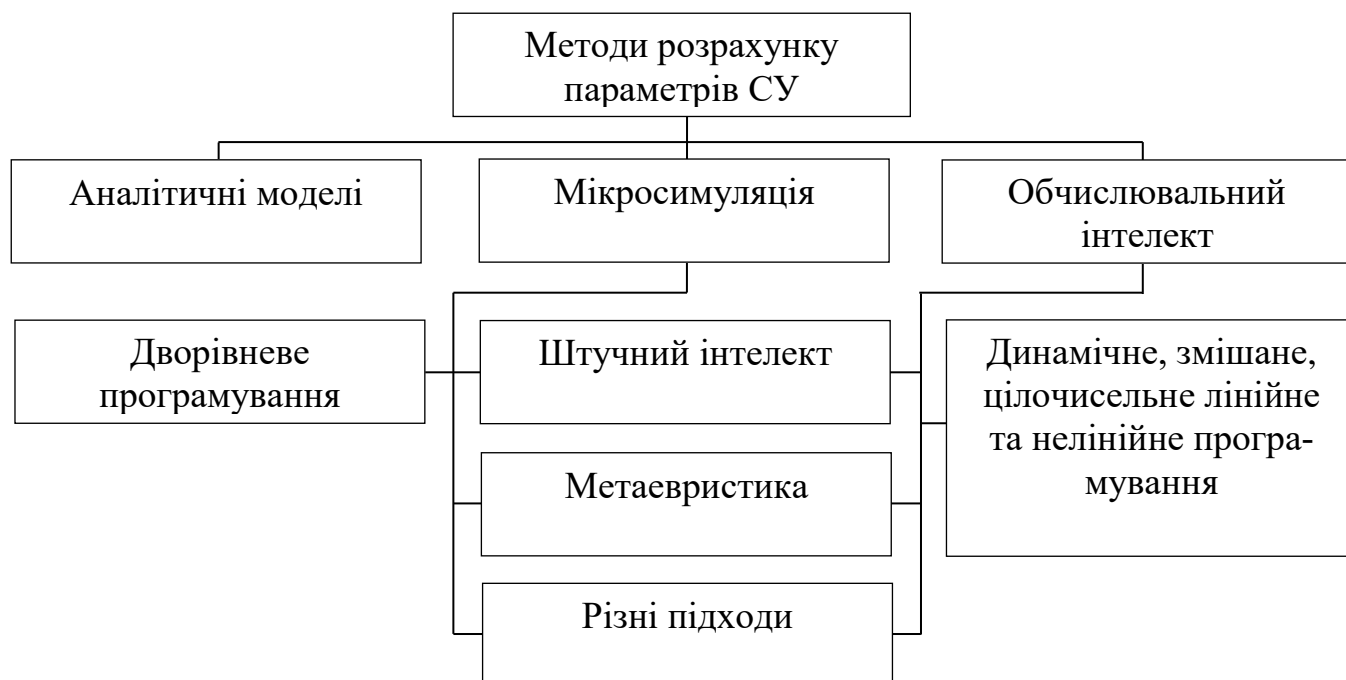


Рисунок 1.1 – Класифікація методів розрахунку параметрів СУ

Нові підходи до визначення параметрів СУ отримали свій початок ще в першій половині двадцятого століття, але до 50-х років вони мали в основному емпіричний або апіорний характер, за виключенням роботи Адамса [17], де він запропонував залежність для оцінки довжини черги перед світлофором, ґрунтуючись на припущенні про рівномірний розподіл інтервалів між тими ТЗ, що прибувають до перехрестя. Після цього, більшість перших спроб розрахувати основні характеристики роботи СО відносяться до аналітичного моделювання.

Використовуючи аналогічне з Адамсом припущення, в 1941 році Клейтон зробив першу залежність для часу затримки [19], яка була повторена практично у тому ж вигляді в роботі Вордроба [20], автор якої відзначив виключну складність питань розрахунку параметрів роботи світлофорів. Продовженням пошуків аналітичної залежності для часу затримки ТЗ на світлофорах стали роботи [21] і [22], які однак не привели до очікуваних результатів.

Апогеем пошуків залежності для часу затримки або довжини черги перед перехрестям стала робота Вебстера [23], автор якої експериментальним шляхом, за допомогою імітаційного моделювання, отримав залежність часу затримки ТЗ від параметрів СЦ та рівня завантаження напрямку руху:

$$t_d = \frac{T \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot \rho)} + \frac{\rho^2}{2 \cdot q \cdot (1 - \rho)} - 0,65 \cdot \left( \frac{T}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho^{(2+5\lambda)}, \quad (1.1)$$

де  $t_d$  – середня затримка одного ТЗ на окремому під'їзді до перехрестя, с;

$T$  – тривалість СЦ, с;

$\lambda$  – частка зеленого сигналу для даного напрямку руху у СЦ,  $\lambda = \frac{T_p}{T}$ ;

$T_p$  – тривалість фази, що дозволяє рух, для обраного напрямку у СЦ, с;

$q$  – інтенсивність ТП в даному напрямку руху, с<sup>-1</sup>;

$\rho$  – рівень завантаження смуги руху на перехресті.

Перший доданок у формулі (1.1) називається рівномірною затримкою, другий – переповнюванням, третій – має коригувальний характер і зазвичай замінюється множником 0,9 перед двома першими доданками.

Формула Вебстера і досі є основою всіх залежностей, які тиражуються в діючих нормативних документах з транспортного планування, головним з яких є Highway Capacity Manual (HCM) [24].

Не вірним буде стверджувати, що робота Вебстера зупинила пошук аналітичних залежностей для основних параметрів роботи СО. Вони були продовжені відомими математиками Ньюелом [25], Даррошом [26] і багатьма іншими авторами.

Пошук обґрунтованих і зрозумілих моделей продовжується і до теперішнього часу [27]. Перелік наукових робіт у цьому напрямі є дуже великим і вимірюється сотнями, але задача даного розділу є більш широкою ніж аналіз залежностей часу затримки ТЗ на світлофорі або довжини черги. СУ ТП у містах передбачає більше, ніж налаштування одиночних СО з випадковим прибуттям ТЗ до них. Тут дуже важливою є взаємодія СО, з урахуванням якої складність завдань дуже критичне.

Це призводить до того, що частка аналітичних залежностей в останні роки помітно скоротилася і складає лише 2,77 % робіт, присвячених питанням організації світлофорного регулювання ТП у містах за даними огляду [16]. Результатами пошуку за 2015-2020 рр. загалом стали 6 робіт [28-33] з використанням аналітичних підходів. Автори огляду [16] вважають, що аналітичні моделі корисні для розуміння проблеми, але отримати позитивні результати за їх допомогою дуже важко з двох причин: або внаслідок великої кількості взаємодій, які необхідно включити в модель, або внаслідок занадто значного часу, необхідного для вирішення задачі. Тому вони роблять висновок про недоцільність використання цих аналітичних моделей. Такий висновок виглядає занадто категоричним і продовження пошуку відповідних аналітичних моделей, які сприятимуть вирішенню питань при проведенні транспортного моделювання та планування є необхідним й доцільним. До цього слід додати той факт, що лише використання аналітичних залежностей надає можливостей щодо повного та глибокого розуміння процесів, які протікають у будь-якому об'єкті дослідження. Інші, не аналітичні підходи в змозі створити діючі інструменти вирішення деяких питань планування роботи СО, але вони далеко не гарантують загальність отриманих рішень і не надають цілком зрозумілого пояснення сутності процесів, які відбуваються в транспортних системах.

Тим не менш, саме вони стали методологічною основою більшості досліджень у цьому напрямі, що обумовлюється бажанням дослідників власноруч отримати працездатні інструменти управління ТП у містах за мінімальної участі людини в процесі прийняття рішень.

Насамперед тут вирішуються питання створення стратегій управління в режимі онлайн, з використанням фактичної інформації великої мережі перехресть, що

сприяє і без того високим обчислювальним вимогам для вирішення задач щодо визначення параметрів роботи СО. Існує багато досліджень [34-39] під заголовком метаевристичних підходів, які зазвичай використовують вже відомі евристики; хоча отриманих результатів недостатньо та вони все ще далекі від того, щоб вважатися повністю налаштованими. Крім того, мало хто з авторів використовує повністю обґрунтовані уявлення та структури даних, які мають вирішальне значення для продуктивності методів управління СО. Беручи до уваги особливості проблем із рухом ТП, особливо гострим стає питання узгодженого управління великою мережею СО, що дуже ускладнює отримання раціонального рішення або навіть уявлення про нього.

Останні роки стали свідками значного прогресу в розвитку алгоритмів прогнозування, обчислювальної потужності та доступності даних у реальному часі, як мінімум у кількості цих алгоритмів. Ці факти разом із досягненнями в евристичних алгоритмах можуть привести до створення проактивних моделей, які потенційно можуть бути успішно розроблені [16]. Проактивні моделі можуть передбачити проблему ТП ще до того, як вона станеться, і розрахувати необхідні зміни в СУ СО, щоб її повністю запобігти або зменшити негативні наслідки. Такі проактивні моделі також можна об'єднати з новими сферами моделювання, наприклад з концепцією цифрового двійника, яка набирає популярності для виробничого середовища. Цифрові двійники інтегрують Інтернет речей, штучний інтелект, машинне навчання та програмну аналітику з просторовими мережевими графіками, з метою створення живих цифрових імітаційних моделей, які оновлюються та змінюються в міру того, як змінюються їх фізичні аналоги [16]. Завдяки вищезгаданим досягненням можна застосувати ідею цифрового двійника до моделі міського руху. Використання цифрового двійника для міської транспортної системи в правильних рамках може дозволити оцінити можливі проблеми раніше і привести до досягнення обчислювальної потужності достатньої для роботи в режимі реального часу.

Дуже цікавою в цьому напрямі стало застосування нечіткої логіки в плануванні роботи СО, для налаштування роботи яких застосовуються Q-навчання та нейронні мережі [41-50], які привели авторів до отримання позитивних результатів

у конкретних випадках. Але слід відзначити, що авторами наведених досліджень не наводяться переконливі аргументи з приводу доцільності застосування розроблених підходів у загальному випадку.

Чжао та ін. [41], Хін та ін. [44] розробили контролер світлофора на основі нечіткої логіки для ізольованого перехрестя. На думку авторів було отримано дуже переконливі результати з точки зору скорочення заторів, часу поїздки та інших показників. Але відповідно до джерел [51, 52], контролери дорожнього руху, які працюють на алгоритмах нечіткої логіки й машинного навчання, не є економічно вигідними і вимагають занадто великих інвестицій для їх налаштування та обслуговування.

Для усунення конфлікту, що з'являється через різні цілі оптимізації параметрів СО, авторами деяких досліджень використано багатоцільові моделі [48-50]. Загальною метою тут була оптимізація ПС, також часто вживаними були – мінімізація затримок, часу зупинок та викидів шкідливих речовин від роботи ТЗ. Ю та ін. у своїй роботі [48] запропонували до використання нечіткий компромісний підхід програмування. В ньому для визначення різних цілей задачі оптимізації використано різні вагові коефіцієнти. Ці ваги різняться в залежності від стану коефіцієнту ТП. Після присвоєння відповідних ваг багатоцільова функція перетворюється в одну ціль, яка й вирішується.

Чжао та ін. [49] та Цзя та ін. [50] використовували метод рою часток з деякими покращеннями для своїх багатоцільових моделей функціонування СО. Представлені в цих роботах результати не можуть претендувати на загальність й поширення та мають вигляд чергової спроби пошуку прийняттого рішення, за рахунок використання методів, що добре зарекомендували себе в інших галузях знань. Але все ж таки, слід відзначити, що підходи, які ґрунтуються на використанні багатоцільової оптимізації, є достатньо перспективними, з точки зору узагальнення та формалізації понять часу поїздки та кількості зупинок ТЗ на маршруті руху.

У свою чергу, оптимізаційні моделі на основі використання мікросимуляції у SimOpt, розглядаються як область, де оптимізаційні методи поєднуються із імітаційними моделями [51]. Основною метою цього є пошук найкращих значень цільо-

вої змінної серед переліку всіх можливостей без явної оцінки кожної з них [52]. Сам процес моделювання параметрів СО є особливо важливим, оскільки оцінку впливу навіть незначних коливань у змінних рішення щодо параметрів СО можна отримати з використанням імітаційного моделювання, без їх фактичної реалізації.

Роботи Нгуєн та ін. [53], Хатрі і Бумхіді [54], Чжен та ін. [55] є розробками, які застосовують багатоцільовий підхід до оптимізації параметрів роботи СО на основі використання SimOpt або VISSIM. У своїй роботі Нгуєн та ін. [53] впровадили генетичний алгоритм локального пошуку без домінування з ітераціями, завдяки чому вихідна інформація стала попередником наступного покоління. Отримані результати порівнювались із багатоцільовими диференціальними еволюційними алгоритмами, в результаті чого було встановлено, що запропонований алгоритм є кращим, ніж два інших підходи, а хороші результати моделювання були досягнуті вже на ранній стадії процедури оптимізації.

У роботі Чжен та ін. [55] розглянуто проблему синхронізації мережі СО з урахуванням екологічних аспектів, яка вирішується з використанням двоцільового стохастичного підходу оптимізації на основі імітаційного моделювання (BOSSO). Для представлення зв'язків між змінним рішенням та цілями авторами використано два типи сурогатних моделей. Для перевірки розробленого підходу використовувались засоби мікромоделювання VISSIM. Отримані результати переконливо засвідчили, що запропонована модель (BOSSO) перевершувала інші три аналоги, з якими порівнювалась.

У всіх цих роботах, окрім їх разового характеру залишається питання реальності налаштування імітаційної моделі, оскільки незважаючи на зазвичай великий перелік внутрішніх налаштувань у них, більшість з цих налаштувань не супроводжуються надійними інструкціями, щодо їх коректного застосування.

Підходи, що засновуються на принципах метаввристики реалізовані в роботах [56-60]. Тут вони застосовуються як оптимізаційні шляхом поєднання із інструментами мікросимуляції. Найчастіше для реалізації метаввристики застосовуються методи на основі популяцій, де метод рою часток і генетичні алгоритми є найбільш вживаними. Додатково до деяких загальних цілей, згаданих вище, авто-

рами робіт Елгарей та ін. [58] і Джінтамутха та ін. [59] поставлено нестандартну мету – віднайти тривалість найкоротшого ефективного зеленого часу (тривалість горіння дозвільного сигналу світлофора).

Ряд інших авторів Гьокче та ін. [56], Дабірі та Аббас [57], Чуо та ін. [61] у своїх роботах використовували метод рою часток для досягнення цілей своїх досліджень. Слід відзначити, що робота [57] – це єдине дослідження, що було проведено для регульованої кільцевої розв'язки, яка містить 28 датчиків у різних локаціях, тоді як автори [60] працювали над оптимізацією магістральних світлофорів на трьох перехрестях і проблемами, пов'язаними з управлінням ТП у міських умовах.

Використання евристичних алгоритмів очікувано привело до отримання авторами позитивних результатів, які, однак, навряд чи коли будуть використані іншими дослідниками та, тим паче, у практичних цілях. Посприяти поширенню цих робіт могли б переконливі результати впровадження алгоритмів у практику управління СО реальних міст, але сподіватися на них можна лише після того, як в ефективності даних методів вдасться переконати практиків управління СО, що є достатньо складним завданням, зважаючи на спосіб отримання результатів за допомогою евристичних алгоритмів.

У підходах на основі штучного інтелекту зазвичай використовується якась функція для оцінки потенційних рішень під час процесу пошуку з метою знайти оптимальне або близьке до оптимального рішення. Деякі дослідники також використовують інструменти мікросимуляції. Але інструменти мікросимуляції тут використовуються не для отримання рішення, а лише для демонстрації його можливих або потенційних переваг. У цій категорії зустрічаються такі підходи, як нечіткі моделі, нейронні мережі, алгоритми машинного навчання, еволюційні обчислення, ройовий інтелект та інші популяційні метаевристичні алгоритми.

До цього також слід розуміти, що однією із поширеніших сучасних стратегій з оптимізації ТП у міських умовах є застосування засобів інтелектуальних транспортних систем, основним призначенням яких є оперативне рішення складних проблем з трафіком з використанням штучних нейронних мереж, які, в свою чергу, претендують стати наступником штучного інтелекту [62].

Автори підходів заснованих на штучному обчислювальному інтелекті в основному зосереджуються на усуненні «вузьких місць» або збільшенні ПС на регульованих перехрестях [63-70].

Сян і Чен [63] в своїй роботі використали нейронну мережу, основою якої є зворотне поширення алгоритму сірого якісного навчання з підкріпленням, для того щоб ліквідувати проблемні місця й уникнути зменшення ТП, а також взаємозв'язків між функціями часового плану. У дослідженні Бенхамза та ін. [63] для налаштування адаптивної схеми СО мережі перехресть використано багатоагентну структуру, в якій кожним окремим перехрестям здійснював керування автономний агент.

Відхате та ін. [65] та Гендерс та ін. [66] моделювали параметри СО з використанням алгоритму навчання на основі інформації про ТП в режимі онлайн. В свою чергу, Ліан та ін. [67] використовували глибоку модель навчання для розрахунку ПК та управління довжиною СЦ на основі інформації, що збиралася за допомогою різних датчиків.

Озаном та ін. [70] представлено модифікований алгоритм навчання, який ґрунтується на Q-Learning. Розроблений алгоритм був поєднаний з Transyt-7F для пошуку оптимального плану роботи СО в узгодженій мережі. Розробниками встановлено, що такий підхід є кращим за інші подібні алгоритми, основою яких є реальне навчання, через його можливість формувати підсередовище в кожній події навчання. З точки зору розміру, схожість між новоствореним і оригінальним (стартовим) середовищем залишилася незмінною, оскільки використовуються найкращі рішення, що отримані з попереднього заходу навчання.

Бернас та ін. [68] використали стратегію нейроеволюції щодо покращення конфігурації зв'язку введеної нейронної мережі, а можливості SUMO використані для більш широкого дослідження розробленої моделі за допомогою мікросимуляції.

Метаевристичні підходи також є одними із широко застосовуваних дослідниками при оптимізації стратегій управління СО за допомогою методів обчислювального інтелекту. У роботах [70-76] реалізовані різноманітні метаевристичні алгоритми, такі як бджолина сім'я, меметичний алгоритм, оптимізація рою часток, дифе-

ренціальна еволюція тощо. Аналіз показує, що алгоритми на основі сукупності є найбільш широко використовуваними метаевристичними алгоритмами для оптимізації стратегії управління СО.

Гао та ін. [74] розглядали планування міського світлофора як задачу оптимізації на основі моделі. Для вирішення цієї проблеми в [74] реалізовано цілих п'ять евристик. Чжан та ін. [76] представили алгоритм гібридного рішення для оптимізації артеріальної системи СО на основі генетичного алгоритму.

У своїх дослідженнях Гао та ін. [73] і Цзяо та ін. [75] розробили генетичний алгоритм для оптимізації налаштувань СО відповідних мереж і цільових функцій. Цзанг та ін. у роботі [76] використовували хмарні технології для визначення параметрів роботи світлофору на ізольованому перехресті в умовах недостатнього та перенасиченого руху. Щоб контролювати ТП, Манандхар і Джоші [72] розробили гібридну систему, яка включала техніку статистичного мультиплексування та оптимізацію рою часток. На основі оптимізації рою часток Тарек та ін. [71] також розробили стратегію управління СО для сигналізованої кільцевої розв'язки, яка була об'єднана з трьома різними субконтролерами.

Навіть вербальний опис виконаних з використанням штучного інтелекту робіт змушує задуматися над практичною придатністю отриманих результатів, але головною проблемою тут є те, що штучний інтелект має здатність до налаштування на відомі параметри процесів, що вивчаються, але не в змозі згенерувати нові рішення. Тому їх використання у сфері ОДР досі має дещо обмежений характер і вимагає наявності нових, ефективних методів СУ.

Існує ряд підходів до оптимізації параметрів роботи СО на основі динамічного, цілочисельного лінійного та нелінійного програмування. У роботі [77] автори сформулювали задачу оптимізації параметрів СО як змішане цілочисельне лінійне програмування, тоді як методи в [78, 79] засновані на моделях нелінійного програмування. Мохебіфард і Хаджбабає [78] сформулювали задачу оптимізації параметрів СО на рівні мережі як змішану цілу нелінійну програму, яка була заснована на моделі передачі клітини і представила налаштовану методологію для її вирішення зі значним розривом оптимальності. Ю та ін. [79] запропонували модель нелінійно-

го програмування для оптимального налаштування параметрів СО. Новим аспектом цієї моделі було поєднання моделі ТП подвійної черги з реакцією водіїв на її довжину в режимі реального часу. У [80] був використаний підхід опуклого (квадратичного) програмування для оптимізації СЦ для пішоходів, а також ТЗ на ізольованому перехресті. Ці підходи доповнюються методами, заснованими на дворівневому програмуванні, до числа яких відносяться дослідження, де сигнал налаштується виходячи із рішення оптимізаційної задачі на двох рівнях: верхньому й нижньому. З використанням як цільової функції максимізації зваженої поїздки, дослідниками Гаджбабаї та Бенекоталом у роботі [81], сформульовано програму для оптимізації параметрів СО та системи оптимального призначення трафіку одночасно. Зменшуючи навантаження в мережі і обмеження на IP, дослідниками також було запропоновано базу для визначення значення верхньої межі значення цільової функції.

Для отримання оптимальних налаштувань СЦ, Лі та ін. [82] розроблено основу таким чином, щоб сигнали СО налаштовувались за допомогою дворівневої структури. Метою верхнього рівня в даній роботі є мінімізація середнього часу в дорозі, а завдання досягнення рівноваги в мережі нижнім рівнем, вирішувалось при використанні налаштувань, що передбачаються на верхньому рівні.

Для підходів, заснованих на використанні різних обчислювальних алгоритмів пошуку оптимального стану СО, властиві схожі з попередніми підходами риси, які полягають у відсутності очевидних переваг отриманих результатів перед існуючим станом системи управління СО та практичного підтвердження ефективності цих методів. Описані вище підходи мають деякі спільні характеристики та їх можна поєднати в певні групи, але, слід відзначити, що також існує низка індивідуальних досліджень, метою яких можна вважати підвищення ефективності роботи СО.

Ці підходи включають стохастичне та напіваналітичне програмування, секвенування на основі етапів, об'єднання елімінаційних пар тощо. В основному, вони представляють спроби застосування в сфері ОДР результативних засобів вирішення оптимізаційних питань в інших сферах наукової та інженерної діяльності, але на жаль вони не привели до переконливих результатів та зазвичай використовувались не більше одного разу.

Наприклад, багатоступінчаста стохастична програма для адаптивної системи функціонування СО, яка базувалася на надійності фазового зазору, була запропонована Ма та ін. [83]. На першому етапі було розроблено базовий план часу, який включав тривалість циклу та зелений час для кожної фази, тоді як на другому етапі ОТ і зсуви були адаптивні до поточних умов руху. Або, на відміну від більшості існуючих методів, Цзяо та ін. [84] запропонував модель, яка мала на меті мінімізувати середній час затримки на людину, а не затримку ТЗ на перехресті.

В роботах [85-92] авторами використовуються методи математичної оптимізації разом із засобами мікромоделювання. Обрані авторами в своїх дослідженнях підходи варіюються від використання принципів динамічного програмування до застосування принципів протидії оптимальному контролю. Розроблені підходи можна вважати корисними лише при вирішенні проблем на етапі проєктування, а не для операційної стадії. Причиною цього є складнощі, що пов'язані з необхідністю їх вирішенням у мережах великих розмірів, протягом прийняттого періоду часу.

Ченом та співавторами [85] було розроблено алгоритм управління сигналом СО в режимі онлайн, в основі якого покладено принципи динамічного програмування. Дакічем та ін. [87] запропоновано два алгоритми управління СО на основі моделі протитиску для максимізації ПС міської ВДМ. Результати показали, що запропоновані алгоритми перевершували жорстке регулювання за ефективністю.

Щоб впоратися з проблемою налаштування СО, Ченом та ін. [89] представлено підхід, де застосовувались дані про розподіл вищого порядку, які отримуються з використанням стохастичного мікроскопічного тренажеру. Тут задача оптимізації параметрів СО засновується на використанні лінійної комбінації загального часу очікування на шляху прямування та його стандартного відхилення. Підвищення обчислювальної продуктивності розробленого алгоритму досягається за рахунок об'єднання аналітичної апроксимації змодельованих показників із даними, що були змодельовані. Слід відзначити, що думки авторів зводяться до того, що представлені вище підходи доцільно використовувати для інформування користувачів транспортних систем у процесі її проєктування та функціонування.

Система моделювання тестового стенда для оцінки продуктивності самонав-

чальної адаптивної СУ сигналами СО представлена в роботі [90]. Тут проведено оцінювання двох режимів роботи СУ (локальні або координовані СО) на різних рівнях навантаження на мережу у місті Берлінгтон, Онтаріо, Канада. Отриманий результат засвідчив, що розроблена система є більш ефективною ніж базовий сценарій і дає можливість скоротити до 25% затримок на рівні самої мережі та скоротити викиди  $\text{CO}_2$  на п'ятнадцять відсотків. Але, з іншого боку, результати двох тестових моделей показують, що продуктивність адаптивної системи змінюється залежно від умов перетину та потоків, конфігурації мережі, інтенсивності ТП, їх мінливості та близькості перехресть один до одного.

Слід відзначити, що останніми роками значно збільшилась кількість наукових робіт і досліджень, що спрямовані на використання інформації про роботу автономних ТЗ і технологій, таким прикладом є робота [93]. Подібні дослідження мають за мету вивчення, виключно, загальної сфери того, наскільки використання автономних ТЗ є безпечним, ефективним і екологічно чистим тощо. Але, на етапі проведення аналітичного огляду сучасних підходів до визначення параметрів роботи СО авторам не вдалося натрапити на дослідження, які б, у явному вигляді, підтверджували користь від автономних ТЗ для пов'язаних із ними технологій оптимізації роботи СО.

## 1.2 Аналіз існуючих методів побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів

Результати проаналізованих вище досліджень не надали відповіді на питання про найбільш ефективний напрям розвитку систем СУ в містах. Більшість досліджень присвячена проблематиці налаштування адаптивних СУ світлофорами з метою забезпечення їх відповідної реакції на змінні умови руху, зокрема в мережах, де працюють кілька світлофорів. Однак, не можна однозначно стверджувати про більшу перспективність адаптивних систем у порівнянні з координованою роботою

світлофорів, які працюють в жорсткому режимі регулювання. Наявний у автора практичний досвід з ОДР у м. Харків підтверджує доцільність оцінювання можливостей координованої роботи СО. Це пояснюється тим, що координація є легким для розуміння та прийнятним для міського бюджету засобом СУ в більшості українських міст. Доцільність такого оцінювання підтверджується й деякими джерелами, зокрема [94], де в затвердженому плані розвитку штату Каліфорнія передбачається 100% координація всіх ММ, які облаштовані СУ.

Перевірка та оцінювання можливостей поліпшення умов для руху ТП на ділянках міської ВДМ з використанням засобів координованого управління кількома суміжними СО передбачає вибір і обґрунтування такого методу координації, який найкращим чином підходить під обраний об'єкт експериментальних досліджень. Для вирішення цього завдання, по перше, необхідно проаналізувати сучасні світові тренди формування магістральних і мережевих планів координації СО, а по-друге, оцінити їх ефективність і доцільність використання на обраному об'єкті.

У світі зроблена значна кількість спроб створити ефективний метод координації світлофорів, які представлені у патентах, наукових звітах, статтях, дисертаціях і нормативних документах. Серед них спочатку аналізуються методики, які мають практичне застосування, згадуються в нормативних документах і дисертаціях.

Одним із закордонних патентів, з якого можна розпочати аналіз методів формування ПК, є патент на СУ «Progressive traffic signal control system» [95]. У цьому патенті описані загальні принципи побудови координованих ділянок ММ, включаючи розрахунок загальної тривалості циклу, вибір максимального значення циклу і визначення відносних зсувів моментів початку циклу на різних перехрестях. Винахід розширює перелік зсувів, враховуючи зміну часу проїзду ділянки через зміну інтенсивностей ТП та переважно використовується для уточнення базової методики, а не для її перетворення.

У відповідності до [95] планування параметрів ЗХ на обраній для координації ділянці ММ є нескладною задачею, яка вирішується за рахунок виконання наступних дій: розрахунок тривалості циклів для всіх СО ділянки координації; вибір максимального циклу; розрахунок часових зсувів включення дозвільного сигналу на

суміжних СО (визначається в залежності від довжини ділянки між СО). Але, все ж таки, слід розуміти, що методики, які наведені в нормативних документах сфери ОДР, не містять в собі однозначних і чітких вказівок з формування ефективних ПК.

Аналіз методів координації СО, які представлені в нормативних документах різних країн світи, слід розпочати із найбільш застосовуваного та розповсюдженого керівництва – HCM [24]. Координація в ньому (в переважній більшості згадувань лінійна координація) представлена як засіб підвищення ефективності ОДР, але ґрунтовних і конкретних вказівок щодо порядку дій при її реалізації не представлено. Слід відзначити й відсутність практичних прикладів реалізації розроблених ПК за представленою методикою, хоча саме керівництво побудоване з використанням великої кількості практичних прикладів в інших своїх розділах. Також у керівництві зазначається, що впровадження координації роботи СО сприяє підвищенню середньої швидкості руху ТЗ та покращенню рівня їх транспортного обслуговування, але не сприяє підвищенню ПС на ММ.

Відоме керівництво для регульованих перехресть – Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections [96] містить лише окрему інформацію щодо процесу формування ПК, наприклад: тривалість узгодженого циклу на ділянці ММ може й перевищувати довжину критичного (ідеального) циклу на її максимально завантаженому перехресті, або те, що фаза, яка виділена для лівого повороту (ЛП) може сприяти полегшенню побудови самого ПК. Також у даному керівництві зроблено акцент на можливості отримання негативних наслідків впровадження координації в зворотному напрямку руху ТЗ магістраллю через дії зі СО в прямому (основному) напрямку ЗХ, тобто в зворотному напрямку можуть виникати черги.

Інше керівництво США – Signal Timing Manual [97], у більшій мірі, присвячено саме процесу визначення параметрів роботи світлофорів на основі ПЧД. Слід розуміти, що, на даний час, вона використовується багатьма спеціалістами різних країн і являється одним із основних засобів представлення та налаштування ПК. Приклад ПЧД наведено на рис. 1.2, на ньому штрихованими лініями представлені фази, що виділяються для виконання ТЗ маневру ЛП з координованої ділянки ММ. Також в керівництві [97] представлено графіки, з яких можна встановити додаткові

можливості для регулювання ПК, які надає ЛП, але в ньому також (як і в НСМ) відсутні ґрунтовні та конкретні вказівки щодо послідовності дій із їх використання.

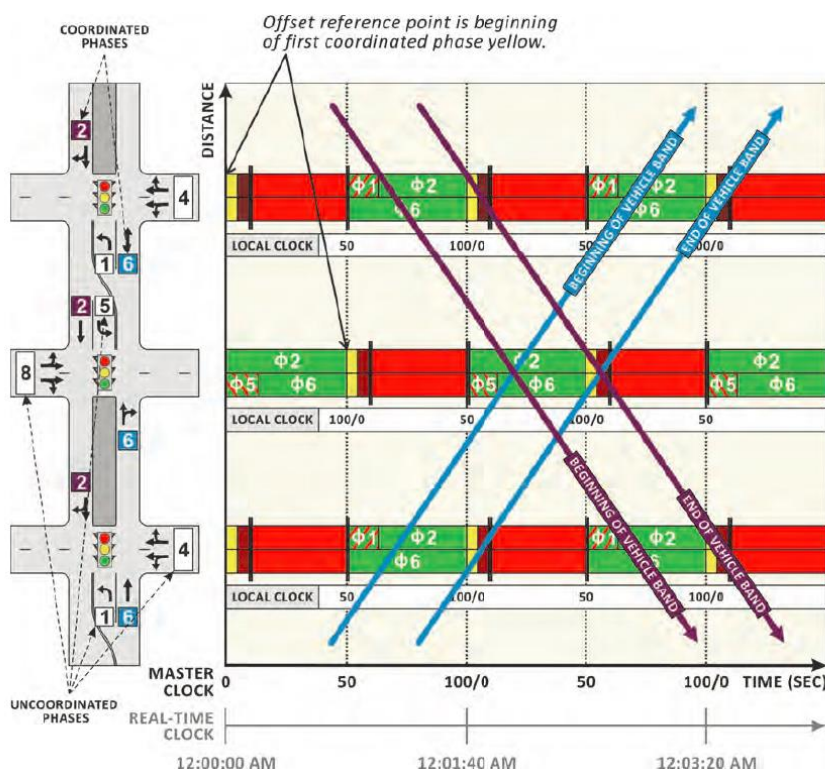


Рисунок 1.2 – Основна ПЧД лінійної координації [97]

Розробниками керівництва [97] наголошується на значущості ліній, які зображують границі координованої пачки ТЗ, іншими словами – ширину смуги ЗХ. Для розрахунку зсувів авторами пропонується використання максимально дозволеної швидкості руху ТЗ або вісімдесят п'ятий перцентиль цієї швидкості. Цінністю керівництва [97] є представлені в ньому вказівки для формування коридору для ТЗ, що рухаються ЗХ, які по собі можна вважати інструкцією зі створення ПК:

- потрібно враховувати швидкість руху ТЗ із ЗХ, від цього залежатиме ПС ММ або її ділянки;
- ПС може різнитися для прямого і зворотного напрямків руху ТЗ у ЗХ;
- зі збільшенням кількості перехресть у ЗХ стає складніше забезпечити безперервний рух ТЗ координованою ділянкою. Для ліквідації таких негативних наслідків, при доданні нових перехресть до ЗХ, використовують запрограмовану зупинку, яка полягає в розбитті довгого коридору на менші за розміром сегменти, особливо актуальним це є на довгих відрізках між перехрестями. Після ці сегменти можна

об'єднувати, вибираючи оптимальні зв'язки між окремими сегментами, які, найчастіше, забезпечують ефективний рух в якомусь одному обраному напрямку;

- у періоди підвищеного навантаження розрахункова ПС може не забезпечуватися, через вплив черг на ділянці ММ, що координується;

- у залежності від інтенсивності ТП ПК, які налаштовуються на величину максимальної ширини смуги ЗХ, можуть спричинити зростання мережевої затримки через зростання транспортних затримок на ділянках, де відсутня координація.

Авторами [97] також зазначається, що ширина ЗХ є її ідеалізованим відображенням, тому що в ній в явному вигляді не враховані особливості руху ТЗ координованою ділянкою ММ та ТЗ, що примикають до неї з другорядних напрямків, наприклад:

- прискорення ТЗ від стоп-лінії перехрестя та уповільнення ТЗ перед нею;
- розпад пачок ТЗ, що рухаються між суміжними перехрестями координованого сегменту ММ;

- ТЗ, що збираються на перехресті за час дії забороняючого сигналу світлофора для основного напрямку руху ТЗ (ЗХ) – це можуть бути ТЗ з пачки ЗХ або додаткові ТЗ, що прибули з другорядних напрямків.

Нажаль авторами керівництва [97] не представлено шляхи врахування перелічених вище особливостей руху ТЗ координованими ділянками ММ і відповіді на кілька гострих питань при створенні ефективних ПК: як визначити довжину пачки ТЗ ЗХ; як проводити вибір перехресть, що включатимуться до ПК; яким чином здійснювати вибір прямого і зворотного напрямків руху ТЗ координованою ділянкою ММ та як поводитись, у випадку коли ЗХ автоматично не будується для зворотного напрямку? Серед перелічених питань, останнє має вирішальне значення і, ймовірно, є ключовим у всьому процесі побудови ПК, оскільки зсуви початку циклів на перехрестях координованої ділянки ММ в прямому напрямку автоматично визначають моменти початку циклів у зворотному напрямку. А сам результат побудови ЗХ для зворотного напрямку, особливо коли довжини між перехрестями неоднакові, буде практично завжди незадовільним.

Натомість розробниками Signal Timing Manual [97] запропоновано для визна-

чення тривалості циклів СО застосовувати формулу Вебстера [23], не дивлячись на те, що її використання не є прийнятним при визначенні параметрів ПК з груповим рухом ТЗ координованою ділянкою ММ. Це приводить до думки про те, що координація роботи світлофорів ще не є загальноприйнятним засобом ОДР, що додатково відображено й на підходах до СУ трафіком, які отримали розповсюдження на прикладі українських міст.

Розробники керівництва з ОДР австралійського походження *Guide to Traffic Management* [98] наводять перелік переваг використання координованого СУ, які, в принципі, відображають основні критерії ефективності впровадження ПК:

- скорочення транспортних затримок;
- скорочення часу поїздки ТЗ;
- зростання ПС для регульованих перехресть, що розташовані поблизу;
- скорочення викидів шкідливих речовин;
- зниження рівня шуму;
- зростання ПС ділянок ВДМ.

У керівництві [98] акцентовано увагу на тому, що представлені вище переваги є результатом лінійної координації, де СО встановлюються послідовно на перехрестях за умови, що відстань між ними не перевищує 1 км. Тривалість циклів СО визначається авторами [98] на основі формули Вебстера [23] або її удосконаленими версіями австралійського походження [99, 100]. Також слід відзначити, що однією із основних відмінностей в даному керівництві є те, що для неосновних перехресть в ПК використовуються цикли із значенням тривалості в половину тривалості максимального циклу (іншими словами, половина тривалості циклу критичного перехрестя). Цікавим моментом у [98] є наявність припущення про можливість отримання від'ємних значень зсувів. Це викликає певного роду здивування, оскільки з математичної точки зору значення зсуву не може виходити за межі часового інтервалу від 0 до тривалості циклу.

Додатково слід відзначити, що в [98] наведено приклад ПЧД лінійного ПК з ортогонально перетвореними осями та зазначається, що для кожного окремого періоду доби, який має характерні особливості та умови руху ТП, доцільно розробля-

ти відповідні ПК, які можуть бути представлені у вигляді жорстких, напіваадаптивних і адаптивних СУ. У свою чергу, для визначення параметрів відповідних ПК рекомендовано використовувати спеціальне ПЗ, наприклад, TRANSYT, LinSig. Також авторами [98] зазначається не дуже поширене застосування СУ з жорстким регулюванням у Австралії й Новій Зеландії, тому що широко впроваджені в цих країнах адаптивні СО показали доволі високі результати управління дорожнім рухом. Це свідчить, що впровадження СО адаптивного типу було обрано спеціалістами з ОДР цих країн як основний напрям розвитку СУ, а вже в подальшому з'явилася необхідність розробки ПК, параметри яких визначалися з використанням ПЗ SCOOT і SCAT. Авторами [98] також зазначено, що розроблені з використанням SCOOT і SCAT ПК дозволяють досягти скорочення часу долаття ТЗ координованої ділянки ММ на близько тридцять відсотків, а також кількості зупинок ТЗ на 40%, у порівнянні з ситуацією коли не було координації на ділянці ММ. У своїх рекомендаціях автори Guide to Traffic Management роблять акцент на доцільності використання мультимодальної координації [101], як одного з найперспективніших методів формування ПК.

У підсумку можна констатувати те, що більшість особливо гострих і принципових проблем при розробці ПК, за думкою розробників [98], є вирішеними і слід проводити подальші дослідження в напрямках більш глибокого налаштування розроблених ПК. Це є доволі суперечливим висновком, оскільки наявність великої кількості досліджень, спрямованих на удосконалення існуючих методів координації СО, засвідчує зворотне. До цього слід також додати, що автором дисертаційної роботи серед представлених матеріалів на офіційному порталі агенції Austroads <https://austroads.com.au/> не знайдено опису ПК, реально впроваджених в Австралії або Новій Зеландії, що також не засвідчує правоту місцевих спеціалістів про високу ефективність і досконалість програмних комплексів, які використовуються для розрахунку параметрів ПК.

Слід також відзначити наявність керівництв з ОДР, які розробляються на рівні місцевих органів влади, прикладами таких робіт є розробки, що проводяться департаментами окремих штатів США, наприклад керівництво [102], але, нажаль, у

ньому також не наведено інформації щодо використання та впровадження реально розроблених ПК.

Наступним етапом проведення огляду методів формування ПК є розгляд наукових робіт і проєктів. Одними з перших за зазначеною тематикою є дисертаційна робота Васудевана [103] – вирішується питання інтегрування громадського транспорту в ПК, а також дослідження Кіма [104] – автором представлено метод, що дозволяє оптимізувати ширину смуги ЗХ, заснований на динамічному програмуванні. Слід відзначити, що результати отримані авторами в роботах було оцінено з результатами моделювання з використанням MAXBAND, який започатковано ще в минулому столітті [104], декілька разів був модифікований [105-108] та став джерелом для розробки аналогів [109]. Основні характерні риси MAXBAND полягають у розрахунку оптимальних значень зсувів початку циклів, що сприяє отриманню смуги ЗХ максимального розміру, для СО із двофазними циклами на ММ. Сформовані ПК СО у MAXBAND базуються на використанні математичних оптимізаційних методів [16, 110, 111] та стали основою для розробки SCOOT і TRANSYT [112], а також SIGOP [113] та інших [114]. У свою чергу, SCOOT і TRANSYT базуються на використанні теорії циклічності профілів потоків [115].

За основний критерій оптимізації у програмі MAXBAND використовується ефективність ЗХ, іншими словами, лише частка ширини смуги ЗХ, що є невиправданим рішенням. На відміну від MAXBAND, програми TRANSYT і SCOOT дозволяють мінімізувати кількість зупинок ТЗ та довжину черги [116]. До того ж слід відзначити, що використання циклічних профілів потоків у цих програмах, також не можна вважати повністю доречним і обґрунтованим, що, в кінцевому випадку призвело до достатньо обмеженого впровадження розроблених на основі TRANSYT ПК [117, 118].

Бажання авторів [117, 118] отримати достатньо швидке аналітичне рішення для пошуку ефективного варіанту ПК далеко не завжди призводить до виявлення необхідних інструментів для поліпшення транспортного обслуговування учасників руху на ділянках ММ з координацією. Та є можливим поясненням доволі обмеженого використання представлених в цих роботах методів формування ПК на прак-

тиці та відсутність переконливих результатів їх впровадження.

У наступній за часом дисертації [119] було підготовлено базовий варіант ПК з використанням ПЧД, а основна мета роботи полягала в налаштуванні розробленої напіваадаптивної СУ СО на існуючі параметри роботи ММ.

Для отримання більшого ефекту від впровадження ПК автором дисертаційної роботи [120] запропоновано перед його побудовою поділяти ВДМ на відповідні сектори. З використанням засобів мікромоделювання трафіку в SUMO автором отримано десяти відсоткове скорочення величини часу поїздки ділянками ВДМ. Слід відзначити, що сама робота є доволі спрощеною та в ній відсутня інформація щодо вирішення основних проблемних питань при формуванні ПК, пов'язаних із врахуванням додаткових ТЗ та рухом пачки ТЗ через коридор ЗХ.

В іншій дисертаційній роботі [121] при розрахунку зсувів, що зменшують дисперсію транспортних затримок на координованій ділянці ММ, використано елементи теорії ігор. Цю спробу також не можна вважати прийнятною для отримання ефективного ПК на прикладі використання вже відомого інструментарію.

Існуючу постійну цікавість дослідників і розробників ефективних ПК підтверджує дисертація американського автору [122], але, слід відзначити, що її результати стосуються іншої суміжної сфери наукових досліджень та не містять нових ідей щодо процесу розробки ЗХ.

У роботі [123] вперше описано процес управління ТП на основі нейронно-нечіткого навчання із підкріпленням. Використання цього підходу дозволяє підвищити швидкість руху ТЗ та скоротити транспортні затримки у зрівнянні з оптимізованою версією ПК. Але слід додати, що в більшій мірі результати отримані в дисертаційній роботі [123] не доводять практичної придатності розробленого методу.

У дисертації [124] представлено результати дослідження впливу величини швидкості ЗХ на результат роботи ПК та наведено аргументи щодо актуальності проблематики підвищення ефективності роботи СО у США. Для оцінювання якості формування ПК в роботі використовується ПЧД. На багатьох прикладах автор [124] знаходить резерви щодо покращення існуючих ПК, що переконливо підтверджує необхідність пошуку нових методів формування ефективних СУ СО.

Зміст дисертаційної роботи [125] містить чітке твердження про те, що координація СО є звичайною практикою в сфері ОДР Сполучених Штатів Америки, що, в свою чергу, підтверджує можливу користь використання даного напряму управління ТП на ММ в містах України. Основна цікавість цієї роботи полягає дослідженню випадкового характеру формування пачки ТЗ в ЗХ, що може стати у користі в подальших дослідженнях в рамках даної дисертації.

У свою чергу, робота [126] є продовженням розробок Гартнера в галузі розробки методів формування ефективних ПК. Однак, замість використання аналітичних моделей, які ним використовувалися раніше, зараз ним використовується ПЗ, що дозволяє налаштовувати ПК з елементами адаптації.

Інше дослідження [127] також містить інформацію про результати ефективного застосування контролерів адаптації на прикладі скоординованої СУ трафіку. Для досягнення більшого ефекту авторами обґрунтовано необхідність отримання відповідного плану жорсткої координації на базі ПЧД. Такий алгоритм дій є цілком прийнятним для особливостей та умов розвитку і впровадження СУ СО в українських містах. Автори цього дослідження відмічають особливо гостру проблему правильного визначення тривалості СЦ у ПУ та зазначають, що саме координація СО являється більш ефективним напрямом підвищення якості транспортного обслуговування учасників дорожнього руху на ММ, ніж адаптація світлофорів. Але слід відзначити, що авторами не наведено кількісного підтвердження попереднього висновку та не встановлено умови, де таке працює.

Роботи колективу авторів під керівництвом Гартнера [128, 129] спрямовані на використання аналітичних методів формування ПК, де за критерій оптимізації використовується показник ефективності хвилі. В роботі [128] представлено результати оцінювання різних методів формування ПК (U-Band, MAXBAND, V-Band та MultiBAND), для чого використано ПЗ NETSIM. Отримані результати не можуть бути сприйняті як добрі, оскільки кількість зупинок ТЗ для всіх варіантів ПК є більш ніж п'ятдесят відсотків, та повинні стати гарною порівняльною базою для інших ПК.

Інша робота того ж авторського колективу [130] містить дані про отриманий

позитивний результат впровадження ПК на прикладі мережі СО. Використання розробленого в роботі ПЗ, що засновувалось на змішаному цілісному програмуванні, дозволило максимізувати ширину смуги ЗХ для обраної мережі СО.

Для найкращого налаштування зсувів включення світлофорів, що сприяло підвищенню рівномірності руху ТЗ в обох напрямках ПК, авторами роботи [131] проведено інтеграцію ПЗ Paramics із Synchro та TRANSYT-7F. Отриманий інструмент для уточнення зміщень сигналу є достатньо легким у використанні, при чому розробниками передбачено можливість використовувати його як періодично (одно-разово), так і сумісно з моніторингом ефективності ПК. Наявність подібних засобів для налаштування СУ СО підтверджує недосконалість базових ПК.

У роботі [132] автор дійшов висновку про те, що методи, в яких за критерій оптимізації обрано максимізацію ширини ЗХ, далеко не завжди гарантують скорочення затримок ТЗ. А для скорочення останньої в роботі пропонується застосовувати сурогатний метод безперервної оптимізації на основі градієнту, водночас проводячи оновлення фактичного стану обраної СУ. Використання такого підходу є доречним за умови наявності систем відеоспостереження за світлофорами на координованій ділянці ММ, а також він не містить методологічної основи, яка була б цікава для формування ПК.

Фернандез у своїй роботі [133] наводить власний досвід застосування ПЗ SCOOT і TRANSYT в Чилі. За рахунок складного налаштування обраного ПЗ на місцеві особливості руху ТП автором було отримано позитивний результат від впровадження розробленого ПК. Головним джерелом впровадження ПК стали 1410 СО із жорсткими СЦ, з 1750 світлофорів, які функціонують у місті Сантьяго, що підтверджує значимість першочергового розвитку і впровадження саме систем світлофорної координації в країнах, що розвиваються.

У роботі [134] використано достатньо відомий в рамках вирішення питань удосконалення ОДР підхід – машинне навчання Q-learning. У рамках даного дослідження цей підхід реалізовано з використанням MAXBAND на прикладі адаптивного і координованого СУ СО на ділянці ММ, облаштованій трьома світлофорами. Отримані в роботі результати не отримали широкого застосування та розповсю-

дження.

Авторами [135] запропоновано використання розподіленого підходу до варіанту динамічної координації СО, в який закладено інформацію про фактичний трафік і зв'язок між суміжними перехрестями, та який можна вважати приблизним щодо отримання бажаного результату – скорочення кількості зупинок ТЗ та часу їх поїздки. Результати апробації розробленого підходу на моделях об'єктів експериментальних досліджень не можуть гарантувати подальшого його використання для формування ефективних ПК.

Для оцінювання стану координованої ділянки магістралі та обґрунтування необхідності внесення змін до ПК з жорсткими СЦ, авторами [136] запропоновано використання поточної інформації про потік насичення, ступінь завантаження і якість ЗХ.

З метою побудови ефективного ПК на ММ італійські дослідники використали структурно-генетичний алгоритм, який використовується для розв'язання задач нелінійного програмування [137]. Перевагою використання такого підходу до вирішення проблеми підвищення рівня транспортного обслуговування учасників руху є лише можливість пришвидшення обрахування параметрів ПК на ММ, що не може вважатися достатнім для його поширення та використання на прикладі інших об'єктів.

У роботах [138, 138] авторами для удосконалення наявного ПК використані дані, отримані на основі діаграми координації Пердью. Автори робіт варіювали (підбирали) зсуви початку СЦ у ПК за рахунок чого було досягнуто скорочення часу поїздки ТЗ координованою ділянкою на 28%. Отримані емпіричні значення зміщень початку СЦ у ПК свідчать про недостатньо якісний базовий варіант ПК та наявність у спеціалістів з ОДР широкого кола можливостей при побудові ЗХ вручну. У наступних за часом роботах [138, 140] авторами встановлено, що розроблені ними заходи не створили можливостей для перерозподілу ТП мережею.

У дослідженні [141] застосовано засоби мобільного зв'язку щоб відстежувати трафік і наведено методологію формування системи показників для економічного оцінювання ефективності магістралі в місті. Автори дослідження засвідчують, що

сформований у даному дослідженні ПК є достатньо дієвим навіть за умов великих інтервалів зміни інтенсивностей трафіку, що додатково підтверджує ефективність використання СУ СО з жорсткими циклами.

Для врахування місцевих умов і особливостей транспортного процесу, азійськими фахівцями [142] було розширене стандартне завдання підвищення ефективності ОДР на локальному перехресті, за рахунок урахування умов безпеки при взаємодії транспортних і велосипедних потоків. Цю задачу автори представленої роботи вирішують з використанням принципів нелінійного програмування та засвідчують доцільність поширення отриманих результатів на перехрестя в ПК, при цьому авторами не представлено достатньо переконливих аргументів щодо такого поширення.

Розробники [143] використовують за критерій обґрунтування вибору щодо використання адаптивних СУ або ПК значення відсотку зупинок ТЗ між суміжними перехрестями на ділянці ММ. Результати мікросимуляції з використанням VISSIM свідчать, що при частці зупинок ТЗ меншої за 20% доцільно використовувати адаптивні СУ, а координацію проводити при частці зупинок ТЗ між локальними СО на ділянці ММ, що є більшою за 50%. Якщо значення відсотку зупинок ТЗ потрапляє в проміжок, то автори дослідження орієнтують на необхідність провадження інженерних рішень щодо доцільності використання координації. Такі висновки є корисними аргументами для фахівців з ОДР.

Авторами роботи [144] зазначається, що основною вихідною базою для проведення координації на прикладі ВДМ міста є дисперсія пачки ТЗ із ЗХ. Слід відзначити, що це твердження можна вважати коректним лише при наявності деталізованої та надійної методики побудови ПК, а також відповідної моделі для оцінювання часу очікування ТЗ при їх груповому прибутті. Слід також відзначити, що результати даної та більш ранніх за часом робіт [145-149] є достатньо корисними на етапі кінцевих налаштувань координованих СУ СО.

Авторами [150] зроблено спробу вирішити проблему координації ділянки ММ та оцінки її потенційної ефективності. Отримані результати імітації транспортного процесу свідчать про непереконаливість побудованого ПК, так було досягнуто

скорочення часу поїздки ТЗ координованою ділянкою ММ на 12,7% і на 2,4% – для всього обсягу ТЗ, що було представлено в імітації.

Колективом італійських авторів у роботі [151] запропоновано власне тлумачення термінів «координація» і «синхронізація» світлофорів. Під координацією вони розуміють процедуру власне встановлення зміщень початку завчасно розрахованих СЦ, а під синхронізацією – розрахунок зміщень разом із визначенням СЦ. Слід зауважити, що таке тлумачення визначених термінів призводить до появи великої кількості питань, наприклад, як можна проводити координацію роботи світлофорів з різними значеннями СЦ? Також авторами цієї роботи вважається, що загальне завдання синхронізації СО не має стійкого та універсального вирішення, але, все ж таки, необхідно розуміти, що вибір правильного алгоритму та здібності фахівців можуть суттєво впливати на ефективність підходу, що використовується.

Слід відзначити, що розробки Чжена [119] були практично реалізовані в [152]. Це дослідження спрямоване на отримання найкращого варіанту роботи ПК шляхом налаштування зсувів початку СЦ і зелених фаз на фактичні значення ТП, при чому точність такого налаштування перевіряється з використанням ПЧД. В результаті авторами отримано ефект у вигляді економії часу проїзду на рівні чотирьох відсотків, але для цього потрібно проводити процедуру тонкого налаштування.

Отримані в [153] результати є дуже схожими із попередньою роботою. Основний сенс цього дослідження полягає у використанні фактичної інформації про трафік, що отримується з системи SMART-SIGNAL, а також детекторів OASIS для адаптивного налаштування СУ СО.

Для вирішення питання ефективної взаємодії окремих систем громадського транспорту (трамвай) із загальним трафіком у роботі [154] розроблено оптимізаційну модель для формування ПК (BAM-TRAMBAND), в основу якого закладено асиметричний багато діапазонний метод AMBAND, що є ще одним прикладом використання математичного моделювання для завдань побудови ефективних ПК. Результати мікросимуляції в VISSIM свідчать про скорочення часу руху трамваїв.

У дослідженні [155] авторами були отримані доволі переконливі результати

впровадження координації СО, які роблять великий вплив на вирішення питання конкуренції між адаптивними СУ і СУ з координацією. Зокрема, в роботі показано, що затримки для наскрізного ТП по магістралі зменшуються на майже 53% для тих ТЗ, що рухаються у прямому (основному) напрямку ЗХ, та на майже 47% для ТЗ зустрічного напрямку ЗХ. Однак, слід відзначити, що ці переконливі результати стають менш виразними при розгляді всього обсягу трафіку (всіх напрямків). Тут скорочення затримок становить від майже 14% при низькому навантаженні до близько 3,5% при високій інтенсивності ТП. До того ж, у цій роботі була приділена увага врахуванню сучасних підходів при плануванні перехресть (Diverging diamond interchanges) при розробці ПК, але переваги таких перехресть не є повністю обґрунтованими, що додатково знижує переконливість координації на них.

Колективами авторів різних країн світу в дослідженнях [156, 157] власноруч побудовано ПК, що цілком можна вважати прикладом сучасного та достатньо високого рівня усвідомлення процесу впровадження координації СО. Слід відзначити, що авторами [156] використано формулу Вебстера [23] для розрахунку тривалості СЦ, а зсуви часу включення СО в ЗХ були визначені для основного напрямку ЗХ з урахуванням середньої швидкості руху ТЗ координованою ділянкою. У свою чергу, для оцінювання затримок ТЗ в ПК авторами [157] також використано формулу Вебстера [23], але в обмеженому вигляді – лише перший її доданок, що вважається авторами цієї роботи як певного роду досягнення. Представлені в цих роботах результати додатковим прикладом невисокого рівня розробок у напрямі побудови ПК на даний час.

Авторами роботи [158] зроблено чергову спробу розробки власного методу магістральної координації, в якій вони, нажаль, не торкнулись основних проблем формування ПК та не представили переконливих аргументів на користь і перспективності розробленого методу.

Дослідження [158] присвячене оцінці впливу дозування потоків на вході до координованої ділянки ВДМ та може бути корисним при побудові реальних ПК, але його результати не додають нічого нового власне до методики побудови СУ СО з координацією.

Стаття [160] є черговою спробою першого автору колективу застосувати ще один відомий метод оптимізації до задачі мережевої координації роботи СО. Як й інші спроби [48, 73, 74], вона не привела до отримання нових знань в цьому напрямі ОДР.

Оцінці та удосконаленню методів збору інформації для забезпечення надійної роботи мережі скоординованих СО присвячений звіт [161], у якому черговий раз виносяться (зазначаються) проблемні питання координації, так і не враховані в ній, наприклад, питання гармонізації швидкості пачки ТЗ у ЗХ та ПС магістралі, але відповіді на них відсутні.

Дворівнева ієрархічна структура управління для великомасштабних скоординованих міських мереж пропонується в роботі [162]. Такий підхід дійсно має місце для застосування на міських ВДМ, де зустрічаються різні умови функціонування СО від повністю ізольованих, до жорстко пов'язаних між собою.

Науковий звіт [163] також присвячений проблемі управління великими мережами та приводить до глобальних висновків, не всі з яких вдалося перевірити внаслідок розповсюдження пандемії, спричиненої COVID-19.

Управління великими мережами розглядається і у роботі [164], що дає змогу вважати цей напрям досліджень однією з основних сучасних тенденцій, яка, все ж таки, не спростовує необхідності поглибленого вивчення основ координації.

Продовженням спроб врахувати роботу громадського транспорту в ПК стала стаття [165], в якій автори діляться переконанням, що добре побудований ПК також підвищує швидкість руху маршрутних ТЗ, що є перевагою скоординованої роботи СО.

Новий алгоритм пошуку рішення для методу MAXBAND, який продемонстрував переваги перед стандартним лінійним програмуванням, створили автори роботи [166]. Але, слід відзначити, що вони не намагались вирішити основні проблеми координації та цю роботу слід вважати підтвердженням недостатньої ефективності існуючого ПЗ для розрахунку параметрів ПК.

Оптимізаційний метод стада планктону в роботі [167] і метод поглибленого навчання в [168] використані для отримання раціональних параметрів СУ, що підт-

верджує висновки з попереднього підрозділу щодо активного використання підходів з суміжних наукових галузей до задач ОДР, але, в кінцевому випадку, все ж таки, не приводить до вирішення основних питань у задачах координації роботи СО.

Ще одним напрямом розвитку методів світлофорної координації стало врахування автоматизованих і пов'язаних ТЗ при розрахунку параметрів СУ СО [169-172], що додатково підкреслює широкі можливості координації також і у майбутньому.

### 1.3 Обґрунтування мети та постановка задач дослідження

Огляд існуючих методів ОДР за допомогою світлофорів і аналіз реалізованих підходів до побудови планів магістральної та мережевої координації СО не дав обґрунтованої відповіді на питання щодо бажаних пріоритетів серед альтернативних напрямів розвитку систем СУ в українських містах: адаптивне управління окремими СО чи координація роботи суміжних СО. Але, з урахуванням дуже обмежених можливостей бюджетів більшості міст України і наявності в них діючих систем СУ ТП, це питання принципово можна вирішити, виходячи лише з доступності цих двох альтернатив, яке практично повністю визначається вартістю обладнання, так як налаштування СО є елементом поточної діяльності комунальних підприємств, відповідальних за функціонування технічних засобів ОДР у містах.

Вартість переведення світлофору з локального режиму роботи до адаптивного, є вкрай високою, оскільки мінімально означає необхідність заміни контролера СО і встановлення додаткового обладнання, для відстеження поточного стану транспортних і пішохідних потоків навколо перехрестя. Визначити точну вартість переобладнання СО з локального на адаптивний режим роботи в межах даної роботи неможливо, оскільки воно вирішується окремо для кожного випадку, при розробці проєктно-кошторисної документації. Але висновки відносно потенційної вартості конкурентних напрямів розвитку систем СУ можна зробити виходячи вже з порів-

няння переліку обладнання, яке необхідно для впровадження адаптивного або координованого СУ на базі локальних СО.

Мінімально необхідним для організації координованої роботи декількох локальних СО є встановлення на них GPS синхронізаторів часу, які забезпечують можливість переключення сигналів різних світлофорів у єдиній системі часу. Вартість цього обладнання відома – один GPS синхронізатор часу коштує близько 300 \$, що у декілька разів нижче вартості нового контролера. Потенційні зміни у структурі СЦ можуть вимагати деякого оновлення окремих, але далеко не всіх контролерів СО. Вартість такого оновлення порівнянна з вартістю GPS синхронізатора, а тому навіть у самому дорогому випадку налаштування координованого СУ на базі існуючих локальних світлофорів буде значно меншою ніж вартість заміни на них нових контролерів, вже не кажучи про систему збору інформації навколо перехресть.

Тому перехід до координованої роботи світлофорів у системах ОДР українських міст є більш доступним напрямом розвитку СУ.

Звичайно, що при виборі напряму розвитку систем ОДР в українських містах, також необхідно враховувати потенційну ефективність альтернатив, але з проведеного огляду вона виглядає як приблизно однакова для адаптації та координації, у порівнянні з локальним СУ. В обох випадках економія часу після адаптації або координації в проаналізованих джерелах максимально оцінюється до 30 % часу пересування, а тому низька вартість організації координованої роботи СО в українських містах є переважною у порівнянні з переходом до адаптивного СУ.

Серед основних напрямів координації виділяються її магістральна та мережева версії [117], серед яких перша є спрощеним варіантом мережевої координації, на якому легше зрозуміти основні труднощі побудови ПК, що робить її більш привабливою при створенні нового методу координації в даній роботі. До того ж ця задача є більш актуальною в українських умовах, оскільки найважливіші міста України, до числа яких відносяться адміністративні центри та інші великі міста, мають тривалу історію існування та розвитку, а тому здебільшого мають радіальну схему ВДМ, яка є результатом поступового природного розвитку міських територій [173]. Основне транспортне навантаження в таких містах доводиться на радіальні магіст-

ралі, через які здійснюється поглинаюча частина міських транспортних пересувань. Тобто, з точки зору ОДР, основний інтерес в українських містах викликають саме міські магістралі, а не фрагменти територій з прямокутним або близьким до нього плануванням ВДМ, які є переважними об'єктами для реалізації мережевої координації, а тому координація роботи СО на ММ приймається як об'єкт дослідження в даному дисертаційному дослідженні.

Безумовно, що в українських містах існують фрагменти територій з прямокутним або близьким до нього плануванням ВДМ, де актуальною є мережева координація роботи СО, але вирішення цього питання є природнім продовженням магістральної координації і перспективним напрямом подальших досліджень.

Ще однією особливістю українських міст, обумовленою загальністю процесів історичного розвитку їх територій, є наявність на більшості ММ роздільної смуги, яка суттєво розширює можливості проєктувальників в ОДР на перехрестях, так як скорочує вимоги до тривалості переходу пішоходами магістралі за рахунок ділення цього процесу на два етапи, з тимчасовим розташування пішоходів на острівцях безпеки, організованих на роздільній смузі. На більшості перехресть такої магістралі має бути виділений лівий поворот (ЛП) внаслідок значного потоку, який априорі рухається вдовж магістралі, тому навіть незначна його частина в абсолютному вимірі означає достатню для виділення окремої фази кількість ТЗ. А так як економія часу циклу за рахунок використання двофазних циклів, на окремих, сусідніх з трифазними циклами перехрестях вочевидь не приведе до покращення умов руху по всій ділянці магістралі, то розумною стає виділення ЛП в окрему фазу на всіх суміжних перехрестях фрагменту магістралі. Виключенням можуть стати крайні перехрестя фрагменту ММ, що координується, які у тому числі формують умови в'їзду ТЗ на неї з двох напрямків.

Тобто, для таких ММ з роздільною смугою існує дуже вдалий, з точки зору наповненості рухом всіх фаз СЦ, набір цих фаз, які складаються з руху ТП по магістралі прямо та направо, рис. 1.3а, лівоповоротних з'їздів з магістралі (включаючи розвороти), рис. 1.3б та дозвільних фаз для руху ТП по другорядній вулиці перехрестя у всіх напрямках, рис. 1.3в.

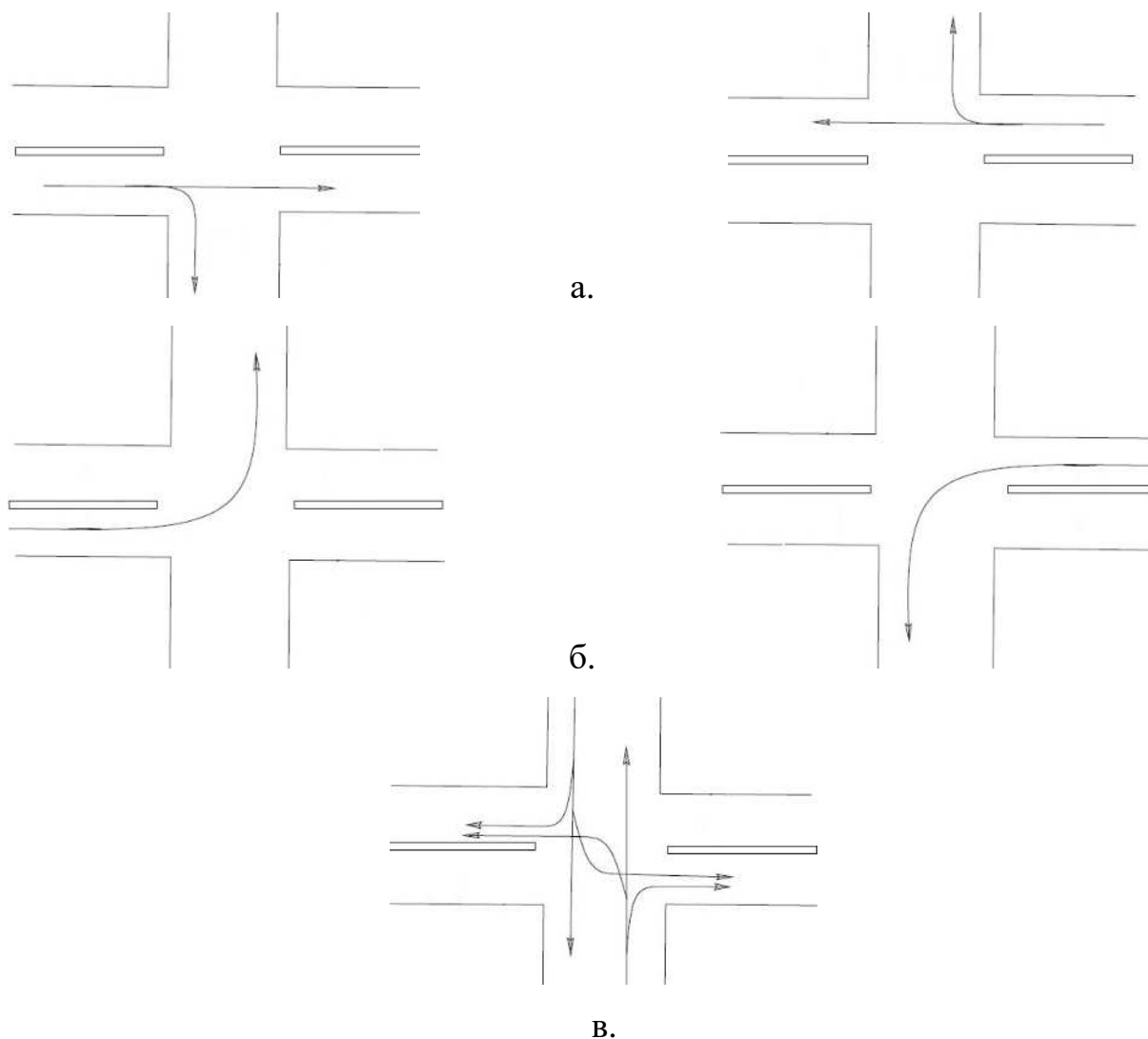


Рисунок 1.3 – Елементи можливих схем пофазного роз'їзду для ММ з роздільною смугою

Перевагами такої схеми пофазного роз'їзду є врахування всіх напрямків руху пішоходів у них, тобто відсутність необхідності виділення окремих фаз для руху пішоходів і можливість різних комбінацій сполучення прямого руху ТП по магістралі з лівоповоротними з'їздами з магістралі у різних напрямках (прямому та зворотному). Це дозволяє виділити задачу координації роботи СО на ММ з розділювальною смугою в окремий напрям розвитку таких методів, у якому необхідно глибоко вивчити можливості координації у ручному режимі задля отримання явного уявлення про проблеми магістральної координації СО.

На ММ наявні не лише лівоповоротні та правоповоротні потоки з різною інтенсивністю, які залишають пачку ЗХ на черговому перехресті, а ще випадкову кі-

лькість ТЗ, які доповнюють потік по ММ, прибуваючі до неї з другорядних напрямків. Всі ці групи ТЗ являються об'єктивною реальністю процесу руху ТЗ через ділянку ММ, що координується, до тих пір, доки не заборонені відповідні напрямки руху на всіх охоплених координацією перехрестях. Така заборона вочевидь суперечить задачі магістральної координації на рівні постановки, а тому потрібно виходити з наявності додаткових ТЗ на стоп-лінії чергового перехрестя у момент прибуття до нього пачки ЗХ. Також слід розуміти, що випадкова ширина смуги ЗХ може розглядатися як не постійна протягом ділянки ММ, що координується, тобто від перегону до перегону може змінюватися її середнє значення. Це може змінювати тривалість фази ЗХ у СЦ, що необхідно враховувати при оцінці параметрів координованого управління дорожнім рухом на ММ.

Але при цьому слід враховувати, що у випадку жорсткого СУ організатори руху на міській ВДМ лише створюють умови руху і забезпечують можливості для проїзду його учасників у деяких напрямках. Яким чином учасники руху ними скористуються, у більшому ступені залежить від самих учасників, та з точки зору ОДР тут можливі лише окремі попереджувальні заходи на кшталт встановлення інформаційних дорожніх знаків або виховної роботи серед учасників дорожнього руху із непередбаченим заздалегідь результатом. Тобто слабо передбачувана поведінка учасників, яка може спотворити будь який ПК, не підвладна проєктувальнику і на неї не варто зосереджуватися при розробці плану.

Так як результатом створення жорсткого ПК є параметри СЦ та зсуви початку їх включення, ці параметри повинні бути достатньо надійними, щоб забезпечувати стабільне функціонування ЗХ більшу частину часу доби. Не варто вимагати від ПК забезпечення ПС перехресть на ділянці, яка координується, на якомусь достатньо високому рівні, який гарантує відсутність черг на перехрестях. ПС окремого перехрестя є лімітованою величиною, яка ще й випадковим чином реалізується кожного разу, внаслідок випадкової поведінки учасників дорожнього руху на ньому. З іншого боку, за відсутності спеціальних обмежень, інтенсивність прибуття ТЗ і інших учасників руху на чергове перехрестя нічим не обмежена, що обумовлює не нульову ймовірність перевищення інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя будь-

якої його ПС. Тому й перевантаження ЗХ у цілому завжди можливе, що обумовлює необхідність оцінки ефективності ПК за середніми значеннями протягом різних періодів доби.

Як показник ефективності побудови ПК слід прийняти комплексний показник, який відображає час подорожі і кількість зупинок на шляху прямування ТЗ, тому що він безпосередньо відображає якість руху з точки зору водіїв, для задоволення чийх потреб план і створюється.

Бажаним методом кінцевої оцінки ефективності функціонування ЗХ має бути обробка результатів реальних поїздок по всім можливим напрямкам руху вздовж ділянки ММ, що координується, та через неї, до і після впровадження ПК. Як допоміжний метод оцінки, особливо в ході проведення пошукових досліджень, може виступати імітаційне моделювання об'єкта.

Але у процесі побудови ПК необхідною є поточна оцінка ефективності побудови ПК, на основі якої мають прийматися поточні рішення відносно напрямів зміни параметрів ПК, для чого необхідно використовувати залежності для часу та кількості зупинок. При чому базою для розрахунку часу має бути не весь час поїздки, а лише та його частина, яка, в основному, змінюється при координації – час очікування дозволяючого сигналу світлофора. Обґрунтування такої моделі має стати однією із задач теоретичної частини дослідження.

Ще одним питанням на шляху створення нового методу побудови раціонального ПК на ММ є необхідність визначитися з основними поняттями цього процесу, до числа яких відносяться синхронізація та координація роботи СО.

Згідно з тлумачним словником української мови [176] **СИНХРОНІЗАЦІЯ** означає приведення до синхронізму двох або кількох періодично змінних явищ чи процесів, а **СИНХРОНІЗМ** – це точний збіг у часі двох або кількох явищ чи процесів; одночасність.

Більших вимог, ніж одночасність, до синхронізації не пред'являється, тому з точки зору створення ПК, синхронізація досягається вже на стадії узгодження єдиної тривалості СЦ для всіх СО ділянки ММ, що координується.

**КООРДИНАЦІЯ**, у свою чергу, це погодження, зведення до відповідності,

установлення взаємозв'язку, контакту в діяльності людей, між діями, поняттями тощо [176]. Тобто це поняття має більш широке значення по відношенню до синхронізації та додатково потребує відповідності чомусь. У даному випадку ПК повинен відповідати ТП, які рухаються по магістралі, так як покращення умов руху ТЗ є головною метою створення ПК. Відповідність до ТП досягається визначенням розподілу ОТ всередині всіх циклів і зсувів початку роботи циклів, тобто основних параметрів жорсткого ПК.

Тобто під координацією варто вважати визначення змісту СЦ на перехрестях, які змінюють свою роботу та відносних зсувів початку їх роботи, а синхронізація роботи СО передбачає встановлення єдиної для декількох СО тривалості СЦ.

Для реалізації цих пунктів координації необхідне створення нового методу формування ПК на ММ, який має враховувати особливості цього процесу, що полягають у груповому прибутті ТЗ з пачки ЗХ на чергове перехрестя фрагменту ММ, наявність ТЗ, які доповнюють пачку ЗХ починаючи з другого перехрестя фрагменту і додаткові можливості у налаштуванні ПК, які забезпечують наявність роздільної смуги на ділянці та СЦ з виділенням в окрему фазу ЛП. Оцінка ефективності нового ПК повинна враховувати особливості прибуття ТЗ до координованих перехресть ММ з різних напрямків і спиратися на фактичні результати поїздок через ділянку ММ, що координується.

## Висновки по першому розділу

1. Аналітичні підходи до вирішення питань організації світлофорного регулювання ТП у містах в останні роки практично повністю витиснені евристичними методами, що обумовлене складністю даних питань внаслідок великої кількості взаємодій в об'єктах управління.

2. Методологічною основою досліджень у даному напрямку в останні роки стали методи мікросимуляції та штучний інтелект, що обумовлюється бажанням

дослідників отримати діючі інструменти управління ТП у містах з мінімальною участю людини в процесі прийняття рішень. Але вони не в змозі гарантувати загальність отриманих рішень і надати зрозуміле пояснення процесів, які відбуваються у транспортних системах, не привели до переконливих результатів з практичної точки зору та жоден з них не отримав поширеного розповсюдження, що свідчить про необхідність продовження досліджень у цій сфері.

3. Проаналізовані дослідження не надають зрозумілих вказівок на ефективні напрями розвитку систем СУ в містах, а більшість робіт присвячена налаштуванню адаптивних СО на забезпечення адекватної реакції світлофорів на динамічний характер ТП, у тому числі в мережах, де функціонує декілька СО. При цьому не можна вважати вичерпною відповідь на питання щодо більшої перспективності адаптивного СУ в порівнянні з координованою роботою світлофорів у жорсткому режимі регулювання.

4. Найкращі кількісні оцінки результатів застосування альтернативних заходів з удосконалення роботи СО в основному отримані за допомогою імітаційного моделювання і не супроводжуються переконливим обґрунтуванням досягнутого ефекту. За цими оцінками ефективність окремого застосування методів адаптації або координації роботи СО коливається навколо 10% скорочення часу поїздки відносно базового варіанту ОДР. Оцінки ефекту від сумісного їх застосування, тобто координація роботи адаптивних СО, перевищують 20% скорочення часу поїздки безпосередньо координованим фрагментом ВДМ відносно базового варіанту, але вони не відображають впливу заходів на інші пов'язані ТП, для яких умови руху внаслідок створення ЗХ на ММ зазвичай погіршуються.

5. Методичні керівництва з ОДР різних країн пропонують використовувати для створення планів координації ПЧД лінійної координації, хоча при цьому визнають її занадто спрощений характер і не надають чітких рекомендацій стосовно особливостей її практичного використання. Усунення недоліків ПЧД створює потенційні можливості для отримання більш переконливих результатів жорсткої координації, ніж існуючі на цей час. Іншим варіантом створення ПК є застосування існуючого на цей час різноманітного ПЗ з жорсткої або адаптивної координації, яке

зазвичай використовують спрощені моделі для створення ПК і не продемонстрували високих результатів.

6. У зв'язку з особливостями територіального планування міст України, які здебільшого мають радіальну схему ВДМ, основне транспортне навантаження в яких приходить на радіальні магістралі, через які здійснюється поглинаюча частина міських транспортних пересувань, а тому координація роботи світлофорів на ММ має бути основним об'єктом уваги в межах даного дисертаційного дослідження.

7. Необхідно продовжувати пошук аналітичних залежностей для вирішення питань, які виникають при плануванні роботи СО у містах, оскільки лише аналітичні моделі надають можливості для повного розуміння процесів, які властиві об'єкту дослідження та створюють необхідну основу для прийняття обґрунтованих рішень у складних питаннях.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [1-5, 9, 10].

## РОЗДІЛ 2

# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ МЕТОДУ КООРДИНОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА МІСЬКИХ МАГІСТРАЛЯХ

Виходячи з результатів виконання першого розділу дисертації, основною задачею цього розділу є обґрунтування методу формування плану магістральної координації, який дозволить забезпечити скорочення часу подолання координуємої ділянки ММ та кількості зупинок ТЗ, які рухаються через ділянку в усіх напрямках. Цей метод має враховувати всіх основних учасників дорожнього руху навколо координованого фрагменту ММ і супроводжуватися критеріальною оцінкою альтернативних варіантів ПК та окремих етапів побудови плану, отримання якої є другим напрямом теоретичних досліджень.

### 2.1 Обґрунтування методу формування плану магістральної координації

Результати аналізу існуючих методів створення ПК та відсутність переконливих прикладів ефективної ЗХ в Україні свідчать про необхідність створення нової, детально обґрунтованої технології координованого управління ТП на ММ. Пріоритетним для українських міст на цей час має бути жорсткий режим координації, як найбільш доступний з економічної і технологічної точки зору. Окрім цього, розробка ефективного методу побудови жорсткої ЗХ надасть змогу покращити існуючі методи адаптивного СУ координованих ділянок ММ на ВДМ міст як наступного кроку на шляху розширення можливостей проєктувальників систем ОДР.

Обов'язковою умовою роботи ЗХ є синхронна робота всіх світлофорів, що включені до ПК. Власне, план жорсткої магістральної координації – це і є параметри СЦ та відносний час початку циклу в загальній для всіх об'єднаних світлофорів

часовій шкалі. Синхронізація роботи світлофорів досягається за рахунок однакової тривалості їх циклів. Тривалість СЦ визначається рівнем навантаження на перехрестя – чим більше навантаження, тим тривалішим має бути цикл, тому вирівнюватися цикли мають по максимально навантаженому перехрестю на ділянці ММ, що координується, як це і робиться у діючих рекомендаціях [24, 97].

Основною проблемою при побудові ЗХ є налаштування ПК таким чином, щоб рух ТЗ по магістралі був безперервним в обох напрямках. Але відсутність чітких вказівок щодо побудови ПК, за умови відсутності відповідного ПЗ, часто призводить до ситуації, коли створені у реальному житті ПК не забезпечують безупинного руху на магістралі навіть у головному (основному) напрямку. Можливості організації зустрічної ЗХ визначаються ступенем відповідності часу подолання ділянок магістралі обраному СЦ та, у загальному випадку, є дуже обмеженими. Але при рівній довжині фрагментів магістралі між перехрестями на координованій ділянці існує такий СЦ, при якому можливо створення ПК з абсолютно рівними умовами руху по магістралі в обох напрямках.

Враховуючі це, при побудові ЗХ, можливі два альтернативних підходи до вибору тривалості циклу в ПК: перший, заснований на інтенсивності ТП на перехрестях, і другий, заснований на геометричних параметрах координованої ділянки ММ. Для другого випадку, при суттєвій різниці у довжині фрагментів магістралі на координованій ділянці, взагалі можуть існувати декілька раціональних циклів. У загальному випадку розрахункові цикли не співпадатимуть та, більше того, можуть істотно відрізнятися один від одного в залежності від довжини перегонів на координованій ділянці ММ. Оскільки у діючих методиках відсутня відповідь на це протиріччя, це в основному й призводить до не зовсім переконливих результатів побудови ЗХ у багатьох випадках.

Для подолання цього протиріччя до методу побудови ЗХ на ММ необхідно ввести керуючий параметр, який буде впливати на тривалість СЦ в ПК, та надати кількісну оцінку результатам його побудови. Таким керуючим параметром доцільно прийняти максимальну довжина групи ТЗ в ЗХ, які рухаються у виділеному для них часовому коридорі без зупинок. Така щільна група (пачка) формується першим

світлофором на координованій ділянці магістралі в кожному напрямку. Її розмір визначається кількістю легкових автомобілів у ній, яка носить назву довжини пачки ЗХ. Часовим аналогом довжини пачки ЗХ є ширина смуги ЗХ – тривалість дозвільного сигналу для руху ТЗ у напрямку прямо та направо в секундах.

При відомих значеннях ІР ТЗ через ділянку ММ, що координується, вказання початкової довжини групи автомобілів ЗХ надає змогу оцінити відповідну кількість ТЗ, які у середньому рухаються в інших напрямках на всіх перехрестях ділянки протягом одного СЦ, оскільки довжина пачки також відповідає одному циклу. Початкова довжина групи автомобілів у прямому та зустрічному напрямках може бути різною й кожному значенню буде відповідати власний набір груп ТЗ, які у середньому можуть проїжджати через кожне перехрестя ділянки ММ, що координується. Коли довжини груп автомобілів задані для обох напрямків, а СЦ – один, то пропорційно їм, на підставі фактичних інтенсивностей ТП можливо розрахувати середню кількість всіх ТЗ, які рухаються в інших напрямках, і для них прорахувати час, необхідний для їхнього проїзду через перехрестя, на основі тривалості проїзду перехрестя одним ТЗ, який можна орієнтовно визначити з величини потоку насичення, загальноприйнятого та досить обґрунтованого параметру [24].

Що стосується визначення довжини пачки ЗХ, то її величина потенційно здійснює значний вплив на сумарну оцінку часу очікування можливості проїзду ТЗ чергового перехрестя в усіх напрямках руху. Цей вплив відображається як у скороченні часу затримки для окремих ТЗ, так й збільшенні цього часу для інших ТЗ. У разі збільшення розмірів пачки знижується сумарний час затримки для ТЗ, які рухаються по магістралі, через зниження навантаження на в'їзді у хвилю. Але, при цьому, може зростати час очікування зеленого сигналу на другорядному та лівоповоротному напрямках через зростання навантаження на них, обумовленого сталим часом обслуговування цих напрямків у зростаючому СЦ.

Протилежні тенденції у часі очікування ТЗ можливості проїзду через ділянку ММ, що координується, приводять до утворення оптимуму (мінімуму) сумарного часу затримки для всіх ТЗ у ПК. Разом з тим зростають резерви часу в некритичних циклах, чиє використання на користь другорядного та лівоповоротного напрямків

руху може ще більше посилити ефект від ПК. Однак, у випадку з короткими довжинами перегонів, збільшення розміру пачки в прямому напрямку ускладнює підбір безупинного варіанту зустрічної ЗХ через зростання часу циклу. Також значно ускладнюється вибір симетричного циклу на критичному перехресті.

Передбачити всі наслідки вибору тієї чи іншої довжини пачки ЗХ у кожному напрямку на етапі теоретичних розрахунків дуже складно та, без багатого досвіду створення ПК на практиці, є не вірним. Тому в даному дослідженні метод формування раціонального ПК передбачає вибір довжини пачки ЗХ проєктувальником у ручному режимі, на основі значень критерія ефективності, який відповідає кожній парі значень довжини пачки у прямому і зворотному напрямках.

Загальний критерій ефективності ПК  $E$  формалізовано виглядає як:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N d_i + s \sum_{i=1}^N n_{si}}{N} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де  $N$  – кількість ТЗ для яких формується ПК, од.;

$d_i$  – сумарна затримка  $i$ -го ТЗ під час подолання ділянки ММ, що координується, с;

$s$  – перевідний коефіцієнт від кількості зупинок до часу очікування,  $s = 20$  с [174, 175];

$n_{si}$  – кількість зупинок  $i$ -го ТЗ під час подолання ділянки ММ, що координується, од.

Кількість ТЗ, для яких формується ПК, визначається вихідними даними, які представляють собою набір інтенсивностей ТП на ділянці ММ, що координується. У першому наближенні він має складатися з кількості ТЗ, які подолують шукану ділянку протягом однієї години під час проведення обстеження інтенсивності ТП на ній.

Так, як більшому значенню довжини пачки в одному напрямку вочевидь відповідає також й більша довжина пачки у зворотному напрямку, перебір можливих

варіантів їх сполучення, з урахуванням дискретного характеру цих величин, не буде довготривалим і цілком підійде на першому етапі використання методу, що створюється, тим більше, що ще однією з основних цілей даного етапу досліджень являється поглиблене вивчення власне процесу створення раціональних ПК на ММ та оцінки реальних ситуацій, які на цьому шляху виникають.

Загальний перелік різних ТЗ, які в залежності від напрямку руху рухаються по магістралі та через неї, разом з групами пішоходів, які обслуговуються паралельно, виглядає наступним чином:

- ТЗ, які рухаються в пачці ЗХ прямо і праворуч, та пішоходи, які перетинають другорядні під'їзди до ММ;
- ТЗ з пачки ЗХ, які повертають наліво, та пішоходи, які перетинають зустрічну половину магістральної вулиці до центральної розділювальної смуги;
- ТЗ, які прибувають до перехресть на ММ з другорядних під'їздів, та пішоходи, які завершують перехід магістралі від центральної розділювальної смуги через ту її половину, по якій рухається пачка ТЗ ЗХ;
- додаткові ТЗ з другорядних під'їздів, які доповнюють пачку ЗХ, та пішоходи, які перетинають другорядні під'їзди до ММ.

Кількісні характеристики цього набору учасників руху в ПК формуються за допомогою обстеження фактичної інтенсивності ТП у кожному напрямку у відповідності до рис. 2.1., на якому відображається структура ТП в одному напрямку руху по координованому фрагменті ММ, який складається з  $n$  перехресть.

ІР пішохідних потоків у даній роботі розглядається як фонове навантаження на ПК, тобто вважається, що при реалізації ПК всі пішоходи зможуть здійснити перехід через ділянки ВДМ, які ним потрібні. Виконання цієї умови забезпечується дотриманням заздалегідь визначених обмежень на мінімальну тривалість кожного ОТ СЦ. Вона розраховується виходячи зі швидкості руху пішоходів і ширини проїзної частини вулиць, яка ними перетинається. Тут можливо згадати, що наявність розділової смуги на ММ дозволяє скоротити мінімальну тривалість окремих тактів у СЦ і, тим самим, підвищити гнучкість налаштування ПК на фактичні потоки учасників руху.

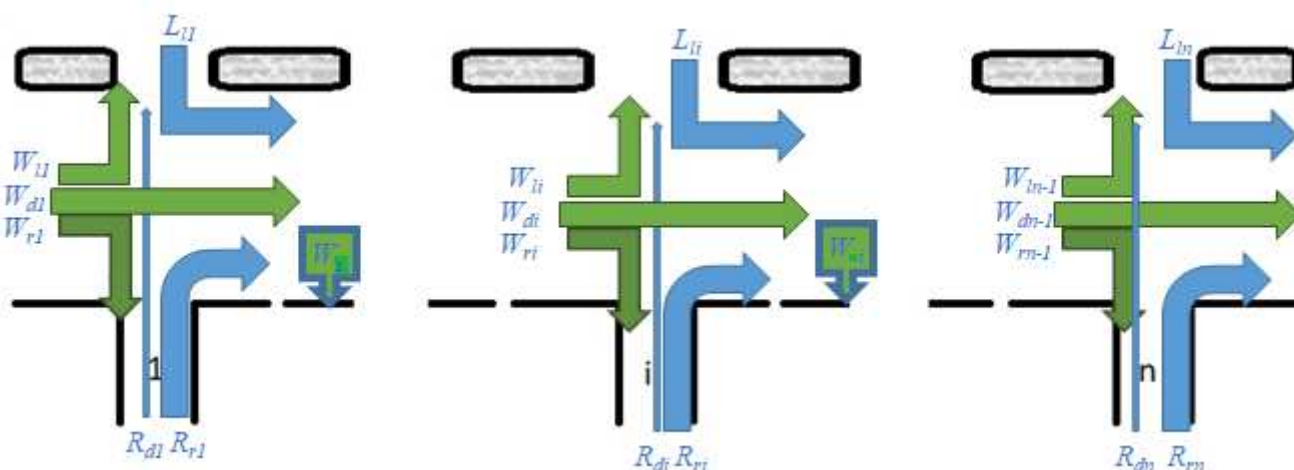


Рисунок 2.1 – Структура ТП, які складають ЗХ у одному напрямку руху

На рис. 2.1 використана система позначень, у якій напрямок руху позначається прописною літерою латинського алфавіту, серед яких  $W$  – позначає ТЗ, які рухаються до чергового перехрестя вздовж ММ, що координується;  $L$  – позначає ТЗ, які прибувають до ділянки ММ, що координується по другорядній дорозі з лівого боку;  $R$  – позначає ТЗ, які прибувають до ділянки ММ, що координується по другорядній дорозі з правого боку. Перший індекс позначає напрямок руху відповідного ТП після перехрестя: прямо  $d$ , направо  $r$  і наліво  $l$ , відповідно. Другий індекс у позначенні ТП відноситься до порядковому номеру перехрестя на ділянці ММ, що координується.

Тобто,  $W_{ri}$  позначає ТП, якій під'їхав до  $i$ -го перехрестя ділянки ММ, що координується, у складі пачки ЗХ та повертає направо на цьому перехресті.

Додатково прописною літерою латинського алфавіту  $W$  позначається кількість ТЗ, які прибувають до перегону ММ, розташованого після перехрестя, номер якого відображається в індексі додаткового ТП, або відправляються від нього. До них відносяться ТЗ, які паркуються вздовж узбіччя цього перегону (від'їжджають від узбіччя), заїжджають у двори на цьому перегоні (виїжджають з них) або прибувають до даного перегону ММ з місцевих проїздів, на яких не встановлені СО (повертають до них). Позитивне значення цього показника означає прибуття ТЗ до перегону, негативне – відправлення.

Після розрахунку годинних інтенсивностей ТП за даною схемою, на підставі

обстеження фактичних ТП, проєктувальником вказується довжина пачки ЗХ на першому перехресті координованої ділянки. Для всіх ТЗ, які прямують через це перехрестя в інших напрямках, відома довжина пачки дозволяє через лінійну пропорцію фактичних інтенсивностей ТП розрахувати середні значення кількості ТЗ, які припадають на один СЦ. На основі цих кількостей і середнього часу проїзду перехрестя одним ТЗ у відповідному напрямку, розраховується необхідна для них тривалість ОТ СЦ. Після цього, за допомогою лінійної пропорції розраховується довжина пачки на наступному перехресті і визначається тривалість ОТ на ньому.

Кінцеве значення тривалості ОТ на перехрестях визначається як максимальне значення з часу подолання перехрестя відповідних груп ТЗ або пішоходів. Після цього розраховується тривалість всього СЦ на кожному перехресті координованого фрагменту ММ, як сума часу обслуговування всіх учасників руху в циклі, разом з тривалістю проміжних сигналів. Загальна (системна) тривалість СЦ в ПК призначається по максимальному з усіх циклів.

Після цього стає можливим розрахувати середнє значення часу затримки для всіх ТЗ, які долають ділянку ММ, що координується, оскільки відомими становляться всі фактори, які визначають її величину, виходячи з формули Вебстера (1.1). Цей розрахунок виконується на основі припущення про відсутність додаткових затримок на перехрестях у зворотному напрямку, тобто про нормальне функціонування ЗХ в обох напрямках, хоча саме таке налаштування зворотної ЗХ і є основною проблемою побудови ПК. Але використання цього припущення надає змогу обрати раціональну величину пачки ЗХ в прямому та зворотному напрямку, яка забезпечить мінімальні затримки ТЗ з урахуванням зупинок на ділянці ММ, що координується, за критерієм (2.1).

Зрозуміло, що реальний ПК буде забезпечувати гірші умови руху в зворотному напрямку, але це погіршення буде траплятися відносно абсолютного мінімуму критерію (2.1), то ж потенційно, з високою ймовірністю, буде приводити й до реального мінімуму та практично гарантовано – до раціонального рішення, з меншими затримками, ніж у локальному режимі СУ. Заздалегідь передбачити наслідки налаштування зворотної ЗХ на аналітичному етапі розрахунку неможливо, втім ніхто не

забороняє дослідити і ПК, які розпочинаються не з оптимальних значень довжини пачки, але це питання у даному дослідженні не розглядається, а вважається напрямом подальших досліджень.

Перехрестя з максимальним циклом вважається критичним і саме від нього починається побудова ЗХ у зустрічному напрямку руху по магістралі. Так, як тривалість інших, некритичних циклів менше максимального, у них з'являються резерви – вільні проміжки часу, які можна використовувати для налаштування зустрічної хвилі, користуючись можливістю зсуву потоків у зустрічній групі на вільні проміжки в циклі.

На ММ з роздільною смугою для налаштування зустрічної ЗХ з'являються додаткові можливості, якщо СО мають виділену фазу для лівого повороту з магістралі. Вона дозволяє розпочинати ОТ для ЗХ не обов'язково одночасно, з нею можна суміщати початок або закінчення ОТ з рухом лівоповоротних ТЗ у тому же напрямку. Це дає три можливих точки розташування ОТ ЗХ у зустрічному напрямку відносно ОТ ЗХ прямого напрямку, відстань між якими визначається тривалістю фази ЛП у прямому і зустрічному напрямках.

Кількість можливих розташувань ОТ прямої та зустрічної ЗХ на координованому фрагменті ММ, який складається з  $n$  перехресть, можна оцінити як  $3^n$ . З урахуванням наявності резервів часу для СЦ на  $n-1$  перехресті, вибір найкращого ПК шляхом налаштування зустрічної ЗХ стає достатньо складним завданням. На початку використання створеного методу побудови ПК, таке налаштування має виконуватися вручну, внаслідок неможливості формалізації цього процесу без достатнього досвіду побудови реальних ПК. З цією метою цього необхідно забезпечити проєктувальника відповідним ПЗ, яке дозволить зробити наочними результати прийняття рішень, має зручні інструменти для зміни параметрів СЦ на всіх перехрестях і супроводжує кожний альтернативний варіант ПК оцінкою часу затримок ТЗ у ньому. Зручною основою для наочного відображення ПК являється ПЧД, яку слід дещо перетворити, щоб відобразити особливі риси створеного методу. Розробка необхідного ПЗ є одним з практичних завдань даного дослідження.

В цілому, запропонований метод побудови ПК роботи СО на ММ може бути

представлений у вигляді наступних етапів його реалізації:

1. Вибір об'єкта магістральної координації.
2. Оцінка геометрії обраного фрагменту міської магістралі.
3. Завдання параметрів побудови ПК.
4. Обстеження інтенсивності ТП на перехрестях фрагменту.
5. Розрахунок годинної інтенсивності ТП на смузі руху в кожному напрямку.
6. Завдання довжини пачки автомобілів у ЗХ за обома напрямками руху.
7. Розрахунок кількості автомобілів, які мають подолати перехрестя за цикл, включаючи додаткові автомобілі, які з'являються на шляху руху ЗХ з інших напрямків.
8. Розрахунок тривалості ОТ і СЦ в цілому на кожному перехресті координованого фрагменту ММ.
9. Визначення системної тривалості СЦ в ПК, як максимального значення з усіх циклів.
10. Перерахунок СЦ на некритичних перехрестях.
11. Аналітична оцінка часу затримок на перехрестях у всіх напрямках руху.
12. Вибір оптимальної довжини пачки у прямому і зустрічному напрямках, що мінімізують сумарний час затримок ТЗ, з урахуванням кількості зупинок.
13. Розрахунок зсувів початку циклу для перехресть відносно початку ЗХ в прямому напрямку.
14. Побудова графіку ЗХ з параметрами «за замовченням» у прямому і зустрічному напрямках у спеціальному ПЗ.
15. Налаштування зустрічної ЗХ за рахунок резервів на некритичних перехрестях і можливостей різного розташування фази ЛП.
16. Вибір раціонального варіанту налаштування ПК і кінцева оцінка сумарних затримок ТЗ на перехрестях за всіма напрямками руху.
17. Практична реалізація створеного ПК.

Запропонований метод побудови ПК роботи СО на ММ має бити перетворений у відповідну методику, яка дозволить довести його до практичного застосування.

ня завдяки визначенню всіх необхідних для цього параметрів і створенню спеціального ПЗ для його реалізації. До числа таких параметрів відносяться:

1. Максимальні рівні навантаження за напрямками руху.
2. Швидкість руху пішоходів.
3. Мінімальна тривалість дозвільного сигналу світлофора для всіх ОТ СЦ.
4. Швидкість руху ТЗ у ЗХ.
5. Тривалість жовтого сигналу перед включенням дозвільного сигналу для ЗХ, ЛП з ММ, і другорядних напрямків.
6. Час зайняття перехрестя автомобілем для ЗХ, другорядних напрямків, ЛП і додаткових автомобілів.
7. Виділений час на старт та розгін додаткових автомобілів.
8. Діапазон можливих значень довжини пачки ТЗ у ЗХ.

Для більшості з цих параметрів у нормативній літературі існують відомі орієнтири, але деякі з них потребують поглибленого вивчення. У першу чергу це стосується максимального рівня навантаження на другорядних під'їздах до координованих перехресть ММ і діапазону можливих значень довжини пачки ТЗ у ЗХ.

На ММ, для якої створюється ПК, навантаження на координоване перехрестя слабо залежить від тривалості циклу, так як прибуття більшості ТЗ до нього не є випадковим і супроводжується виділенням відповідного до довжини пачки часу в циклі. В той же час, збільшення тривалості циклів на некритичних перехрестях призводить до зростання рівня навантаження на другорядних під'їздах до перехрестя. З врахуванням зазвичай значно меншої ІР ТП на них, їх вплив на загальні затримки є невеликим, що може призвести до суттєвого погіршення умов руху на під'їздах до ММ при розрахунку ПК. Тому, для забезпечення прийнятної рівня обслуговування ТЗ на другорядних напрямках, рівень завантаження цих напрямків потрібно обмежити деяким максимальним значенням.

Воно має визначатися за умови запобігання значного зростання витрат часу ТЗ, які прибувають до перехресть координованого фрагменту ММ з другорядних під'їздів. Відсутність точної аналітичної оцінки часу затримок на регульованому перехресті вимагає створення моделі, яка точно описує затримки ТЗ в доступних

для аналітичного моделювання умовах з наступним її розширенням на увесь діапазон навантаження за допомогою імітаційного експерименту з різними умовами обслуговування ТЗ, подібними тим, що зазвичай зустрічаються на під'їздах до ММ. Поряд з цим потрібно перевірити можливість використання формули Вебстера для оцінки часу затримок ТЗ на перехрестях. Це необхідно для практичної реалізації запропонованого методу побудови ЗХ на ММ, яка потребує кількісної оцінки ефективності альтернативних ПК.

Що стосується діапазону можливих значень довжини пачки ТЗ у ЗХ, то вимоги до нього у загальному сенсі викликані обмеженістю за довжиною фрагменту ММ, що координується. Ця обмеженість обумовлює наявність двох видів ТЗ, які рухаються через неї: групи ТЗ, сформовані на перехрестях, які рухаються вздовж ММ та випадкові ТЗ, які прибувають до першого координованого перехрестя ММ (також із другорядних напрямків, але це питання розглянуте у попередніх абзацах даного підрозділу). Перший СО координованого фрагменту ММ здійснює формуючий вплив на функціонування всього ПК і обумовлює ефективність його побудови, яка потенційно може помітно знижуватися у випадках, коли на ньому виникає неповна пачка ТЗ, тобто черга ТЗ роз'їжджається раніше закінчення дозвільного сигналу світлофору. Виходячи саме з цих умов має визначатися діапазон можливих значень довжини пачки ТЗ у ЗХ. Для вирішення цього стратегічного питання побудови ПК, необхідно знати вид залежності ймовірності виникнення неповної пачки ТЗ на в'їзді до координованого фрагменту ММ від рівня навантаження на ньому, який повністю обумовлюється довжиною пачки ТЗ у ЗХ.

## 2.2 Аналітичне моделювання часу затримки транспортних засобів на ізолюваному регульованому перехресті міських вулиць з трифазним циклом регулювання

Огляд існуючих методів оцінки часу затримки ТЗ на ізолюваних регульова-

них перехрестях міських вулиць показав, що основною на цей час слід вважати формулу Вебстера, хоча вона неодноразово піддавалася критиці з боку сучасних дослідників, наприклад, у роботах [177-180], але практично всі їх спроби дають результати, подібні до моделі Вебстера, носять емпіричний характер і мають суттєве обмеження у використанні за рівнем завантаження, який має бути значно меншим одиниці. Отримати належну аналітичну модель часу затримки ТЗ на регульованому перехресті поки що не вдалося, тому метою даного етапу дослідження є аналітична оцінка часу затримки ТЗ на регульованих перехрестях, що мають трифазний цикл світлофорного регулювання. Вона має забезпечити об'єктивну оцінку часу затримки ТЗ на перехресті та зрозуміти її закономірності. Як значення затримки приймається її нижня оцінка, тобто час виключно тривалість очікування можливості проїзду через перехрестя, без втрат часу на уповільнення та прискорення. При формуванні аналітичної моделі, перехрестя вважається ізольованим, тобто використовується припущення про найпростіший потік ТЗ, що прибувають до нього [177]. Окрім цього вважається, що під час зеленого сигналу всі ТЗ з черги перед СО встигають проїхати через перехрестя. Така ситуація характерна для низького рівня завантаження відповідного напрямку руху та являється найбільш прийнятною основою для визначення раціональних параметрів світлофорного регулювання.

Об'єктом моделювання обраний трифазний СО розташований на перехресті ММ з центральною розділювальною смугою. Такий режим роботи забезпечує максимально комфортні умови виконання ТЗ ЛП з магістралі на прилеглі вулиці та безпечне пересічення пішоходами широкої проїжджої частини магістралі в два етапи, з тимчасовим находиттям на острівці безпеки. У трифазному циклі для кожної з вказаних цілей призначені окремі фази. Цей цикл вважається досить вдалим для перехрестя ММ з центральною розділювальною смугою та другорядних доріг, оскільки він не містить окремих фаз для пішоходів, які завжди переходять вулицю паралельно дозволеному напрямку руху ТЗ.

Критичним для такого варіанту регулювання руху на перехресті є ОТ, виділений для виконання ЛП з магістралі на другорядні дороги, яка значно знижує ПС перехрестя для основних напрямків і може стати інструментом покращення умов

руху на ньому, особливо при координованій роботі світлофорів.

На трифазному регульованому перехресті магістралі та другорядної дороги діють три напрямки  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  потоків ТЗ, для яких існують дозволяючи або забороняючи сигнали світлофорів, два з яких взаємно перпендикулярних руху та один лівоповоротній,  $\gamma$ , з магістралі на другорядну дорогу, рис. 2.2.

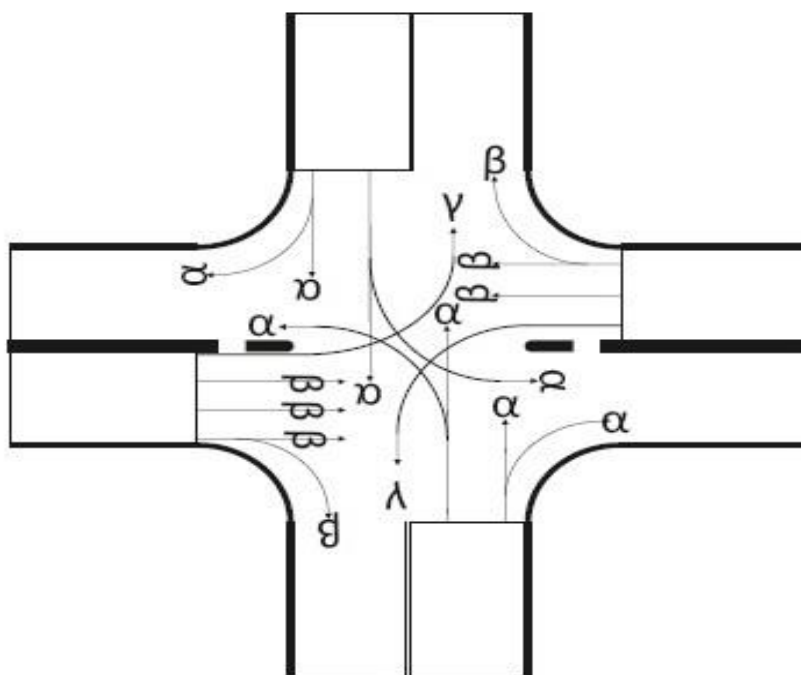


Рисунок 2.2 – Типове трифазне регульоване перехрестя ММ з центральною розділювальною смугою

В кожному циклі зустрічається по одному зеленому сигналу для кожного напрямку, протягом якого дозволяється рух у ньому, тривалість яких складає  $T_\alpha$ ,  $T_\beta$  та  $T_\gamma$ , відповідно. В інший час у циклі рух транспорту у відповідному напрямку заборонений:

$$\begin{aligned} T^{(\alpha)} &= T - T_\alpha \\ T^{(\beta)} &= T - T_\beta, \\ T^{(\gamma)} &= T - T_\gamma \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $T^{(\alpha)}$ ,  $T^{(\beta)}$ ,  $T^{(\gamma)}$  – тривалість сигналу світлофора, що забороняє рух у на-

прямок  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$  відповідно;

$T$  – тривалість СЦ з врахуванням проміжних тактів, с.

У даній частині роботи розглядається третій напрямок руху  $\gamma$ , який зазвичай має одну смугу, а тому всі подальші міркування викладаються саме для односмугового під'їзду до СО. Перехід до багатосмугових під'їздів можливий шляхом переводу інтенсивності відповідного ТП в односмуговий вимір.

Всі ситуації під'їзду ТЗ до перехрестя розділяються на два основних види подій: подія  $A = \{\text{ТЗ під'їжджає до перехрестя, потрапляє на дозвільний сигнал СО і без очікування його включення проїжджає через перехрестя}\}$  та подія  $B = \{\text{ТЗ під'їжджає до перехрестя на забороняючий сигнал СО і стає } k\text{-м в чергу ТЗ, що очікують дозвільного сигналу, } k \geq 1\}$ .

У першому випадку у ТЗ, що рухається через перехрестя втрат часу немає. А для другого випадку (подія  $B$ ) необхідно знайти відповідне математичне сподівання часу, втраченого бажаним проїхати через перехрестя ТЗ.

Для другої події як вихідна інформація виступають тривалість  $T_z$  забороняючого сигналу СО, інтенсивність ТП перед перехрестям в певному напрямку  $\mu$ , математичне сподівання  $\Delta$  часу зайняття ТЗ перехрестя в період роз'їзду.

У припущенні, що роз'їзд потоку ТЗ в період дозвільного сигналу триває принаймні до тих пір, поки всі ТЗ роз'їдуться, за умови, що ТЗ, який став  $k$ -м ( $k \geq 1$ ) в чергу та очікує дозволяючого сигналу світлофора, прибуде туди в момент  $t$  від початку забороняючого сигналу,  $0 < t < T_z$ , умовне математичне сподівання втраченого часу таким ТЗ  $Z_B(k, t)$  на регульованому перехресті дорівнює

$$Z_B(k, t) = (T_z - t) + (k - 1)\Delta \quad .(2.3)$$

$$k \geq 1; \Delta > 0; 0 < t < T_z,$$

Для того, щоб знайти умовне математичне сподівання  $Z_B$  втраченого ТЗ часу на перехресті при здійсненні події  $B$ , необхідно умовну ймовірність  $Z_B(k, t)$  помножити на щільність розподілу Ерланга з параметрами  $\mu$  і  $k$  [188]

$$f(t) = \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t), \quad (2.4)$$

для моменту часу  $t$  прибуття ТЗ до перехрестя  $k$ -м в чергу під час дії забороняючого сигналу СО та отриманий добуток проінтегрувати за всіма моментами часу  $t$  від 0 до  $T_3$ , а потім отримані інтеграли підсумувати по всіх натуральних числах  $k \geq 1$ :

$$\begin{aligned} Z_B &= \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) Z_B(k, t) dt = \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) [(T_3 - t) + (k-1)\Delta] dt = \\ &= \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} (T_3 - t) \exp(-\mu t) dt + \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} (k-1)\Delta \exp(-\mu t) dt = \\ &= \mu \int_0^{T_3} (T_3 - t) \sum_{k \geq 1} \frac{(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) dt + \mu \Delta \int_0^{T_3} \sum_{k \geq 1} (k-1) \frac{(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) dt = \\ &= \mu \int_0^{T_3} (T_3 - t) dt + \mu \Delta \int_0^{T_3} \mu t \sum_{k \geq 2} \frac{(\mu t)^{k-2}}{(k-2)!} \exp(-\mu t) dt = \left( -\mu \frac{(T_3 - t)^2}{2} \right) \Big|_0^{T_3} + \mu^2 \Delta \frac{t^2}{2} \Big|_0^{T_3} = \\ &= \mu \frac{T_3^2}{2} + \mu^2 \Delta \frac{T_3^2}{2} = \mu T_3 (1 + \mu \Delta) \frac{T_3}{2}. \end{aligned}$$

Відношення сумарного умовного математичного сподівання  $Z_B$  втраченого часу ТЗ за цикл за умови здійснення події  $B$  до середнього числа  $\mu T_3$  ТЗ, що прибувають за час забороняючого сигналу  $T_3$  з інтенсивністю  $\mu$  на перехрестя, надає

$$Z_B^{(1)} = \frac{Z_B}{\mu T_3} = (1 + \mu \Delta) \frac{T_3}{2}, \quad (2.5)$$

умовне математичне сподівання  $Z_B^{(1)}$  втраченого одним ТЗ часу за умови здійснення події  $B$  на перехресті. За формулою повної ймовірності безумовне математичне сподівання  $Z^{(1)}$  втраченого одним ТЗ часу на перехресті в стаціонарному режимі

дорівнює

$$Z^{(1)} = P(B)Z_B^{(1)} + P(\bar{B})Z_{\bar{B}}^{(1)}, \quad (2.6)$$

де  $\bar{B}$  – подія, протилежна події  $B$ .

Слід враховувати, що  $Z_{\bar{B}}^{(1)} = 0$ , тобто втрачений час відсутній при проїзді без очікування на зелене світло.

З огляду на те, що стаціонарна ймовірність прибуття до перехрестя на забороняючий сигнал дорівнює

$$P(B) = \frac{T_3}{T}, \quad (2.7)$$

а безумовне математичне сподівання часу  $Z^{(1)}$ , втраченого одним ТЗ на перехресті

$$Z^{(1)} = P(B)Z_B^{(1)} + P(\bar{B})0 = P(B)Z_B^{(1)} = \frac{T_3}{T}Z_B^{(1)} = \frac{T_3}{T}(1 + \mu\Delta)\frac{T_3}{2},$$

кінцевий вираз для середнього часу очікування проїзду через СО виглядає як:

$$Z^{(1)} = \frac{T_3}{T}(1 + \mu\Delta)\frac{T_3}{2}. \quad (2.8)$$

Залежність (2.8) дає можливість для оцінки середнього втраченого часу всіма шістьма потоками трьох напрямів руху ТЗ на перехресті. Нехай приведені до однієї смуги інтенсивності шести потоків трьох регульованих напрямків руху  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  на перехресті складають відповідно  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  і математичні сподівання проїзду динамічного габариту у відповідних потоках дорівнюють  $\Delta(\alpha_1), \Delta(\alpha_2)$ ,  $\Delta(\beta_1), \Delta(\beta_2)$ ,  $\Delta(\gamma_1), \Delta(\gamma_2)$ . Тривалість циклу  $T$  є сумою тривалості забороняючих сигналів

$$T = T^{(\alpha)} + T^{(\beta)} + T^{(\gamma)}. \quad (2.9)$$

Оцінка математичного сподівання втраченого часу ТЗ для кожного з шести потоків на перехресті за цикл

$$\begin{aligned} Z^{(\alpha_1)} &= \frac{T^{(\alpha)}}{T} \alpha_1 T^{(\alpha)} (1 + \alpha_1 \Delta(\alpha_1)) \frac{T^{(\alpha)}}{2}, \\ Z^{(\beta_1)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} \beta_1 T^{(\beta)} (1 + \beta_1 \Delta(\beta_1)) \frac{T^{(\beta)}}{2}, \\ Z^{(\beta_2)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} \beta_2 T^{(\beta)} (1 + \beta_2 \Delta(\beta_2)) \frac{T^{(\beta)}}{2}, \\ Z^{(\gamma_1)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} \gamma_1 T^{(\gamma)} (1 + \gamma_1 \Delta(\gamma_1)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}, \\ Z^{(\gamma_2)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} \gamma_2 T^{(\gamma)} (1 + \gamma_2 \Delta(\gamma_2)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Оцінка математичних сподівань втраченого одним ТЗ часу для кожного з трьох напрямків руху на перехресті за цикл дорівнює

$$\begin{aligned} Z_1^{(\alpha)} &= \frac{Z^{(\alpha)}}{T^{(\alpha)} (\alpha_1 + \alpha_2)}, \text{ де } Z^{(\alpha)} = Z^{(\alpha_1)} + Z^{(\alpha_2)}, \\ Z_1^{(\beta)} &= \frac{Z^{(\beta)}}{T^{(\beta)} (\beta_1 + \beta_2)}, \text{ де } Z^{(\beta)} = Z^{(\beta_1)} + Z^{(\beta_2)}, \\ Z_1^{(\gamma)} &= \frac{Z^{(\gamma)}}{T^{(\gamma)} (\gamma_1 + \gamma_2)}, \text{ де } Z^{(\gamma)} = Z^{(\gamma_1)} + Z^{(\gamma_2)}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Оцінка сумарного математичного сподівання втраченого часу всіма ТЗ з шести потоків

$$Z = Z^{(\alpha)} + Z^{(\beta)} + Z^{(\gamma)}. \quad (2.12)$$

Оцінка математичного сподівання втраченого часу одним ТЗ на перехресті за цикл дорівнює

$$Z_1 = \frac{Z}{T^{(\alpha)}(\alpha_1 + \alpha_2) + T^{(\beta)}(\beta_1 + \beta_2) + T^{(\gamma)}(\gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (2.13)$$

Оцінка математичних сподівань втраченого часу одним ТЗ для кожного з шести потоків на перехресті за цикл відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned} Z_1^{(\alpha_1)} &= \frac{T^{(\alpha)}}{T} (1 + \alpha_1 \Delta(\alpha_1)) \frac{T^{(\alpha)}}{2}, \\ Z_1^{(\alpha_2)} &= \frac{T^{(\alpha)}}{T} (1 + \alpha_2 \Delta(\alpha_2)) \frac{T^{(\alpha)}}{2}, \\ Z_1^{(\beta_1)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} (1 + \beta_1 \Delta(\beta_1)) \frac{T^{(\beta)}}{2}, \\ Z_1^{(\beta_2)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} (1 + \beta_2 \Delta(\beta_2)) \frac{T^{(\beta)}}{2}, \\ Z_1^{(\gamma_1)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} (1 + \gamma_1 \Delta(\gamma_1)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}, \\ Z_1^{(\gamma_2)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} (1 + \gamma_2 \Delta(\gamma_2)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Оцінка сумарного математичного сподівання втраченого часу ТЗ для кожного з трьох напрямків рухів  $\alpha, \beta, \gamma$  на перехресті за цикл відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned} Z^{(\alpha)} &= Z^{(\alpha_1)} + Z^{(\alpha_2)}, \\ Z^{(\beta)} &= Z^{(\beta_1)} + Z^{(\beta_2)}, \\ Z^{(\gamma)} &= Z^{(\gamma_1)} + Z^{(\gamma_2)}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Отримані вище оцінки для середнього часу затримки при проїзді перехрестя по суті є асимптотичними та отримані в умовах, коли повний роз'їзд черги при

здійсненні ЛП є практично достовірною подією. Тоді постає питання про те, яким умовам повинна задовольняти інтенсивність  $\mu$  потоку, щоб ймовірність роз'їзду черги з них протягом одного циклу була не нижче величини  $\alpha$  близької до одиниці.

Для відповіді на це питання знову розглядається приклад ЛП  $\gamma$ , як основного елементу, за рахунок якого можливе покращення умов руху на досліджуваному трифазному регульованому перехресті.

Як і раніше,  $T^{(\gamma)}$  означатиме тривалість забороняючого сигналу світлофора при здійсненні ЛП, а  $\mu$  означає інтенсивність прибуття цих ТЗ до перехрестя. Нехай  $\nu^{(\gamma)}$  позначає випадкове число ТЗ, які бажають здійснити ЛП та з'явилися за час забороняючого сигналу світлофора  $T^{(\gamma)}$ . Добуток  $\mu T^{(\gamma)}$  показує величину середньої кількості ТЗ, що з'являються для здійснення ЛП за час дії забороняючого сигналу  $T^{(\gamma)}$ , тобто  $M(\nu^{(\gamma)}) = \mu T^{(\gamma)}$ . Згідно з прийнятою постановкою задачі випадкова величина  $\nu^{(\gamma)}$  має розподіл Пуассона з параметром  $x = \mu T^{(\gamma)}$  [177], так як ця випадкова величина виходить в результаті накладення великого числа рідкісних потоків. Згідно центральної граничної теореми теорії ймовірностей [188], застосованої до розподілу Пуассона з параметром  $x$ , справедливою буде наступна оцінка ймовірності події  $C = \{\text{Повний роз'їзд черги}\}$ :

$$P(C) = P\left(\nu^{(\gamma)} \leq \mu T^{(\gamma)} + t_a \sqrt{\mu T^{(\gamma)}}\right) \geq \alpha, \quad (2.16)$$

де  $\alpha = \Phi(t_a)$ , а  $\Phi(y) = \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}}$  – функція Лапласа.

Якщо відомо число ТЗ, які можуть роз'їхатися при здійсненні ЛП за один цикл

$$n_3 = \frac{T_\gamma}{\Delta(\gamma)}, \quad (2.17)$$

де  $\Delta(\gamma)$  – часовий інтервал роз'їзду ТЗ для лівоповоротного руху через пере-

хрестя;

то умова на максимальну інтенсивність  $\mu$  потоку ЛП виникає з нерівності

$$\mu T^{(\gamma)} + t_a \sqrt{\mu T^{(\gamma)}} \leq n_3.$$

Підстановка  $x = \mu T^{(\gamma)}$  дає нерівність

$$x + t_a \sqrt{x} - n_3 \leq 0. \quad (2.18)$$

З нього в позитивній області

$$\sqrt{x} \leq \frac{\sqrt{t_a^2 + 4n_3} - t_a}{2}, \quad (2.19)$$

або

$$0 \leq x \leq \left( \frac{\sqrt{t_a^2 + 4n_3} - t_a}{2} \right)^2. \quad (2.20)$$

Звідси, з урахуванням  $x = \mu T^{(\gamma)}$ , отримується обмеження на IP

$$\mu_{\max} \leq \frac{1}{T^{(\gamma)}} \left( \frac{\sqrt{t_a^2 + 4n_3} - t_a}{2} \right)^2, \quad (2.21)$$

при якій справедливою буде залежність (2.19).

Зазвичай ймовірність  $\alpha$  практично достовірної події вибирають рівною 0,975 так, щоб квантіль  $t_\alpha$ , визначений з таблиць функції Лапласа, дорівнював би 1,96.

Отримані залежності дозволяють проводити аналітичну оцінку часу очікування ТЗ проїзду перехрестя та визначити транспортні умови, для яких її доцільно розраховувати, але потребують експериментальної перевірки, оскільки побудовані

на припущенні про повний роз'їзд черги за дозвільний сигнал світлофора.

### 2.3 Оцінка ймовірності виникнення неповної пачки транспортних засобів при координованому управлінні на міській магістралі

Процес формування пачки ЗХ починається на першому СО ділянки ММ, що координується, а прибуття ТЗ до нього є випадковим, тому постановка задачі у цьому випадку практично нічим не відрізняється від умов функціонування локального перехрестя при жорсткому СУ, якому приділено багато уваги в науковій літературі.

Початком досліджень процесів формування черг на регульованих перехрестях можна вважати роботу [181], де була отримана досить проста аналітична модель, яка була розвинена у подальших дослідженнях [182, 183]. Ці роботи вперше надали ймовірнісну оцінку довжини черги перед регульованим перехрестям і заклали основу для багатьох подальших робіт.

Але, нажаль, вони створювались за умови розгляду лише незначного навантаження перехрестя рухом, у припущенні, що всі ТЗ, які накопичились перед світлофором за час забороняючого сигналу, обов'язково встигнуть покинути перехрестя разом з тими ТЗ, що прибудуть за час дозвільного сигналу. Тобто шукана в даній роботі ймовірність виникнення неповної пачки ТЗ, які заповнюють зелену фазу СЦ, у роботах [181-183] завжди дорівнює 1.

Спроби дослідників локального управління розширити діапазон можливого навантаження перехрестя рухом та оцінити довжину черги переповнення, у всіх випадках приводили авторів до отримання дуже складних формул з багатьма незалежними факторами, які не дозволяють сформулювати оптимальну стратегію визначення раціональної довжини пачки ТЗ на вході до ЗХ. Прикладом такого дослідження є відносно недавня робота [178], в якій підсумкова залежність середньої черги на кінець забороняючого сигналу містить в собі не лише три

звичайних доданка, а ще й суму змінної кількості елементів як четвертий доданок. Зрозуміло, що за допомогою такої моделі визначитися з раціональною довжиною пачки, від якої, в свою чергу, залежить час затримки учасників дорожнього руху на декількох перехрестях, навряд чи буде можливим.

З іншого боку, довжина черги має свою стаціонарну оцінку для стандартних систем масового обслуговування, які також знаходять застосування у транспортних процесах. Яскравим прикладом такого використання є робота [184], в якій описана Марківська модель однолінійної системи масового обслуговування з необмеженою чергою. На вході припускається найпростіший Пуассонівський потік з відомою інтенсивністю. В однолінійній системі обслуговування з необмеженою чергою також задається інтенсивність обслуговування заявки. Отримана за таких умов модель достатньо точно описує кількість ТЗ у ланцюзі, що рухаються безпосередньо один за одним з певною швидкістю.

Матеріал, викладений в цій книзі відображено і у більш ранніх джерелах, у стандартних для теорії масового обслуговування позначеннях. Але робота [184] цікава у першу чергу як приклад успішного застосування теорії масового обслуговування для дослідження транспортних процесів. В ній стаціонарна імовірність відсутності заявок в системі, тобто імовірність вільного періоду, отримана в найпростіших, і спочатку достатньо сильних припущеннях про показниковий характер розподілу інтервалів прибуття ТЗ і тривалості їх обслуговування. Вона дорівнює

$$P_0 = 1 - \rho, \quad (2.22)$$

де  $\rho$  – рівень навантаження на канал обслуговування (смугу руху) для транспортного процесу.

У роботі [184] ця, та інші залежності використовувались при дослідженні довжини черги перед шлагбаумом на в'їзді до паркування. Для використання на регульованому перехресті вона не підходить через спосіб її виводу, заснований на ланцюгах Маркова.

Застосування цього підходу засновано, по-перше, на припущенні про

показниковий закон розподілу часу обслуговування, а, по-друге, на розгляді звичайної однолінійної системи масового обслуговування зі стандартною дисципліною обслуговування FIFO – обслуговування в порядку надходження заявок, тобто на індивідуальному обслуговуванні заявок.

Робота світлофорів значно відрізняється від наведених умов завдяки груповому способу обслуговування заявок, який не лише сам породжує відмінності від попередньої постановки задачі, а ще приводить до практично постійного часу обслуговування однієї заявки, що цілком спростовує припущення про його показниковий розподіл.

Тому пошук імовірності виникнення неповної пачки ТЗ при координованому управлінні на ММ залишається необхідним для умов, які виникають на першому перехресті координованої ділянки ММ. А вже відома імовірність (2.22) може бути дійсною і при інших, більш слабких припущеннях. Вона, по-суті, є наслідком закону великих чисел Колмогорова, але не може використовуватися для оцінки шуканої в даній роботі імовірності без доведення її придатності для цього випадку.

Джерела прибуття ТЗ до координованої ділянки ММ можуть бути самими різними, але малоімовірно, що серед них знайдеться регульоване перехрестя з такою же тривалістю циклу, як і та, що буде визначена при побудові ПК, або з кратною до неї. Внаслідок цього, найбільш гарним припущенням про вхідний до перехрестя ТП буде його Пуассонівський характер, який, як відомо виникає як результат взаємодії великої кількості рідкісних подій.

Дійсно, прибуття до перехрестя в проміжок часу, що дорівнює тривалості циклу, є рідкісною подією для будь-якого ТЗ з потоку, а їхня кількість, що утворює ТП на ММ у завантажені години доби, є безумовно великою. Інші регульовані перехрестя на шляху до координованої ділянки будуть дещо корегувати умови надходження ТЗ, але при різній їх тривалості, імовірнісні оцінки черги значно не зміняться.

Це дозволяє використовувати найпростіший потік для опису ТП, що прибуває до першого перехрестя координованої ділянки ММ та отримувати стаціонарні оцінки шуканих характеристик. Розвантаження напрямку руху здійснюється у

відповідності до умов регулярного потоку, в якому час між сусідніми подіями дорівнює тривалості забороняючого сигналу.

Час обслуговування одного ТЗ слід прийняти як постійну величину, оскільки його більш високі значення, відносно часу проїзду перехрестя більшістю ТЗ, помітні лише для перших трьох-чотирьох одиниць, після яких він стабілізується. Така мала кількість ТЗ у пачці ЗХ може виникати лише як виняток, а тому припущення про постійний час обслуговування одного ТЗ в цьому випадку є достатньо коректним. Та взагалі, воно є загальноприйнятим і практично єдиним для всіх моделей, які описують процеси функціонування СО на регульованих перехрестях.

Як оцінка шуканої імовірності виникнення неповної пачки ТЗ при координованому управлінні на ділянці ММ, виступає стаціонарна імовірність відсутності черги наприкінці дозвільного сигналу світлофора.

Зроблені припущення створюють основу для виводу шуканої залежності з самого початку, без прийняття додаткових умов, які не відповідають роботі СО з постійною тривалістю циклу.

Для цього припускаємо, що інтенсивність ТЗ в обраному напрямку руху дорівнює  $\lambda$ . Виріжемо з осі часу його інтервали, на яких діє забороняючий сигнал. В результаті проїзд ТЗ через перехрестя в обраному напрямку представляється як система масового обслуговування з вхідним потоком, що є суперпозицією двох потоків. Один з них Пуассонівський з параметром  $\lambda$ , а другий стає регулярним потоком, в якому час між сусідніми подіями зараз дорівнює тривалості дозвільного сигналу  $T_0$ . У моменти настання подій, тобто за період, що дорівнює тривалості забороняючого сигналу  $T_z$ , виникають додаткові заявки на обслуговування, кількість яких є випадковою і має розподіл Пуассона з параметром  $\lambda T_z$ . В результаті, число ТЗ, які надійшли до перехрестя за період регулярності, як сума двох незалежних, розподілених за законом Пуассона випадкових величин, має розподіл Пуассона з параметром:

$$\lambda T = \lambda T_0 + \lambda T_z, \quad (2.23)$$

де  $T = T_o + T_s$  – тривалість СЦ, с.

Завантаженням обраного напрямку руху, або навантаженням на систему масового обслуговування є величина

$$\rho = \frac{\lambda(T_o + T_s)}{n} = \frac{\lambda T}{\left(\frac{T_o}{\Delta}\right)} = \lambda \Delta \left(\frac{T}{T_o}\right) < 1, \quad (2.24)$$

де  $\Delta$  – середній час проїзду одного ТЗ через перехрестя;

$n$  – максимальна кількість ТЗ, які встигають подолати перехрестя під час дозвільної фази циклу,  $n = T_o / \Delta$ .

Доведемо допоміжне твердження.

Лема 1. Нехай позитивна випадкова величина  $X > 0$  має кінцеве математичне сподівання  $MX < \infty$ . Тоді для будь-якого позитивного числа  $t > 0$  справедливою є нерівність

$$P(X > t) \leq \frac{MX}{t}. \quad (2.25)$$

Доведення. Будь-яка випадкова величина представляється у вигляді суми двох випадкових величин

$$X = X \cdot I(X > t) + X \cdot I(X \leq t), \quad (2.26)$$

де  $I(Q)$  – індикатор події  $Q$ .

В умовах цього твердження математичним сподіванням суми двох випадкових величин є сума їх математичних сподівань

$$MX = M(X \cdot I(X > t)) + M(X \cdot I(X \leq t)). \quad (2.27)$$

Так як  $X > 0$ , то результат множення двох невід'ємних величин  $X > 0$  і  $I(X \leq t) \geq 0$  також є невід'ємним  $X \cdot I(X \leq t) \geq 0$  і математичне сподівання цього множення також є невід'ємною величиною

$$M(X \cdot I(X \leq t) \geq 0). \quad (2.28)$$

Завдяки аксіомі дійсних чисел – при множенні, або поділі обох частин нерівності на одне й те саме додатне число, ця нерівність зберігається [185]

$$MX = M(X \cdot I(X > t)) + M(X \cdot I(X \leq t)) \geq M(X \cdot I(X > t)). \quad (2.29)$$

При  $X > t$  індикатор цієї події  $(X > t)$  дорівнює одиниці  $I(X > t) = 1$  та

$$X \cdot I(X > t) \geq t \cdot I(X > t). \quad (2.30)$$

Математичне сподівання більшої випадкової величини ніколи не буде меншим математичного сподівання меншої випадкової величини [186]

$$M[X \cdot I(X > t)] \geq M[t \cdot I(X > t)] = tMI(X > t) = tP(X > t). \quad (2.31)$$

Так як константа  $t$  як множник може бути винесена за знак математичного сподівання

$$M[t \cdot I(X > t)] = tM[I(X > t)], \quad (2.32)$$

а математичне сподівання індикатора випадкової події дорівнює ймовірності цієї

події

$$M[I(X > t)] = P(X > t), \quad (2.33)$$

завдяки транзитивності відносин нерівності

$$MX \geq M(X \cdot I(X > t)) \geq tP(X > t), \quad (2.34)$$

маємо

$$MX \geq tP(X > t). \quad (2.35)$$

Звідси, виходячи з умови твердження  $t > 0$

$$P(X > t) \leq \frac{MX}{t}. \quad (2.36)$$

Твердження леми 1 повністю доведено.

Наслідок 1. Якщо,  $MX < \infty$  то  $\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{X}{T} = 0$  по імовірності, тобто для будь-

якого позитивного числа  $t > 0$

$$P\left(\frac{X}{T} > t\right) \rightarrow 0 \text{ при } T \rightarrow +\infty.$$

Дійсно, візьмемо будь-яке число  $t > 0$ , і зафіксуємо його. Завдяки твердженню, що для будь-якого  $t > 0$

$$P\left(\frac{X}{T} > t\right) \leq \frac{M\left(\frac{X}{T}\right)}{t} = \frac{1}{T} \left(\frac{MX}{t}\right) \rightarrow 0 \text{ при } T \rightarrow +\infty, \quad (2.37)$$

так як  $M\left(\frac{X}{t}\right) < \infty$  є кінцевою величиною.

При  $T \rightarrow +\infty$  позитивна величина, яка більше, ніж

$$\frac{M\left(\frac{X}{T}\right)}{t} = \frac{1}{T} \left(\frac{MX}{t}\right), \quad (2.38)$$

прямує до нуля. З властивості меж і нерівностей, що складаються в тому, що нечітка нерівність для звичайних величин зберігається і для їх меж, якщо вони існують [185], слідує, що і менша позитивна величина ймовірності  $P\left(\frac{X}{T} > t\right)$  прямує до нуля при  $T \rightarrow +\infty$  для будь-якого, але фіксованого, числа  $t > 0$ :

$$P\left(\frac{X}{T} > t\right) \rightarrow 0 \text{ при } T \rightarrow +\infty, \quad (2.39)$$

тобто

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{X}{T} = 0 \text{ по імовірності.} \quad (2.40)$$

Наслідок 1 доведено.

Доведені твердження дозволяють знайти стаціонарну ймовірність відсутності черги в момент закінчення дозвільного сигналу, тобто ймовірність відсутності в описаній системі масового обслуговування вимог безпосередньо перед подією регулярного потоку (групового надходження заявок до системи).

Припустимо, що в момент часу  $t \geq 0$  в системі знаходяться  $r(t)$  заявок з сумарним залишковим часом до обслуговування  $X(t)$ .

Лема 2. Нехай час обслуговування заявки постійний і дорівнює  $\Delta$ . Тоді у будь-який момент часу  $t \geq 0$  справедливою є нерівність для оцінки сумарного залишкового часу дообслуговування в момент часу  $t \geq 0$

$$X(t) \leq r(t) \cdot \Delta.$$

Доведення. Час дообслуговування заявки не перевищує постійної величини часу обслуговування заявки, що дорівнює  $\Delta$ . Так як обслуговування йде в порядку надходження заявок без переривання, то заявки в черзі ще не обслуговувалися і час дообслуговування кожної з них дорівнює їх повному часу обслуговування  $\Delta$ . З двох останніх речень і випливає твердження леми 2.

Величину часу від початкового моменту  $t=0$  до моменту часу  $t=T$  представимо у вигляді суми часу  $T_0$ , коли система обслуговування вільна від заявок, і часу  $T_s$ , коли в системі є хоча б одна заявка, тобто йде обслуговування

$$T = T_0 + T_s. \quad (2.41)$$

Визначення. Якщо існує кінцева межа

$$P(0) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{T_0}{T}, \quad (2.42)$$

то це число  $P_0$  називається стаціонарної ймовірністю того, що система вільна від заявок, тобто стаціонарної ймовірністю простою системи. У цьому випадку під час дозвільного сигналу, в тому числі і в момент його закінчення, існують періоди часу, коли в черзі і на перехресті немає руху ТЗ, що означає неповну пачку у ЗХ.

Теорема. Якщо існує позитивна константа  $C > 0$  така, що для будь-якого

$t \geq 0$  математичне сподівання  $r(t)$  числа заявок в системі обмежена константою  $C > 0$ , тобто

$$M[r(t)] \leq C, \quad (2.43)$$

то існує кінцева межа

$$P(0) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{T_0}{T} = 1 - \rho. \quad (2.44)$$

Доведення. Позначимо через  $\Pi(T)$  число заявок вхідного потоку, що надійшли до системи на відрізок часу  $[0; T]$ . Тоді очевидно

$$X(T) = X(0) + \Pi(T) \cdot \Delta - T_s. \quad (2.45)$$

Час дообслуговування заявок в момент часу  $T$  складається з часу дообслуговування  $X(0)$  в початковий момент часу  $t=0$ , часу обслуговування  $\Pi(t) \cdot \Delta$  заявок, які прийшли на відрізок часу  $[0; T]$  за винятком часу  $T_s$ , коли заявки обслуговувалися в системі на відрізок часу  $[0; T]$ .

З рівності (2.45) слідує рівність

$$T_s = X(0) + \Pi(T) \cdot \Delta - X(T). \quad (2.46)$$

З рівності (2.46) слідує рівність

$$T_0 = T - T_s. \quad (2.47)$$

З двох останніх рівностей (2.46) і (2.47) знаходимо

$$T_0 = T - X(0) - \Pi(T) \cdot \Delta + X(T). \quad (2.48)$$

Після поділу на величину  $T$  отримаємо рівність

$$\frac{T_0}{T} = \frac{T - X(0) - \Pi(T) \cdot \Delta + X(T)}{T}, \quad (2.49)$$

з якого слідує

$$\frac{T_0}{T} = 1 - \frac{X(0)}{T} - \frac{\Pi(T) \cdot \Delta}{T} + \frac{X(T)}{T}. \quad (2.50)$$

Завдяки нерівності (2.40) з лема 2, при  $t = 0$  маємо нерівність

$$X(0) \leq r(0) \cdot \Delta, \quad (2.51)$$

з якої, з урахуванням властивості математичного очікування (від множення, або поділу частин нерівності на одне й те саме додатне число, ця нерівність зберігається) [186], і з нерівності (2.43) при  $t = 0$

$$M[X(0)] \leq M[r(0) \cdot \Delta] = \Delta \cdot M[r(0)] \leq C\Delta. \quad (2.52)$$

Звідси і слідства 1 до лема 1, слідує існування межі

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{X(0)}{T} = 0. \quad (2.53)$$

Цілком аналогічно, завдяки (2.40) з лема 2, при  $t = T$ , маємо нерівність

$$X(T) \leq r(T) \cdot \Delta, \quad (2.54)$$

з якого, плюс з властивості математичного сподівання (сума менших величин буде менше, ніж сума більших величин) [186], і з нерівності (2.43) при  $t = T$

$$M[X(T)] \leq M[r(T) \cdot \Delta] = \Delta \cdot M[r(T)] \leq C\Delta. \quad (2.55)$$

Звідси та слідства 1 до леми 1 і слідує існування межі

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{X(T)}{T} = 0. \quad (2.56)$$

Залишилося знайти межу відношення  $\frac{\Pi(T) \cdot \Delta}{T}$ , коли  $T \rightarrow \infty$ .

Позначимо через  $k(T)$  число повних періодів, довжини  $T_p$  кожен, регулярного потоку подій групових надходжень заявок з постійним часом  $T_p$  між сусідніми здійсненнями подій на відрізку часу  $[0; T]$ . Число заявок в цьому груповому регулярному потоці заявок дорівнює сумі

$$Z(T) = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{k(T)+1}, \quad (2.57)$$

$k(T) + 1$  незалежних у сукупності, однаково розподілених по закону Пуассона з параметром

$$\lambda T_3 = \lambda(T_c - T_o), \quad (2.58)$$

невід'ємних цілочислових випадкових величин

$$Z_1, Z_2, \dots, Z_{k(T)+1}. \quad (2.59)$$

Позначимо через  $N(T)$  число заявок Пуассонівського потоку з параметром  $\lambda$ , які прийшли на відрізку часу  $[0; T]$ . Тоді число заявок вхідного потоку, які прийшли до системи обслуговування, а він є суперпозицією двох потоків регулярного групового і Пуассонівського на відрізку часу  $[0; T]$  дорівнює

$$\Pi(T) = Z(T) + N(T). \quad (2.60)$$

Тоді

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\Pi(T)}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{Z(T) + N(T)}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{Z(T)}{T} + \frac{N(T)}{T} \right]. \quad (2.61)$$

Межа суми дорівнює сумі меж, якщо існують кінцеві межі доданків. Знайдемо ці кінцеві межі доданків. Відповідно до закону великих чисел

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{N(T)}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{M[N(T)]}{T} = \frac{\lambda T}{T} = \lambda. \quad (2.62)$$

Згідно з тим же законом великих чисел

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{Z(T)}{T} &= \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{M[Z(T)]}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\lambda(T_c - T_p)[k(T) + 1]}{T} = \\ &= \lambda(T_c - T_p) \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{k(T) + 1}{T} = \lambda(T_c - T_p) \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{k(T)}{T} + \frac{1}{T} \right], \end{aligned} \quad (2.63)$$

Число  $k(T)$  повних періодів, довжини  $T_p$  кожен, регулярного потоку подій групових надходжень заявок з постійним часом  $T_p$  між сусідніми здійсненнями

подій на відрізку часу  $[0; T]$  задовольняє двосторонній нерівності

$$\frac{T}{T_\delta} - 1 \leq k(T) \leq \frac{T}{T_\delta}, \quad (2.64)$$

розділивши всі частини якого на позитивне число  $T > 0$ , отримаємо двосторонню нерівність

$$\frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T} \leq \frac{k(T)}{T} \leq \frac{1}{T_\delta}. \quad (2.65)$$

Звідси, завдяки властивостям меж і нерівностей [185]

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T} \right] \leq \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{k(T)}{T} \leq \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T_\delta}. \quad (2.66)$$

Так як межа константи дорівнює самій цій константі

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T_\delta} = \frac{1}{T_\delta}, \quad (2.67)$$

а

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} = 0, \quad (2.68)$$

то існує кінцева межа різниці

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T} \right] = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T_\delta} - \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} = \frac{1}{T_\delta} - 0 = \frac{1}{T_\delta}. \quad (2.69)$$

У результаті маємо

$$\frac{1}{T_\delta} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{1}{T_\delta} - \frac{1}{T} \right] \leq \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{k(T)}{T} \leq \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T_\delta} = \frac{1}{T_\delta}. \quad (2.70)$$

Звідси

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{k(T)}{T} = \frac{1}{T_\delta}. \quad (2.71)$$

Використовуючи цю межу і межу (2.72)

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} = 0, \quad (2.72)$$

знаходимо межу суми, що дорівнює сумі меж

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{k(T)}{T} + \frac{1}{T} \right] = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{k(T)}{T} + \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} = \frac{1}{T_\delta} + 0 = \frac{1}{T_\delta}. \quad (2.73)$$

Завдяки знайденій межі, з (2.63) вдається знайти межу

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{Z(T)}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{M[Z(T)]}{T} = \lambda(T_c - T_\delta) \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{k(T)}{T} + \frac{1}{T} \right] = \lambda(T_c - T_\delta) \left( \frac{1}{T_\delta} \right). \quad (2.74)$$

Кінцеві межі доданків у виразі (2.61) знайдені, це

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{N(T)}{T} = \lambda, \quad (2.75)$$

та

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{Z(T)}{T} = \lambda(T_c - T_\delta) \left( \frac{1}{T_\delta} \right). \quad (2.76)$$

Таким чином, межа суми дорівнює сумі кінцевих меж доданків, де після розкриття дужок і спрощень, отримаємо

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{Z(T)}{T} + \frac{N(T)}{T} \right] = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{Z(T)}{T} + \lim_{T \rightarrow +\infty} N(T) = \lambda(T_c - T_\delta) \left( \frac{1}{T_\delta} \right) + \lambda = \frac{\lambda T_c}{T_\delta}. \quad (2.77)$$

Отже, знайдена межа (2.61)

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\Pi(T)}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ \frac{Z(T)}{T} + \frac{N(T)}{T} \right] = \frac{\lambda T_c}{T_\delta}, \quad (2.78)$$

та, звичайно ж, завдяки лінійним властивостями меж, знайдена межа

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\Pi(T) \cdot \Delta}{T} = \Delta \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\Pi(T)}{T} = \Delta \frac{\lambda T_c}{T_\delta} = \rho, \quad (2.79)$$

згідно з визначенням завантаження напрямку

$$\rho = \lambda \Delta \left( \frac{T_c}{T_\delta} \right) < 1. \quad (2.80)$$

І, нарешті, завдяки рівності (2.50) знаходимо межу лінійної комбінації рівний лінійної комбінації меж, якщо ці кінцеві межі (2.53), (2.56) та (2.79) знайдені

$$P(0) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{T_0}{T} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[ 1 - \frac{X(0)}{T} - \frac{\Pi(T) \cdot \Delta}{T} + \frac{X(T)}{T} \right], \quad (2.81)$$

$$P(0) = \lim_{T \rightarrow +\infty} 1 - \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{X(0)}{T} - \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\Pi(T) \cdot \Delta}{T} + \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{X(T)}{T} = 1 - 0 - \rho + 0 = 1 - \rho. \quad (2.82)$$

Теорема доведена.

В результаті, для регульованого перехрестя з жорстким циклом регулювання, знайдена стаціонарна ймовірність того, що система вільна від заявок, тобто стаціонарна ймовірність простою системи при  $\rho < 1$  дорівнює  $P(0) = 1 - \rho$ , яка збіглася з аналогічною імовірністю (2.22) у стандартній однолінійній системі масового обслуговування зі стандартною дисципліною обслуговування FIFO та з показниковим законом розподілу часу обслуговування. Таким чином, залежність (2.22) отримала набагато ширший діапазон застосування.

З урахуванням побудови системи масового обслуговування шляхом вирізання з осі часу заборонених для проїзду проміжків, була знайдена стаціонарна ймовірність відсутності черги в момент закінчення руху в обраному напрямку після завершення дозвільного сигналу. З точки зору створення плану магістральної координації залежність (2.22) відображає імовірність виникнення неповної пачки ТЗ у залежності від навантаження рухом обраного напрямку. Так як рівень навантаження залежить від розміру пачки [23], встановлений взаємозв'язок дозволяє обрати стратегію вибору раціонального розміру пачки ТЗ у ЗХ.

## Висновки по другому розділу

1. Запропонована в дослідженні двоетапна процедура створення ПК на ММ враховує особливості групового прибуття пачки ЗХ до чергового регульованого перехрестя на ділянці ММ, що координується, і дозволяє наблизити кінцеве рішення цієї задачі до глобального мінімуму часу очікування можливості проїзду через регульовані перехрестя, зваженого за кількістю зупинок на шляху подолання координованої ділянки ММ.

2. Отримані, за умови повного роз'їзду черги ТЗ за зелений сигнал світлофора, аналітичні оцінки часу затримки ТЗ на перехресті потребують експерименталь-

ної перевірки своєї адекватності і порівняння з іншими моделями часу затримки задля вибору найбільш відповідної моделі при виконанні першого, аналітичного етапу створення ПК на ММ.

3. Побудова ПК на основі безпосереднього завдання довжини пачки ТЗ у ЗХ, вимагає оцінки імовірності виникнення неповної пачки ТЗ в різних умовах, так як ця подія означає зниження ефективності використання часу СЦ на всіх перехрестях координованої ділянки, а існуючі методи організації роботи СО і методи розрахунку довжини черги на ізольованих перехрестях, такої оцінки не забезпечують.

4. Побудована на стандартних, щодо роботи світлофорів з постійним циклом, припущеннях формула імовірності нульової черги наприкінці дозвільного сигналу є стаціонарною оцінкою шуканої імовірності виникнення неповної пачки ТЗ у залежності від рівня завантаження напрямку руху, яка збіглася з аналогічною оцінкою однолінійної системи масового обслуговування з необмеженою чергою, отриманої за допомогою Марківської моделі. Її лінійний характер, та поступове зростання навантаження при збільшенні пачки ТЗ у ЗХ, дозволяє вільно обирати розмір пачки, виходячи виключно з міркувань мінімізації часу затримок учасників руху при подоланні координованої ділянки ММ.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [1-3, 7, 10].

### **РОЗДІЛ 3**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ДІЛЯНЦІ МІСЬКОЇ МАГІСТРАЛІ З РОЗДІЛЮВАЛЬНОЮ СМУГОЮ**

Метою експериментальних досліджень, що проводяться в рамках даного розділу, є отримання вихідних даних для побудови реального ПК на ММ і визначення необхідних для перетворення запропонованого методу розробки ПК у практичну методику його використання.

Для цього спочатку необхідно обрати об'єкт реалізації розробок, який має відповідати основним вимогам до нього: це має бути ділянка ММ з розділювальною смугою, яка складається з більше ніж трьох перехресть та має випадкове прибуття ТЗ до першого перехрестя ділянки в кожному напрямку.

### **3.1 Характеристика об'єкта проведення експериментальних досліджень та параметрів транспортного процесу на ньому**

При виборі об'єкта для практичного застосування розробленої в попередньому розділі методу формування плану магістральної координації доцільно керуватися певними вимогами, які забезпечуватимуть досягнення як безпосередньо результатів дослідження, так і можливості подальшого використання його результатів на інших об'єктах, а саме:

а) ділянка ММ, що координується, повинна відповідати всім умовам функціонування обраного об'єкта дослідження з метою забезпечення надійної основи для створення та порівняння раціонального ПК, тобто:

- не мати місць перетину ММ потоками інших учасників руху на всіх перегонах ділянки;

- довжина перегонів на ній має бути не менш 250 та не більш 500 метрів, всі вони повинні мати розділювальну смугу (окрім першого та останнього);

- мати на всіх перехрестях з другорядними вулицями СО з жорсткими СЦ з виділеним в окрему фазу ЛП з магістралі (світлофори на першому та останньому перехрестях можуть бути двофазними);

- тривалість циклів у локальному режимі роботи на перехрестях ділянки має бути різною;

б) ділянка ММ, що координується, має бути високо завантаженою, можливо із маршрутами громадського транспорту (тролейбусними або автобусними) на ній;

в) об'єкт дослідження має забезпечувати можливість проведення довготривалих досліджень ТП.

Також слід додати вимогу до актуальності питання покращення умов подолання ТЗ ділянки ММ, що координується. Але це питання практично завжди виникає для наведених вище довжин перегонів і різних за тривалістю СЦ. Виходячи з цих умов, об'єктом для вивчення характеристик ТП та створення ПК на ньому була обрана ділянка однієї з магістральних вулиць міста Харкова – просп. Науки від просп. Незалежності, який є його початком до вул. Мінської, рис. 3.1.

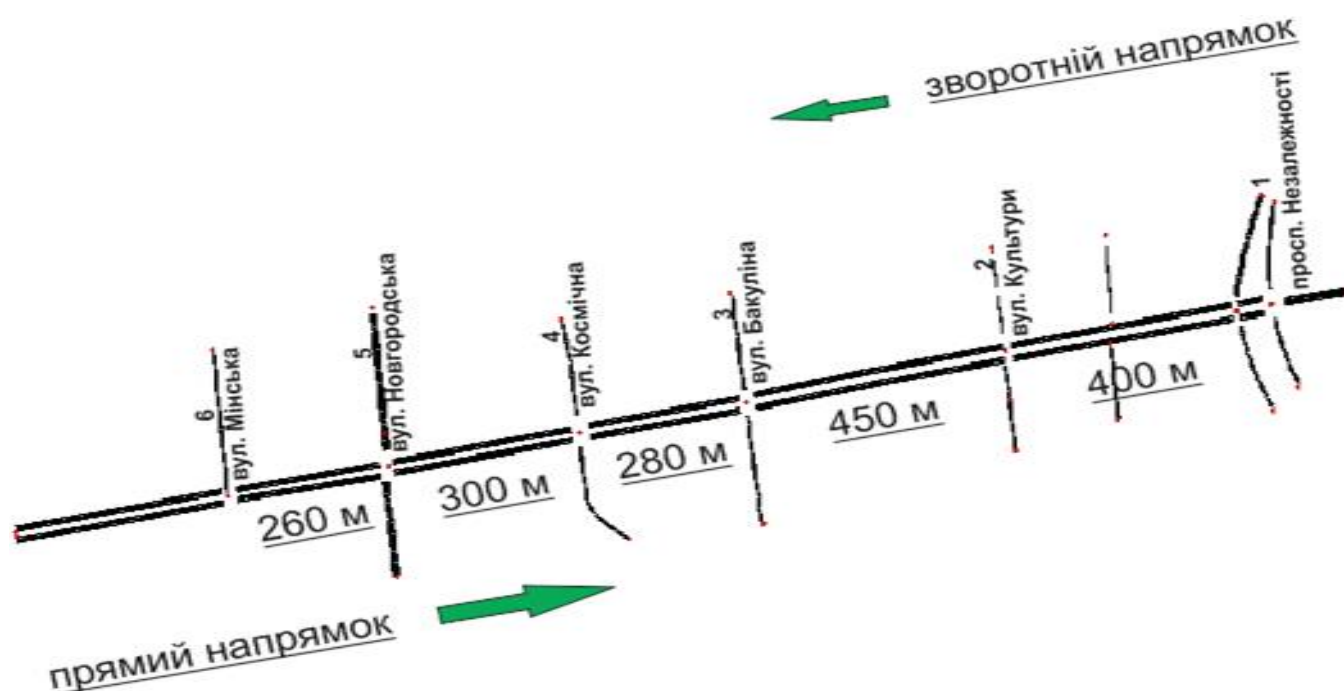


Рисунок 3.1 – Досліджувана ділянка просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінською

На цій ділянці виконуються не всі наведені умови. Зокрема частина СО формально має однакові цикли та перегін між вул. Культури та просп. Незалежності, який має два нерегульовані пішохідні переходи. Але відсутність синхронізаторів на СО означає наявність фактичної різниці у тривалості формально однакових циклів, хоча і невеликої, а що стосується пішохідних переходів, то вони розташовані на першому перегоні в прямому напрямку руху ЗХ (останньому – в зустрічному) і здійснюють мінімальний вплив на її функціонування, що надає можливості для реалізації ПК на цій ділянці, незважаючи на деяку її невідповідність заданим умовам. Вона містить шість регульованих перехресть:

1. просп. Науки – просп. Незалежності (рисунок 3.2);
2. просп. Науки – вул. Культури (рисунок 3.3);
3. просп. Науки – вул. Бакуліна (рисунок 3.4);
4. просп. Науки – вул. Космічна (рисунок 3.5);
5. просп. Науки – вул. Новгородська (рисунок 3.6);
6. просп. Науки – вул. Мінська (рисунок 3.7).



Рисунок 3.2 – Перехрестя просп. Науки – просп. Незалежності



Рисунок 3.3 – Перехрестя просп. Науки – вул. Культури



Рисунок 3.4 – Перехрестя просп. Науки – вул. Бакуліна



Рисунок 3.5 – Перехрестя просп. Науки – вул. Космічна



Рисунок 3.6 – Перехрестя просп. Науки – вул. Новгородська



Рисунок 3.7 – Перехрестя просп. Науки – вул. Мінська

Прибуття ТЗ до початку просп. Науки на перехресті з просп. Незалежності є безумовно випадковим, оскільки найближчі до нього регульовані перехрестя: просп. Незалежності – вул. Сумська та узвіз Клочківський – вул. Клочківська, розташовані на великій відстані від нього, 500 та 1000 метрів та на перегони між ними виходять декілька міських вулиць (вулиці Трінклера і Літературна з одного боку та Ромен Роллана і Юри Зойфера, з іншого боку).

Що стосується ситуації на іншому краю ділянки, яка розглядається, то тут ситуація виглядає дещо інакше, оскільки перехрестю просп. Науки з вул. Мінською передує «чистий перегін», який починається з перехрестя просп. Науки з вул. Отакара Яроша та не містить у собі перетинань з іншими вулицями міста. Але особливістю цього перехрестя є інтенсивний рух ТЗ з вул. Отакара Яроша на просп. Науки в бік вул. Мінської, який не набагато менше прямого ТП з просп. Науки. Це робить неможливим виділення пачки ЗХ на перехресті просп. Науки з вул. Отакара Яроша, а перехрестя просп. Науки з вул. Мінською – самим навантаженим об'єктом

просп. Науки, що робить його вхідними воротами до координованої ділянки просп. Науки. Саме на перегоні проспекту між вул. Отакара Яроша та вул. Мінською накопичується найбільша черга ТЗ у періоди перевищення ПС перехрестя просп. Науки з вул. Мінською інтенсивністю прибуття ТЗ.

Всі шість перехресть ділянки проспекту Науки, що координуються, облаштовані світлодіодними світлофорами комунального підприємства «ХАРКІВ-СИГНАЛ» без викличного пульта з табло зворотного відліку часу, таблиця 3.1, що обумовлює можливість налаштування жорсткого ПК.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика СО на ділянці просп. Науки, що координується

| Найменування світлофорного об'єкта | Кількість, од.           |                        |                    | Тип контролера   | Додаткові секції |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|
|                                    | транспортних світлофорів | пішохідних світлофорів | звукових пристроїв |                  |                  |
| просп. Науки – просп. Незалежності | 14                       | 14                     | 5                  | комкон КДК-32-01 | немає            |
| просп. Науки – вул. Культури       | 8                        | 8                      | 8                  | комкон КДК-24-01 | є                |
| просп. Науки – вул. Бакуліна       | 8                        | 12                     | 6                  | комкон КДК-24-01 | є                |
| просп. Науки – вул. Космічна       | 8                        | 12                     | 5                  | комкон КДК-24-01 | є                |
| просп. Науки – вул. Новгородська   | 8                        | 12                     | 12                 | комкон КДК-24-01 | є                |
| просп. Науки – вул. Мінська        | 6                        | 6                      | 6                  | комкон КДК-16-01 | немає            |

Діючі на період проведення обстеження параметри технічних засобів ОДР, розташованих на перехрестях ділянки просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської наведені в додатку А.

Основною задачею дослідження ТП на обраній ділянці ВДМ є отримання обґрунтованої основи для створення ПК, яка має відображати реальну картину функціонування ділянки на деякий момент часу, зазвичай на періоди максимального навантаження на мережу. Дуже важливим при цьому є узгодження ТП на різних перехрестях, чого важко досягти при проведенні обстеження на різних перехрестях у різні години та тим паче у різні дні. Тому на обраній ділянці спочатку, 12.11.2021 було проведене обстеження коливання ТП по годинах доби на перегоні просп. Науки між вул. Мінська та Новгородська, результати якого наведені у таблиці 3.2.

Обстеження підтвердило, що найбільш навантаженим періодом доби для просп. Науки є години з 8<sup>00</sup> до 10<sup>30</sup>, для яких з 08.11.2021 по 12.11.2021 проводилось обстеження інтенсивностей ТП на кожному з 6-ти перехресть. Кожне перехрестя обстежувалося протягом 10 хв. за допомогою аерофотозйомки. Для цього було використано квадрокоптер DJI Mini 2 Fly More Combo, рисунок 3.8, який є на балансі кафедри транспортних систем і логістики ХНАДУ. Даний квадрокоптер оснащений всім сучасним обладнанням для проведення високоякісної відео- та фотозйомки з висоти понад 500 м.



Рисунок 3.8 – Квадрокоптер DJI Mini 2 Fly More Combo  
(<https://dji-kyiv.com/ua/kvadrokopter-dji-mini-2/>)

Таблиця 3.2 – Годинна інтенсивність руху ТП на просп. Науки приведена до легкового автомобіля, од./год

| Час   | у бік Центру | у бік Ботсаду | Час   | у бік Центру | у бік Ботсаду |
|-------|--------------|---------------|-------|--------------|---------------|
| 7:30  | 279          | 152           | 13:45 | 405          | 361           |
| 7:45  | 318          | 177           | 14:00 | 360          | 374           |
| 8:00  | 339          | 194           | 14:15 | 375          | 381           |
| 8:15  | 409          | 265           | 14:30 | 387          | 359           |
| 8:30  | 499          | 319           | 14:45 | 396          | 355           |
| 8:45  | 438          | 289           | 15:00 | 372          | 363           |
| 9:00  | 439          | 290           | 15:15 | 344          | 374           |
| 9:15  | 393          | 279           | 15:30 | 403          | 369           |
| 9:30  | 444          | 324           | 15:45 | 398          | 354           |
| 9:45  | 399          | 335           | 16:00 | 395          | 359           |
| 10:00 | 447          | 318           | 16:15 | 363          | 373           |
| 10:15 | 380          | 317           | 16:30 | 369          | 361           |
| 10:30 | 381          | 309           | 16:45 | 401          | 350           |
| 10:45 | 362          | 325           | 17:00 | 346          | 358           |
| 11:00 | 378          | 311           | 17:15 | 385          | 380           |
| 11:15 | 399          | 333           | 17:30 | 378          | 376           |
| 11:30 | 382          | 294           | 17:45 | 380          | 358           |
| 11:45 | 377          | 353           | 18:00 | 396          | 352           |
| 12:00 | 359          | 334           | 18:15 | 399          | 370           |
| 12:15 | 391          | 332           | 18:30 | 357          | 401           |
| 12:30 | 408          | 337           | 18:45 | 355          | 396           |
| 12:45 | 386          | 327           | 19:00 | 375          | 391           |
| 13:00 | 374          | 333           | 19:15 | 369          | 392           |
| 13:15 | 386          | 342           | 19:30 | 327          | 360           |
| 13:30 | 403          | 346           | 19:45 | 321          | 324           |

Використання квадрокоптера значно спрощує проведення натурних спостережень за рухом ТП та підвищує можливості для одночасної фіксації руху ТП на всіх перехрестях, що входять до складу ділянки просп. Науки обраної для розробки схеми координації. Результати обстеження інтенсивностей руху ТП на перехрестях ділянки просп. Науки, що координується, наведені у додатку Б.

Зібрані дані дозволили визначити, що найбільш навантаженим напрямком руху ТП протягом практично всієї доби є напрямок від вул. Мінської у бік центру

міста до просп. Незалежності та саме цей напрямок необхідно приймати як прямий при побудові ПК. Обсяг зібраних даних є достатнім для заповнення моделі фактичною інформацією, що надає змогу перейти до наступних експериментальних кроків.

### 3.2 Оцінка часу затримки транспортних засобів на ізольованому перехресті зі світлофорним регулюванням

Основним видом СЦ на обраному за об'єкт дослідження фрагменті ММ з розділювальною смугою є трифазний цикл з виділенням лівим поворотом. Цей цикл надає можливості як експериментальної перевірки точності розробленої у підрозділі 2.2 аналітичної моделі, так й покращення умов руху на ньому. Остання можливість є дуже важливою, оскільки узагальнює умови перевірки за рахунок появи ще одного стану об'єкта. Так як експериментальні дослідження завжди потребують визначення конкретних умов їх проведення, розроблений метод оцінки затримок ТЗ на перехресті доцільно застосувати для лівоповоротних потоків ТЗ з просп. Науки на вул. Новгородську в бік Центрального парку культури та відпочинку, для яких у СЦ виділена окрема фаза, яка починається з вмикання зеленої стрілки наліво у додатковій секції світлофора. Цей поворот є дуже навантаженим протягом всього періоду денної інтенсивності з 8<sup>00</sup> до 19<sup>00</sup>. Черга ТЗ, які очікують можливості здійснення ЛП з просп. Науки на вул. Новгородську в бік Центрального парку культури та відпочинку в цей період зазвичай не має можливості повністю роз'їхатися за час горіння дозвільної стрілки в додатковій секції світлофора. Це дозволяє покладатися на те, що під час переключення сигналів, перед стоп-лінією конкуруючого напрямку, протягом денного періоду, завжди будуть знаходитися ТЗ, які не встигли роз'їхатися за попередній дозвільний сигнал або прибули до перехрестя протягом забороняючого сигналу. Це дозволяє знизити вимоги щодо безпечного проїзду перехрестя, оскільки рух ТЗ у новій дозвільній фазі кожного разу буде розпочинатися

зі старту з місця, коли водій має можливість перекоонатися у безпечності маневру та пропустити учасників дорожнього руху, які завершують подолання перехрестя у межах попереднього основного ОТ СЦ.

При діючому на період проведення експериментальних досліджень СЦ, зміна фази  $\beta$  пропуску прямих і правоповоротних потоків по просп. Науки на фазу  $\gamma$  пропуску лівоповоротних потоків з просп. Науки на вул. Новгородську виконується послідовно, без часткового накладання фази  $\gamma$  на фазу  $\beta$ . Це призводить до достатньо тривалого періоду незайнятості території перехрестя рухом ТЗ. Для покращення умов руху на перехресті, протягом навантаженого періоду доби, коли умови безпечного проїзду перехрестя можуть бути пом'якшені, доцільно вмикати зелену стрілку в додатковій секції світлофора заздалегідь, протягом фази  $\beta$ , для того, щоб ТЗ, які здійснюють поворот наліво, могли виїхати на перехрестя раніше та, згідно з ПДР, пропустити ТЗ зустрічного прямого потоку по просп. Науки, а потім продовжити рух безпосередньо після зупинки цього потоку. Це дозволяє збільшити кількість ТЗ, що встигнуть роз'їхатися за дозвільний сигнал за рахунок ТЗ, які можуть знаходитися за стоп-лінією протягом фази  $\beta$ . Натурними спостереженнями встановлено, що кількість таких ТЗ складає 4 од. Це значення прийняте за базове для кількісної оцінки запропонованого заходу, для якого тепер необхідно розрахувати величини середньої затримки на перехресті.

Для поточного стану світлофорного регулювання на момент проведення експериментальних досліджень, тривалість всього циклу складає  $T = 78$  с., дозвільний сигнал для обраної фази триває  $T_\gamma = 18$  с., а забороняючий, відповідно –  $T^{(\gamma)} = 60$  с. Середня кількість ТЗ, що встигають роз'їхатися за дозвільний сигнал складає  $n_1 = 8$  од. Звідси математичне сподівання часу проїзду ТЗ динамічного габариту в період роз'їзду дорівнює  $\Delta(\gamma) = 2,25$  с. У даному випадку умова на максимальну інтенсивність руху в цьому напрямку, розрахована з (2.21) складає  $\mu_{\max} = 0,0675$  с<sup>-1</sup>, або  $\mu_{\max} = 243$  од./год.

Якщо ж дозволити за час жовтого сигналу виїжджати лівоповоротним ТЗ на перехрестя, то в цьому випадку середня кількість ТЗ, що встигнуть роз'їхатися за

дозвільний сигнал, може сягнути значення  $n_1 = 12$  і, відповідно, максимальна інтенсивність руху, зростає до  $\mu'_{\max} = 0,1184 \text{ с}^{-1}$ , або  $\mu'_{\max} = 426 \text{ од./год.}$ , а математичне сподівання часу проїзду динамічного габариту ТЗ в період роз'їзду скорочується до  $\Delta'(\gamma) = 1,5 \text{ с.}$

Тобто, згідно аналітичної моделі, запропонований захід майже у два рази підвищує ПС перехрестя у напрямку ЛП. Для отриманих умов можна, за допомогою (2.8) розрахувати оцінки середнього часу затримки одного ТЗ при різних інтенсивностях  $\gamma$  та різних способах організації лівоповоротного руху. Для експериментальної перевірки аналітичної оцінки часу затримки обрані чотири значення інтенсивності потоку, таблиця 3.3.

Таблиця 3.3 – Аналітична оцінка середнього часу затримки ТЗ на лівопоротному напрямку перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської

| Інтенсивність руху ТЗ, од./год.                                   | Варіант циклу, с |       |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|-------|
|                                                                   | Існуючий         | Новий |
| Низька, $\gamma = \frac{1}{2} \mu_{\max} = 123,5$                 | 24,83            | 23,20 |
| Поточна, $\gamma = \mu_{\max} = 243$                              | 26,58            | 23,99 |
| Проміжна, $\gamma = \frac{(\mu_{\max} + \mu'_{\max})}{2} = 334,5$ | 27,90            | 24,90 |
| Пропонована, $\gamma = \mu'_{\max} = 426$                         | 29,22            | 25,82 |

Інформація, наведена в таблиці 3.3 доводить очевидну, зростаючу зі збільшенням ІР ТЗ, ефективність пропонованого варіанту світлофорного регулювання та надає можливості для експериментальної перевірки аналітичної моделі (2.14).

Одним з основних засобів проведення експериментальних досліджень в сфері ОДР, при розгляді локальних об'єктів на ВДМ є імітаційне моделювання. В даній роботі програмним засобом проведення експериментальних досліджень обраний пакет VISSIM, один з найбільш відомих і розповсюджених у світі.

За допомогою цього пакету розроблена імітаційна модель перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської, рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Транспортна модель перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської в середовищі VISSIM

З метою отримання надійних оцінок середнього часу затримки ТЗ імітаційний експеримент проводився для кожної з 8-ми ситуацій по 10 разів, тривалість імітації складала 10 хв., з результатів визначався середній час затримки, таблиця 3.4.

Таблиця 3.4 – Експериментальна оцінка середнього часу затримки ТЗ на лівопоротному напрямку перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської

| Інтенсивність руху ТЗ | Варіант циклу, с |              |
|-----------------------|------------------|--------------|
|                       | Існуючий         | Пропонований |
| Низька                | 23,90            | 22,28        |
| Поточна               | 30,85            | 23,34        |
| Проміжна              | 45,20            | 24,74        |
| Пропонована           | 65,32            | 31,45        |

Дані таблиці 3.4 також вочевидь ілюструють ефективність пропонованого варіанту світлофорного регулювання, але далеко не в усіх ситуаціях підтверджують коректність аналітичних оцінок середнього часу затримки ТЗ. Відмінності в першу

чергу стосуються перевищення експериментальних оцінок над аналітичними при зростанні інтенсивності ТП.

Відмінності в експериментальних та аналітичних оцінках пояснюються обмеженими умовами використання залежності (2.14), яка побудована на припущенні про повний роз'їзд ТЗ, що накопичилися перед світлофором за дозвільну фазу циклу. Тобто в ній не враховується час очікування можливості проїзду для ТЗ, що не встигли подолати перехрестя за чергову дозвільну фазу. В даному розрахунку ця умова виконується лише в деяких випадках, таблиця 3.5.

Таблиця 3.5 – Рівень завантаження лівопоротного напрямку на перехресті просп. Науки та вул. Новгородської в бік Центрального парку культури та відпочинку

| Інтенсивність руху ТЗ | Варіант циклу, с |              |
|-----------------------|------------------|--------------|
|                       | Існуючий         | Пропонований |
| Низька                | 0,329            | 0,219        |
| Поточна               | 0,658            | 0,439        |
| Проміжна              | 0,906            | 0,604        |
| Пропонована           | 1,154            | 0,769        |

Рівень завантаження розрахований виходячи з фактичної ПС смуги руху в даному напрямку, яка дорівнює 1600 од./год. для поточного стану СО та 2400 од./год. для пропонованого варіанту роботи світлофора.

Дані таблиці 3.5 достатньо повно пояснюють розходження між аналітичною та експериментальними оцінками середнього часу затримки ТЗ на регульованому перехресті, так як саме зростання рівня завантаження смуги руху призводить до збільшення часу очікування можливості проїзду для ТЗ, що не встигли подолати перехрестя за чергову дозвільну фазу. Ці витрати часу має враховувати формула Вебстера [23], тому доцільно розрахувати оцінки витрат часу на затримку ТЗ для визначених умов руху на перехресті просп. Науки та вул. Новгородської також і за нею, таблиця 3.6.

Формула Вебстера має обмеження по використанню за рівнем завантаження, який не повинен перевищувати значення 0,9 [23], що й підтверджується даними таблиці 3.6, але це не єдиний її недолік. Виходячи з даних таблиці 3.6, формула Вебстера надає дещо завищені значення затримки для всіх рівнів завантаження смуги руху менших 1,0, у порівнянні з експериментальними значеннями.

Таблиця 3.6 – Розрахункова оцінка середнього часу затримки ТЗ на лівопоротному напрямку перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської за формулою Вебстера [23]

| Інтенсивність руху ТЗ | Варіант циклу, с |              |
|-----------------------|------------------|--------------|
|                       | Існуючий         | Пропонований |
| Низька                | 26,56            | 25,38        |
| Поточна               | 32,11            | 27,86        |
| Проміжна              | 66,25            | 30,63        |
| Пропонована           | —                | 37,69        |

Виходячи з цих результатів, для повної оцінки ефективності альтернативних варіантів роботи СО на даному перехресті, формули Вебстера, рівно як і інших, розроблених на цей час залежностей виявилось недостатньо. Необхідна розробка нових, адекватних аналітичних моделей часу затримки ТЗ на регульованих перехрестях, які можуть враховувати будь-який рівень завантаження смуги руху. Так як розробка таких моделей у даному дослідженні не можлива внаслідок їхньої дуже високої складності, а при виконанні першого етапу побудови ПК аналітична оцінка часу затримки ТЗ на перехрестях ділянки просп. Науки, що координується, є необхідною, у подальшому для цих цілей буде використовуватися формула Вебстера [23]. При цьому слід мати на увазі особливості використання цієї моделі затримки, які полягають в обмеженому діапазоні її працездатності і неможливості оцінки затримок при рівнях навантаження більших за 0,9 [23].

### 3.3 Експериментальне визначення граничного рівня завантаження для другорядних підходів до міської магістралі з координованим управлінням

Граничний рівень завантаження для другорядних підходів до ММ з координованим управлінням є важливим параметром, дотримання якого на першому етапі обумовлене двома факторами: використанням формули Вебстера [23] для оцінки затримок ТЗ при подоланні ділянки ММ, що координується, та необхідністю надання проєктувальнику реальних меж його можливостей при виборі раціонального розміру пачки ТЗ у ЗХ. Обмежені можливості аналітичних та емпіричних залежностей часу затримки на регульованих перехрестях, доступних на цей час, диктують необхідність експериментального визначення шуканої величини.

Для проведення експерименту використовувалась імітаційна модель перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської, створена у програмному середовищі VISSIM, яка описана у попередньому підрозділі дисертаційної роботи. Це перехрестя має доволі велику площу і якісне дорожнє покриття, що забезпечує досить вільні умови руху на самому об'єкті, тобто не обмежує швидкість ТЗ при старті від стоп-лінії та надалі при розгоні для будь-якого напрямку руху. Тому умови спостереження за часом затримки ТЗ на цьому перехресті при під'їзді до нього з боку вул. Новгородської можна вважати загальними для більшості аналогічних об'єктів. Це твердження також стосується й параметрів роботи світлофорів на ньому.

В попередньому розділі також була отримана аналітична залежність для середнього часу очікування проїзду через регульоване перехрестя (2.8), за умови, що роз'їзд потоку ТЗ в період дозвільного сигналу триває принаймні до тих пір, поки всі ТЗ роз'їдуться. У цьому випадку не враховуються затримки ТЗ, пов'язані з очікуванням наступного дозвільного такту в циклі. Тому вона є нижньою оцінкою затримок ТЗ на регульованому перехресті, яка не враховує вплив рівня навантаження на час затримок. Таку властивість формули (2.8) доцільно використовувати для визначення шуканого максимального рівня завантаження напрямку руху, тобто для порівняння з експериментальними даними.

Це обумовлене тим, що імітаційне моделювання надає випадкові значення часу очікування, вибір критичних значень з яких є нетривіальною задачею. Орієнтуватися можна лише на середні значення масиву результатів, отриманих для одних умов функціонування, чого може виявитися недостатнім. Аналогічне ствердження справедливе й для другого моменту величини затримки, отримуваної за результатами моделювання. Тому забезпечити надійне визначення шуканої величини може лише сумісне використання аналітичної та експериментальної оцінки часу затримок ТЗ на регульованому перехресті.

Сам експеримент складався зі 100 імітацій в моделі з діапазоном вхідного навантаження від 0,75 до 0,89, який був визначений за результатами попереднього експерименту, крок зміни навантаження дорівнював 0,02. На кожному кроці виконувалось 10 імітацій з різними значеннями старту імітації. Всі розрахунки, в яких фактичне навантаження на напрямок не досягло значення 0,745, у подальшому не розглядались, тому остаточна кількість імітацій склала 90 одиниць, табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати імітаційного експерименту з оцінки часу затримки ТЗ

| Рівень завантаження | Характеристика затримок |            |                          |
|---------------------|-------------------------|------------|--------------------------|
|                     | Кількість, од.          | Середнє, с | Стандартне відхилення, с |
| 0,748               | 2                       | 25,4       | 0,113                    |
| 0,758               | 5                       | 24,6       | 3,841                    |
| 0,769               | 8                       | 26,8       | 4,641                    |
| 0,780               | 6                       | 29,4       | 3,383                    |
| 0,791               | 16                      | 29,2       | 10,942                   |
| 0,802               | 14                      | 32,1       | 4,151                    |
| 0,813               | 8                       | 35,2       | 4,231                    |
| 0,823               | 6                       | 39,0       | 4,482                    |
| 0,834               | 12                      | 36,0       | 7,792                    |
| 0,845               | 5                       | 34,7       | 6,055                    |
| 0,856               | 7                       | 36,3       | 6,016                    |
| 0,878               | 1                       | 48,7       | 0,000                    |

За результатами експерименту помітним є зростання загальних затримок ТЗ при збільшенні рівня навантаження, що підтвердив і регресійний аналіз результатів експерименту, який дав наступний результат:

$$W' = 134,52 \cdot \rho - 76,15, \quad (3.1)$$

де  $W'$  – розрахункова середня затримка ТЗ на регульованому перехресті, с;  
 $\rho$  – рівень навантаження на другорядний під'їзд до ММ.

Отримана модель (3.1) не виглядає переконливою навіть ззовні, що підтверджується її статистичними характеристиками, табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Статистична характеристика залежності (3.1)

| Назва показника                           | Значення             |
|-------------------------------------------|----------------------|
| Коефіцієнт кореляції                      | 0,519                |
| Коефіцієнт детермінації                   | 0,270                |
| Стандартна похибка                        | 6,623                |
| Інформаційна значущість (критерій Фішера) | 32,519               |
| Ймовірність критерію Фішера               | $1,55 \cdot 10^{-7}$ |
| t-статистика Y-перетину                   | -4,002               |
| t-статистика коефіцієнту при $\rho$       | 5,703                |

Спроби знайти переконливу нелінійну форму зв'язку між досліджуваними показниками не привели до помітного покращення статистичних характеристик моделі. Тому, для отримання шуканого значення граничного рівня завантаження другорядних підходів до ММ з координованим управлінням необхідно використовувати інші інструменти, до числа яких входить порівняння результатів з аналітичним прогнозуванням за залежністю (2.8). Таке порівняння сумісно з моделлю Вебстера [23], у графічній формі представлено на рисунку 3.10.

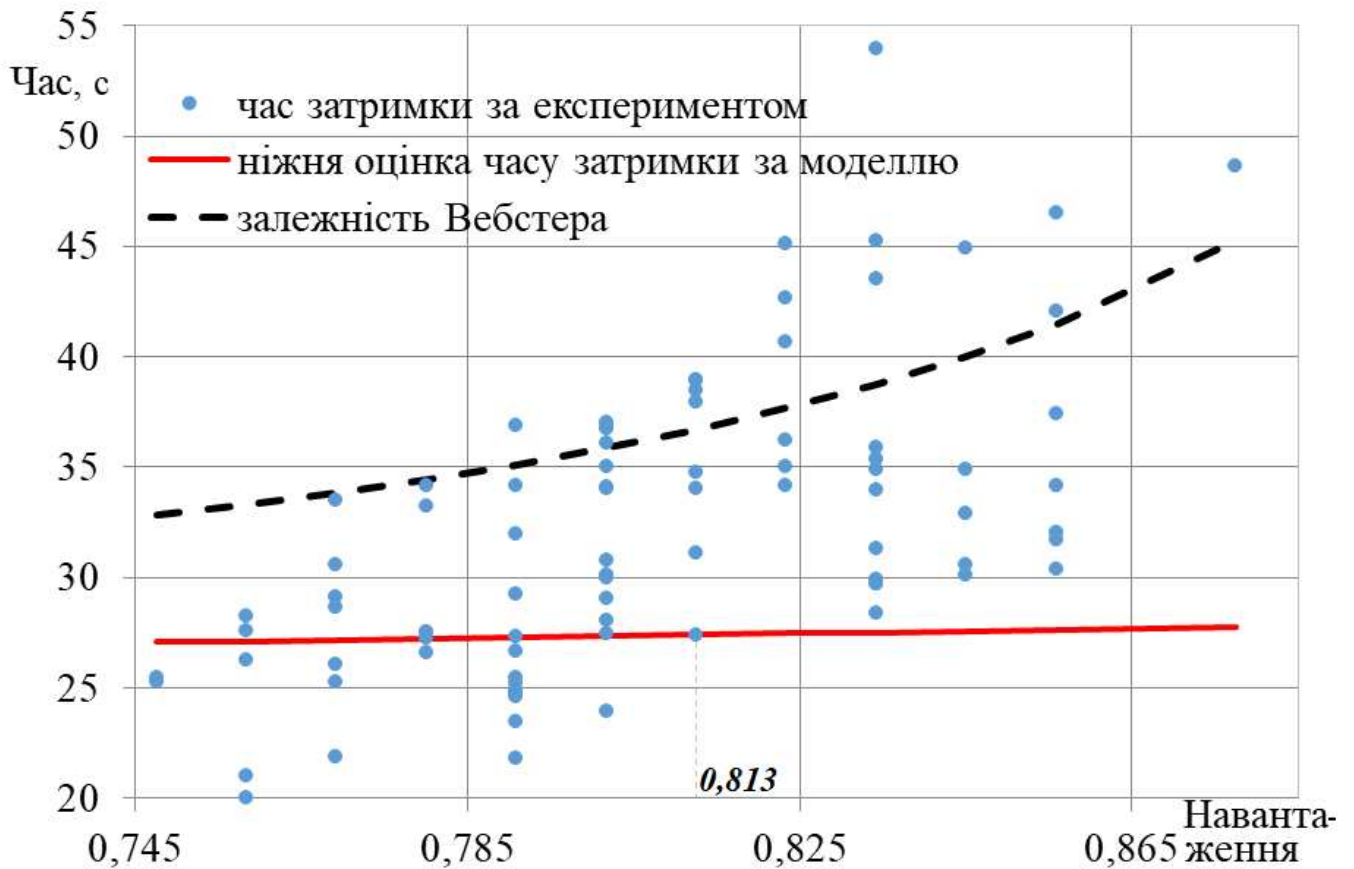


Рисунок 3.10 – Результати імітаційного експерименту та розрахунки за аналітичною моделлю (2.8) та емпіричною залежністю Вебстера

Зіставлення результатів імітаційного експерименту з розрахунками за моделлю надають змогу виділити перехід до прискореного зростання експериментальних значень часу затримки, коли вони перестають попадати до області, нижчої ніж аналітична оцінка. Це трапляється на рівні навантаження 0,813 та саме це значення можна прийняти за граничне значення рівня завантаження другорядних підходів до ММ з КУ, яке має використовуватися при побудові ПК.

Що стосується розрахунків за моделлю Вебстера [23], то візуально вони не суперечать результатам експерименту, хоча й виглядають як деяке відображення їхньої верхньої оцінки. З урахуванням того, що при побудові ПК на ММ ця модель потрібна для попередньої оцінки альтернативних планів ЗХ, а кінцева оцінка ефективності побудови має виконуватись за допомогою імітаційного експерименту, рівень відображення моделлю Вебстера випадкових результатів експерименту вигля-

дає цілком придатним для її використання на другому, емпіричному етапі побудові ПК на ММ.

### Висновки по третьому розділу

1. Обраний за об'єкт для вивчення характеристик ТП та створення ПК на ньому фрагмент однієї з магістралей центральної частини міста Харкова – просп. Науки, від просп. Незалежності, який є його початком, до вул. Мінської має достатню довжину та кількість СО для реалізації ПК, більшість з яких мають трифазний СЦ з виділеним ЛП, що створює додаткові можливості для налаштування ПК у зворотному напрямку. Зібрані дані про ІР ТЗ на просп. Науки дозволили визначити, що найбільш навантаженим напрямком руху ТП протягом практично всієї доби є напрямок від вул. Мінської у бік центру міста до просп. Незалежності та саме цей напрямок необхідно прийняти як прямий при побудові ПК.

2. Значну частину доби з 8<sup>00</sup> до 19<sup>00</sup> для розглянутого фрагменту просп. Науки характерною є висока інтенсивність ТП при якій черга ТЗ, що очікують на можливість подолання перехрестя на просп. Науки вкрай рідко повністю роз'їжджається за час горіння дозвільного сигналу. Це свідчить про високе навантаження цього фрагменту просп. Науки, що має відображатися на часі його подолання ТЗ, які рухаються маршрутом ЗХ та має бути враховане під час оцінки ефективності ПК.

3. Отримана в дослідженні аналітична модель очікування дозвільного сигналу світлофору побудована на жорсткому припущенні про повний роз'їзд черги ТЗ за дозвільний сигнал світлофора, надає нижню оцінку затримок ТЗ, і є альтернативою відомої формули Вебстера на аналітичному етапі створення ПК. На наступному етапі розподілу резервів часу циклу між основними його тактами та визначенні раціональних зсувів початку циклів, доцільно використовувати саме формулу Вебстера, яка хоча й має обмеження по використанню за рівнем завантаження, але надає більш реальні оцінки затримок ТЗ на перехрестях.

4. Як граничний рівень завантаження другорядних підходів до ММ з координуваним управлінням, який має використовуватися при побудові ПК, доцільно використовувати значення 0,813, при якому експериментальні значення часу затримок перестають потрапляти до області, нижчої ніж його аналітична оцінка.

5. Завчасне включення зеленої стрілки в додатковій секції світлофора для лівоповоротних ТЗ дозволяє збільшити кількість ТЗ, що встигнуть роз'їхатися за дозвільний сигнал за рахунок ТЗ, які можуть розташуватися за стоп-лінією перехрестя під час попередньої фази СЦ, і підвищити ПС лівоповоротного напрямку майже у 1,5 рази без скорочення тривалості інших фаз і СЦ в цілому та приводить до більш ніж двократного скорочення втрат часу ТЗ на очікування проїзду через перехрестя, при високих рівнях навантаження смуги руху. Реалізація цього заходу доцільна за умови забезпечення адаптивної роботи СО на відповідних перехрестях, яка має гарантувати безпечні умови проїзду перехрестя.

6. Отримані в даному підрозділі результати дозволяють перейти до практичної застосування запропонованого методу формування плану магістральної координації шляхом створення відповідної методики, її реалізації у вигляді спеціального ПЗ і побудови ПК на фрагменті просп. Науки в м. Харків.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [1-3, 7, 9].

## РОЗДІЛ 4

## РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО КООРДИНОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ НА МІСЬКІЙ МАГІСТРАЛІ

4.1 Розробка плану координації роботи світлофорів на ділянці просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінською

Задля реалізації запропонованого методу побудови ПК на ділянці просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської, була створена комп'ютерна програма «Wave» [14], в якій були реалізовані всі необхідні обчислення і створені інтерфейси для внесення характеристик досліджуваної ділянки, вибору раціональної пачки ЗХ і налаштування її зустрічного напрямку. За її допомогою, спочатку були розраховані параметри СЦ для етапу аналітичної оцінки ефективності ПК, таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахункові початкові параметри СЦ, с

| Назва другоряд-<br>ної вулиці | Час, необхідний для проїзду ТЗ через перехрестя |                     |                 |                              | Про-<br>міжні<br>такти | Ре-<br>зерв |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|------------------------|-------------|
|                               | пачки<br>ЗХ                                     | лівопо-<br>воротних | додат-<br>кових | з другорядних на-<br>прямків |                        |             |
| Прямий напрямок               |                                                 |                     |                 |                              |                        |             |
| Мінська                       | 36                                              | 0                   | 0               | 14                           | 6                      | 21          |
| Новгородська                  | 20                                              | 14                  | 6               | 16                           | 9                      | 11          |
| Космічна                      | 18                                              | 14                  | 9               | 20                           | 9                      | 7           |
| Бакуліна                      | 18                                              | 14                  | 9               | 20                           | 9                      | 7           |
| Культури                      | 22                                              | 14                  | 11              | 18                           | 9                      | 3           |
| Незалежності                  | 17                                              | 0                   | 9               | 24                           | 6                      | 21          |
| Зворотний напрямок            |                                                 |                     |                 |                              |                        |             |
| Мінська                       | 27                                              | 0                   | 13              | 14                           | 6                      | 17          |
| Новгородська                  | 21                                              | 14                  | 11              | 20                           | 9                      | 2           |
| Космічна                      | 17                                              | 14                  | 11              | 24                           | 9                      | 2           |
| Бакуліна                      | 20                                              | 14                  | 6               | 26                           | 9                      | 2           |
| Культури                      | 21                                              | 14                  | 11              | 22                           | 9                      | 0           |
| Незалежності                  | 25                                              | 0                   | 0               | 32                           | 6                      | 14          |

Шляхом вибору раціональної величини пачки ЗХ в прямому та зворотному напрямках була визначена тривалість синхронізованого СЦ для СО, що розташовані на ділянці, яка склала 77 сек. і збіглася з максимальним циклом, який діє на досліджуваній ділянці на цей час. Довжина пачок ЗХ склала 16 і 11 ТЗ у прямому і зворотному напрямках відповідно. Така помітна різниця між ними пояснюється тим, що основний потік у зворотному напрямку утворюється на другому перехресті (з вул. Культури), де до пачки ЗХ з першого перехрестя додається значна кількість ТЗ з вул. Данилевського та правоповоротні ТЗ з просп. Незалежності.

На отриманій інформаційній основі за залежністю (4.1) були розраховані рівні завантаження та затримки для кожного напрямку руху, таблиця 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок затримок ТЗ для схеми координації

| Назва другорядної вулиці | Рівень завантаження |                |             | Час затримки, сек. |                |             |
|--------------------------|---------------------|----------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|
|                          | пачки               | лівоповоротних | другорядних | пачки              | лівоповоротних | другорядних |
| Прямий напрямок          |                     |                |             |                    |                |             |
| Мінська                  | 0,84                | 0,00           | 0,07        | 27,5               | 0,0            | 23,9        |
| Новгородська             | 0,84                | 0,62           | 0,75        | 7,0                | 34,4           | 39,1        |
| Космічна                 | 0,83                | 0,40           | 0,80        | 5,8                | 28,4           | 37,4        |
| Бакуліна                 | 0,86                | 0,66           | 0,81        | 5,8                | 36,0           | 38,7        |
| Культури                 | 0,83                | 0,75           | 0,80        | 4,8                | 41,3           | 40,3        |
| Незалежності             | 0,82                | 0,00           | 0,83        | 5,3                | 0,0            | 36,7        |
| Зворотний напрямок       |                     |                |             |                    |                |             |
| Мінська                  | 0,66                | 0,00           | 0,07        | 4,0                | 0,0            | 23,9        |
| Новгородська             | 0,68                | 0,33           | 0,60        | 4,5                | 27,1           | 27,8        |
| Космічна                 | 0,66                | 0,44           | 0,66        | 4,5                | 29,1           | 26,4        |
| Бакуліна                 | 0,65                | 0,66           | 0,62        | 4,5                | 36,0           | 23,6        |
| Культури                 | 0,66                | 0,46           | 0,65        | 3,5                | 29,5           | 27,7        |
| Незалежності             | 0,66                | 0,00           | 0,63        | 26,1               | 0,0            | 19,6        |

$$\rho_i = \frac{\alpha_i \cdot \Delta_i}{t_i}, \quad (4.1)$$

де  $\rho_i$  – рівень завантаження  $i$ -го напрямку руху на перехресті;

$\alpha_i$  – середня кількість ТЗ на  $i$ -му напрямку руху на перехресті за СЦ, од.;

$\Delta_i$  – середній час зайняття ТЗ  $i$ -го напрямку руху на перехресті, с/од.;

$t_i$  – тривалість ОТ для  $i$ -го напрямку руху в СЦ, с.

Обрані довжини пачок призводять до незначного (0,83 понад 0,813) перевищення граничного рівня завантаження другорядних підходів на просп. Незалежності для прямої ЗХ, що може вважатися припустимим як виключення. Визначені рівні завантаження надають змоги розрахувати середній час затримки ТЗ на регульованих перехрестях для тих підходів, на яких прибуття ТЗ є не груповим, а випадковим. До них відносяться підходи до ММ з другорядних напрямків, підхід до першого перехрестя ділянки, що координується і лівоповоротні потоки з ММ, оскільки період прибуття до них охоплює дуже значну частину СЦ, яка складається з ОТ ЗХ та другорядного підходу. Час очікування для пачки ЗХ на всіх перехрестях ділянки, що координується, починаючи з другого перехрестя на першому етапі вважається рівним 0. Для порівняння з витратами часу учасників руху при існуючому варіанті ОДР також були розраховані й вони у припущенні про випадкове прибуття ТЗ до світлофорів з будь-якого напрямку руху, що є цілком виправданим з урахуванням відсутності синхронізації та кратності у половині значень тривалості поточних СЦ, таблиця 4.3.

Вже при порівнянні даних з таблиць 4.2 та 4.3 помітно, що на етапі аналітичного оцінювання, без урахування затримок ТЗ при русі у зворотному напрямку ЗХ, ПК теоретично забезпечує значно кращі умови руху по ділянці просп. Науки, ніж існуючий варіант ОДР. Але це можна краще зрозуміти, спираючись на дані таблиці 4.4, де окрім власне часу затримок на перехрестях наведено загальний критерій ефективності ПК (2.1), який додатково враховує кількість вимушених зупинок на шляху ТЗ.

Таблиця 4.3 – Розрахунок затримок ТЗ для існуючих циклів

| Назва другорядної вулиці | Рівень завантаження |                |             | Час затримки, сек. |                |             |
|--------------------------|---------------------|----------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|
|                          | пачки               | лівоповоротних | другорядних | пачки              | лівоповоротних | другорядних |
| Прямий напрямок          |                     |                |             |                    |                |             |
| Мінська                  | 0,80                | 0,00           | 0,03        | 10,3               | 0,0            | 17,6        |
| Новгородська             | 0,74                | 0,46           | 0,46        | 14,9               | 22,9           | 25,7        |
| Космічна                 | 0,73                | 0,29           | 0,66        | 30,4               | 16,6           | 22,4        |
| Бакуліна                 | 0,75                | 0,47           | 0,68        | 32,3               | 18,3           | 23,0        |
| Культури                 | 0,96                | 0,53           | 0,60        | 76,8               | 27,0           | 36,8        |
| Незалежності             | 0,48                | 0,00           | 0,58        | 9,9                | 0,0            | 17,0        |
| Зворотний напрямок       |                     |                |             |                    |                |             |
| Мінська                  | 0,60                | 0,00           | 0,03        | 8,4                | 0,0            | 17,6        |
| Новгородська             | 0,81                | 0,24           | 0,46        | 17,0               | 19,9           | 25,7        |
| Космічна                 | 0,61                | 0,31           | 0,66        | 22,7               | 16,8           | 22,4        |
| Бакуліна                 | 0,60                | 0,47           | 0,68        | 21,4               | 18,3           | 23,0        |
| Культури                 | 0,79                | 0,32           | 0,60        | 35,9               | 25,4           | 36,8        |
| Незалежності             | 0,47                | 0,00           | 0,58        | 9,5                | 0,0            | 17,0        |

Таблиця 4.4 – Порівняння аналітичних затримок ТЗ на ділянці, що координується, з врахуванням кількості зупинок, с

| Джерело затримки                       | План координації | Існуюча схема ОДР |
|----------------------------------------|------------------|-------------------|
| Прямий напрямок руху ЗХ (у бік центру) | 15,73            | 27,40             |
| Зворотний напрямок руху ЗХ (з центру)  | 10,22            | 19,43             |
| Загалом                                | 13,13            | 23,64             |
| Загалом із зупинками                   | 22,15            | 39,18             |

Таке значне, майже двократне, скорочення часу затримки ТЗ на перехрестях пояснюється його змістом, де враховується лише час очікування включення дозвільного сигналу світлофора. Але у подальшому слід враховувати також й інші еле-

менти часу подолання ТЗ ділянки ММ, що координується, тому варто очікувати деякого скорочення різниці між затримками в ПК та існуючою схемою ОДР при оцінці результатів його реалізації. До того ж сам процес побудови повного ПК роботи СО передбачає потенційне зниження його ефективності у зворотному напрямку, що обумовлюється коливаннями часу подолання перегонів ділянки ММ, при яких ПК не буде погіршений лише у виключних випадках.

Тобто перший, аналітичний етап розрахунків забезпечує побудову ПК та підтверджує його доцільність, але оцінка затримок у ньому є дуже вузькою, не враховує тривалості руху ТЗ по досліджуваній ділянці просп. Науки та потребує додаткової багатосторонньої оцінки за допомогою різноманітних об'єктивних методів, включаючи імітаційне моделювання функціонування ділянки ММ. Це необхідно робити після остаточного визначення параметрів ПК за допомогою графічного методу, реалізованого в програмі «Wave» і, бажано, після його реального впровадження, на основі фактичних параметрів руху ТП.

Ця, остаточна побудова ПК виконується в програмі «Wave» у ручному режимі, шляхом підбору раціональної послідовності ОТ у кожному циклі за рахунок резервів часу на некритичних циклах і корегування зсувів початку циклів, з метою мінімізації затримок ТЗ на перехрестях ділянки ММ у зворотному напрямку. Початком кожного циклу вважається початок дозвільної фази для прямого напрямку руху ТЗ у бік центру. Початкове розташування розрахункових циклів, наведене на рисунку 4.1, містить у собі розбіжності між дозвільними сигналами в прямому і зворотному напрямках, а також накладання інших несумісних фаз практично для всіх СО. Їх необхідно усунути в ручному режимі, користуючись, у першу чергу, можливостями, які надає для цього фаза ЛП з ММ.

На цьому і наступному рисунках прийнята схема позначень, в якій період дії кожного ОТ в СЦ відображається відповідним кольором (зеленим – фаза дозвільного сигналу; червоним – фаза заборони руху; темно-коричневим – фаза ЛП з ММ, жовтим – фаза проміжних тактів; синім – резервний або невикористаний час. Фази циклів прямого напрямку руху у бік центру відображаються зверху, зустрічного напрямку – знизу.

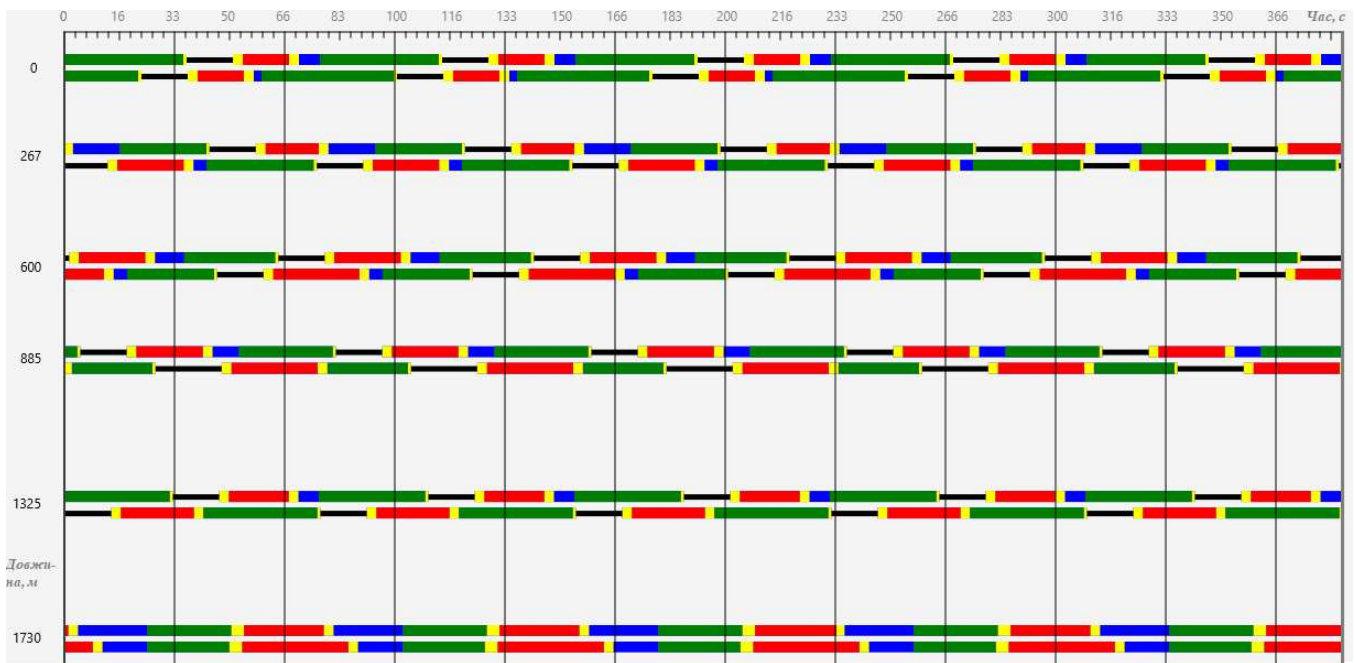


Рисунок 4.1 – Початкова діаграма побудови ПК

Як можна побачити, невідповідності в циклах зворотного напрямку, згідно із запланованими зсувами циклів прямого напрямку, розпочинаються вже на другому перехресті з вул. Культури, на якому фаза ЗХ у зворотному напрямку накладається на другорядну фазу прямого напрямку. Такі та інші невідповідності циклів продовжують зростати та сягають максимуму на останньому перехресті з вул. Мінською, де фаза ЗХ зворотного напрямку накладається на другорядну фазу прямого напрямку, рівно як протилежне накладання другорядної фази на фазу ЗХ.

Задача проєктувальника усунути ці невідповідності за допомогою використання резервів часу, переміщення вздовж осі часу дозвільних фаз для ЛП з ММ і фаз другорядного напрямку. Якщо результат не досягається, в хід вступають фази ЗХ зворотного напрямку. Але тоді слід розуміти, що будь який зсув цих тактів відносно розрахункових зсувів призводить до зростання часу очікування. У даному випадку уникнути переміщення фаз ЗХ зворотного напрямку не вдалося і остаточні зсуви початку циклів у зворотному напрямку скореговані на 6, 14, 12, 12 та 13 с. для перехресть просп. Науки з вулицями Мінською, Новгородською, Космічною, Бакуліна та Культури відповідно. Це означає помітне погіршення умов руху звор-

тної ЗХ у порівнянні з прямою ЗХ і диктує необхідність ретельної оцінки ефективності створеного ПК, який графічно представлений на рис. 4.2 та оцифрований у табл. 4.5.

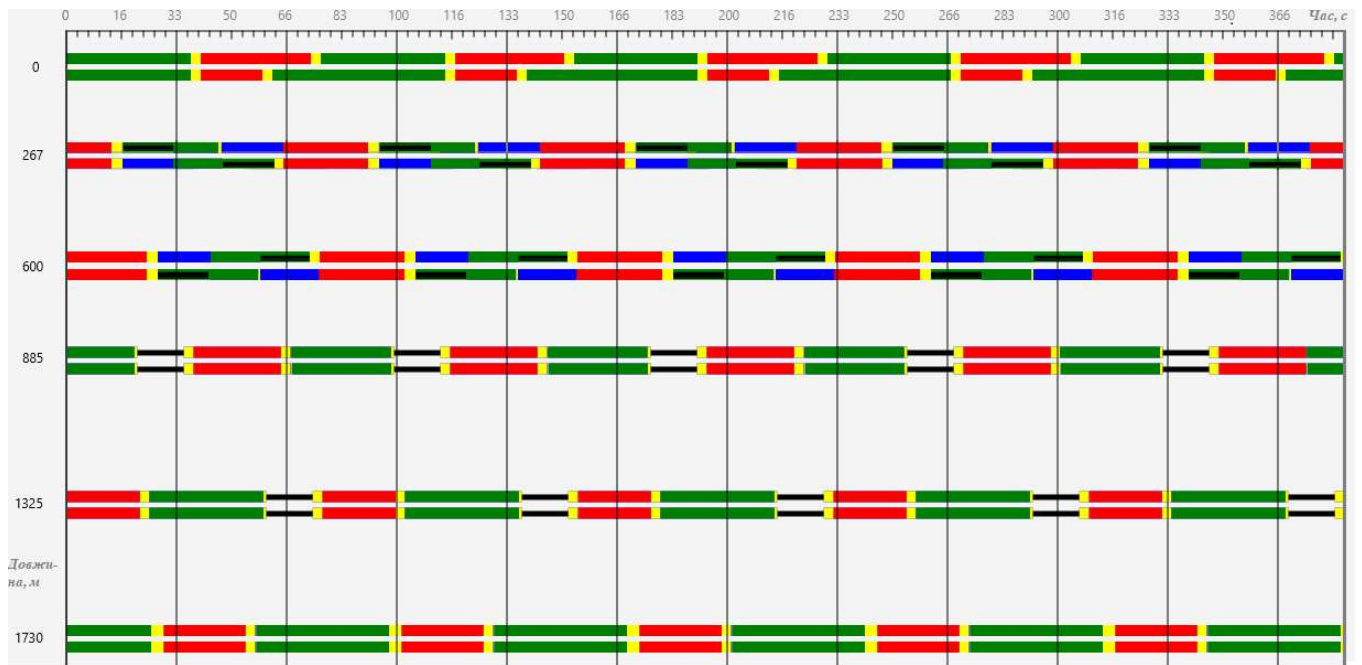


Рисунок 4.2 – Остаточна діаграма побудови ПК

Таблиця 4.5 – ПК світлофорів на просп. Науки, секунди

| Назва перехре-<br>стя по просп.<br>Науки | Основні такти |               |                      |               |               | Про-<br>міжні<br>такти | Ра-<br>зом | Зсув |
|------------------------------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|------------------------|------------|------|
|                                          | просп. Науки  |               | Дру-<br>горя-<br>дні | Лівий поворот |               |                        |            |      |
|                                          | до<br>Центру  | від<br>Центру |                      | до<br>Центру  | від<br>Центру |                        |            |      |
| вул. Мінська                             | 36            | 49            | 22                   | -             | -             | 6                      | 77         | 0    |
| вул. Новгород-<br>ська                   | 26            | 23            | 25                   | 20            | 17            | 6                      |            | 17   |
| вул. Космічна                            | 29            |               | 25                   | 14            |               | 9                      |            | 44   |
| вул. Бакуліна                            | 30            |               | 24                   | 14            |               | 9                      |            | 68   |
| вул. Культури                            | 27            |               | 22                   | 19            |               | 9                      |            | 25   |
| просп. Незале-<br>жності                 | 35            |               | 36                   | -             |               | 6                      |            | 57   |

За результатами побудови ПК світлофорів на фрагменті просп. Науки кардинально змінилися два цикли – на перехресті просп. Науки з вулицями Новгородською і Космічною. Для інших перехресть, основні параметри циклів (зміст тактів) залишилися як у діючому варіанті, змінилися лише довжини фаз у циклі.

Але для практичної реалізації отриманих даних замало, оскільки налаштування контролерів здійснюється за документами, аналогічними тим, що наведені у додатку А, як характеристика СО, до реалізації створеного ПК. До їх числа відносяться: таблиця підключення на перехресті; схема пофазного роз'їзду; розклад роботи контролера та циклограма роботи СО. Мінімально необхідними позиціями з цього переліку, що вимагаються від розробників ПК, є схеми пофазного роз'їзду і циклограми, які були створені для всіх перехресть ділянки просп. Науки, що координується, додаток В. На цьому документальна частина створення ПК на об'єкті дослідження вважається завершеною.

Впровадження розробленого ПК здійснювалося у період з 15 по 22 грудня 2021 року, шляхом переобладнання та налаштування діючих контролерів на всіх СО послідовно. З 23 грудня 2021 року всі світлофори в ПК цілодобово функціонують у режимі ЗХ.

4.2 Оцінка ефективності розробленого плану координації та розробка практичних рекомендацій щодо подальшого використання результатів дослідження

Паралельно з формуванням ПК об'єкт експериментальних досліджень моделювався за допомогою програмних продуктів VISSIM та SUMO для того, щоб мати можливість точнішого налаштування ПК та оцінки його ефективності на кінцевому етапі дослідження. Програма VISSIM 5.0 є комерційним ПЗ, ліцензія на використання якого належить ХНАДУ з 2008 року. Створена в ньому імітаційна модель, рис. 4.3, була налаштована на діючі до впровадження ПК параметри роботи СО на фрагменті просп. Науки, що координується. Але, нажаль, її прогони показали, що

модель не здатна допомогти ані у тонкому налаштуванні ПК, ані в адекватній оцінці результатів подолання ТЗ цього фрагменту ВДМ.

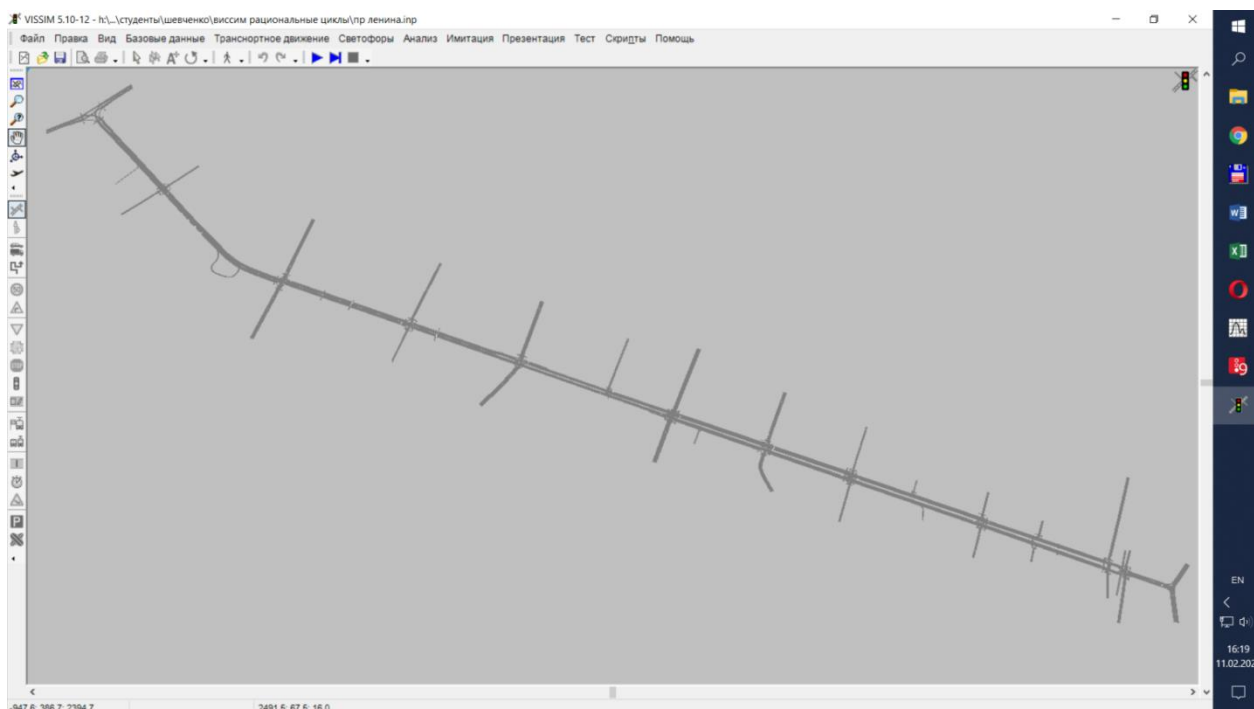


Рисунок 4.3 – Відображення моделі фрагменту просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінською у ПЗ VISSIM

Причина невідповідності VISSIM моделі реальному об'єкту криється в способі завдання вихідних даних щодо інтенсивності ТП, при якому на вхід до перехрестя подається загальна інтенсивність підходу, а розподіл напрямків подальшого руху здійснюється її долями. Цей спосіб добре підходить для локального перехрестя, але при збільшенні кількості СО у моделі, він поступово стає не здатним забезпечити реальний опис розподілу ТЗ між напрямками руху, що відображається в основному на пачці ЗХ, яка вкрай рідко досягає останнього перехрестя напрямку у більш-менш значущому складі. Найчастіше жоден ТЗ зі стартового складу пачки ЗХ на першому перехресті, до кінця фрагменту по просп. Науки взагалі не доїжджає. Така ситуація не відповідає реальному стану речей, коли більшість ТЗ з початкової пачки досягає останнього перехрестя фрагменту, що координується, тому створена модель була визнана недостатньо точною. Можливо причина цього поля-

гає у віці версії, доступної для використання в даному дослідженні, а свіжіші версії VISSIM забезпечують більш адекватний розподіл ТЗ між напрямками руху.

Наступна спроба створення адекватної імітаційної моделі об'єкта експериментальних досліджень була здійснена у вільному ПЗ SUMO, яке достатньо широко використовується у світі. Головною причиною вибору цього ПЗ став спосіб завдання попиту в ній у вигляді матриці кореспонденцій ТЗ. Створення такої матриці за відомими значеннями інтенсивностей ТП на вході до фрагменту ВДМ є не тривіальним завданням, але воно було успішно виконане і модель фрагменту просп. Науки між вул. Мінською та просп. Незалежності у SUMO була створена, рис. 4.4.

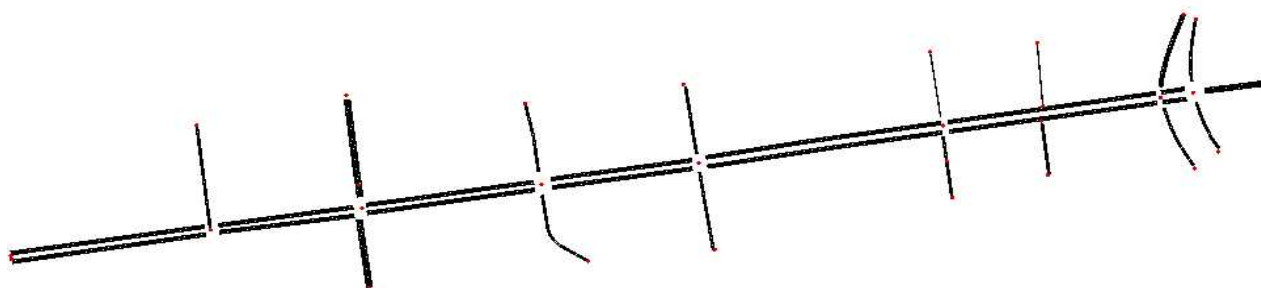


Рисунок 4.4 – Відображення моделі фрагменту просп. Науки між вул. Мінською та просп. Незалежності у ПЗ SUMO

Налаштування СЦ у цій моделі також відповідали параметрам роботи СО до впровадження розробленого ПК. Прогони цієї моделі показали бажану відповідність розподілу ТЗ між напрямками руху, але також як й попередня модель не продемонстрували тієї точності відображення реального транспортного процесу, яка може вважатися достатньо високою для формулювання оцінки ефективності ПК та наукових висновків. Створена модель може використовуватись у практичних цілях для грубої оцінки наслідків реалізації тих чи інших заходів з ОДР, коли прийнятим вважається визначення напрямку зміни показників транспортного процесу, які змінюються. Причиною недостатньої адекватності моделі SUMO реальному процесу стали часті невимушені зупинки ТЗ у процесі руху, подолати які програмними засобами налаштування у даному дослідженні не вдалося, хоча причина цього кри-

ється не в недоліках ПЗ SUMO. Головним фактором, чому ця модель не була доведена до використання у даному дослідженні, стала реальна практична реалізація створеного ПК до кінця процесу налаштування моделі SUMO, який виявився занадто довгим у порівнянні з процесом налаштування CO. Це зробило імітаційний експеримент не самим результативним способом оцінки його ефективності та, навіть, позбавило сенсу його проведення взагалі.

Головною перевагою імітаційного експерименту над оцінкою результатів реальних пересувань у різних умовах, є можливість отримання досить широкого переліку характеристик транспортного процесу в моделі. Основним з цих показників для ПК є кількість зупинок ТЗ при подоланні фрагменту ВДМ, що координується. Отримати фактичні дані щодо кількості зупинок у реальному транспортному процесі не зовсім просто. З урахуванням складнощів, які виникли під час імітаційного моделювання фрагментів ВДМ, це приводить до питання щодо однозначності у використанні критерію ефективності ПК (2.1). Не свідчать на користь врахування кількості зупинок і дані таблиці 4.4, яка містить у собі аналітичні оцінки затримок ТЗ на фрагменті, що координується. Врахування кількості зупинок не привело до зміни загального висновку щодо доцільності впровадження створеного ПК. Ще одним фактором, який обумовлює додаткові сумніви в обов'язковості використання загальноприйнятого критерію (2.1) є різна манера водіння водіїв ТЗ, які в одних і тих же умовах можуть робити зовсім різну кількість зупинок. З урахуванням цього, для оцінки ефективності ПК за допомогою реальних даних, доцільно використовувати не лише критерій (2.1), а й спрощений критерій середнього часу поїздки на фрагменті ММ, що координується:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \rightarrow \min . \quad (4.2)$$

Тоді оцінювати ефективність ПК стає можливим за допомогою інших характеристик транспортного процесу, пов'язаних з часом руху. Непрямим способом

оцінки ефективності ПК за умови сталості геометричних параметрів об'єкта дослідження є порівняння середньої швидкості руху ТЗ до та після впровадження ПК

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \rightarrow \max. \quad (4.3)$$

де  $V_i$  – швидкість руху ТЗ на фрагменті ВДМ, км/год.

Таке доповнення суттєво поширює можливості в оцінці ефективності створеного ПК на основі результатів фактичних поїздок ТЗ через фрагмент ММ, дозволяє використовувати різні інструменти та різноманітні джерела інформації, що, в свою чергу, підвищує ступінь гарантованості результатів оцінки та знижує ймовірність виникнення помилок у цьому процесі.

Зважаючи на це у дослідженні використовуються всі доступні на цей час автору способи порівняння параметрів поїздок на досліджуваному фрагменті ВДМ до та після впровадження ПК. До їх числа відносяться:

- порівняння швидкості руху на фрагменті просп. Науки, що координується та навколо неї, за допомогою сервісу Google Maps;
- дослідження часу поїздки вздовж фрагменту просп. Науки, що координується, методом «тестового автомобіля»;
- порівняння часу поїздки та швидкості руху на фрагменті просп. Науки, що координується та навколо неї, за допомогою даних сервісу TomTom.

Кожен з цих методів має власні переваги та недоліки, а тому вони доповнюють один одного при оцінці ефективності ПК на просп. Науки у м. Харків.

Сервіс Google Maps постійно збирає дані про фактичний час поїздки користувачів Android по ділянках ВДМ, потім, використовуючи дані про офіційні обмеження швидкості, рекомендовані швидкості до різних типів доріг, історію середніх швидкісних даних, фактичного часу в дорозі користувачів та інформації про рух у реальному часі алгоритми Google розраховують прогноз швидкості для ділянки ВДМ. У подальшому прогнози порівнюються з реальним фактичним часом прохо-

дження трафіку задля їх уточнення у майбутньому. Така технологія дозволяє використовувати прогнози Google для якісної оцінки середньої швидкості руху ТЗ на ділянках ВДМ.

Кількісна оцінка тут неможлива, оскільки Google не надає доступу до інформації про час руху ТЗ іншим суб'єктам, а прогнози відображаються чотирма кольорами: від зеленого (вільні умови руху) до темно червоного (дуже повільний рух). Прогнози швидкості надаються в двох режимах – поточному та на заданий користувачем час та день тижня. Перший, у більшому ступені, відображає конкретну транспортну ситуацію, яка склалася на ВДМ на момент перегляду Google мапи, завдяки усередненню швидкості лише серед ТЗ, які нещодавно проїхали через ділянку ВДМ. Другий включає в себе додаткове усереднення швидкості через аналогічний час у попередні тижні.

Для оцінки ефективності ПК, завдяки більшому усередненню, більше підходить другий спосіб, але тут треба враховувати, що алгоритми Google в цьому випадку є більш обережними в прогнозах, а тому в них значно рідше з'являються темно червоний та зелений кольори. У даній роботі для порівняння був обраний найбільш критичний для ЗХ час тижня – вечір п'ятниці (18<sup>10</sup>), коли велике навантаження припадає на її зворотний напрямок, який має гірші умови руху в порівнянні з прямою ЗХ, рис. 4.5.

Порівняння двох прогнозів достатньо переконливо свідчить на користь ПК, оскільки помітне завдяки зміні кольору підвищення швидкості руху ТЗ спостерігається практично на всьому зворотному напрямку руху ЗХ. Важливим є також те, що на рис. 4.5 не помітно погіршення умов руху на другорядних під'їздах до просп. Науки. Що стосується прямого напрямку руху ЗХ, то вона не змінила кольору, хоча як раз тут зростання швидкості ТЗ вочевидь мають бути більшими, ніж у зворотному напрямку. Це можливо пояснити широким діапазоном значень швидкості помаранчевого кольору та особливостями алгоритмів прогнозування Google на майбутнє, які значно рідше приводять до крайніх значень швидкості, ніж поточна оцінка стану ТП на ВДМ. А взагалі то цей, якісний, рівень оцінки ефективності ПК на просп. Науки приводить до висновку про позитивні результати його впровадження.

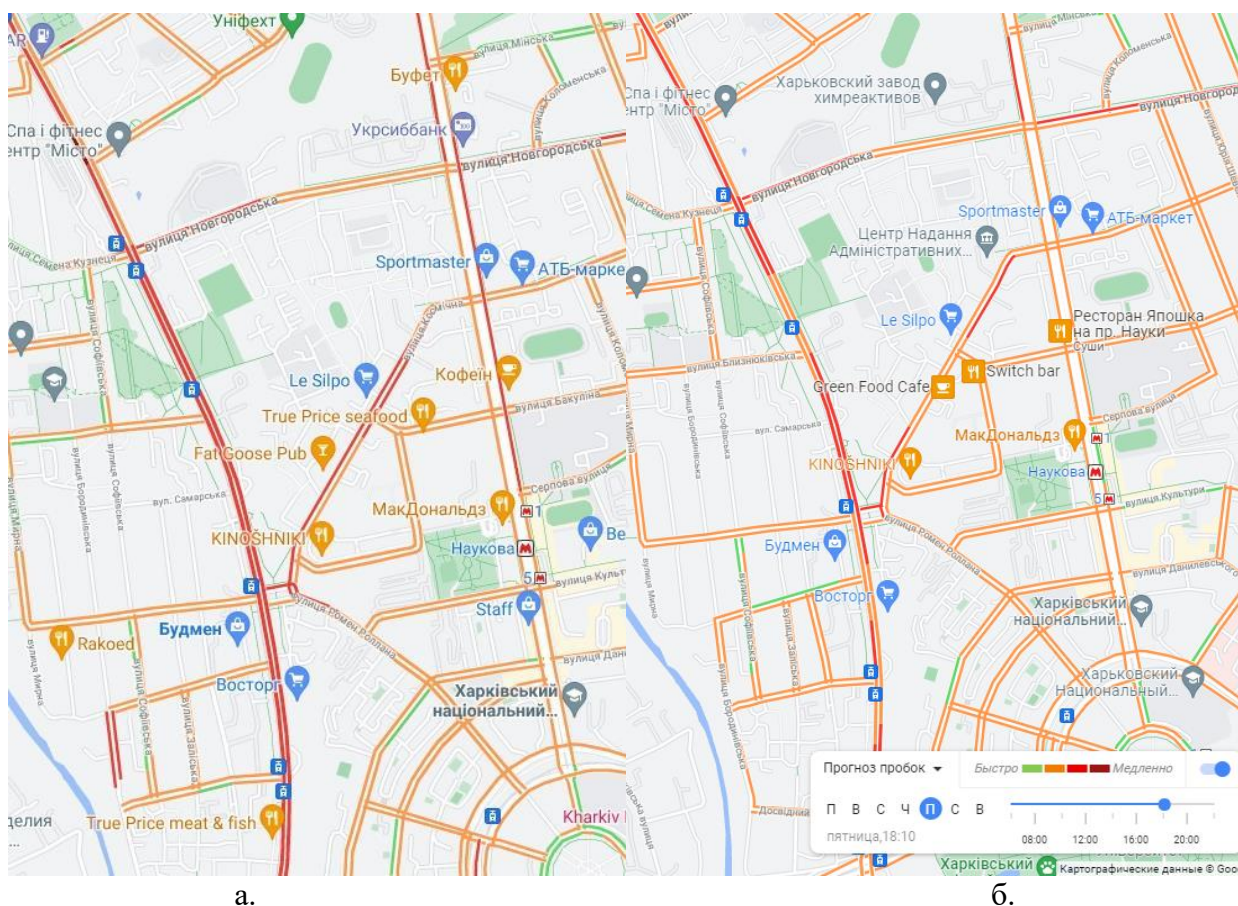


Рисунок 4.5 – Прогноз швидкості руху у сервісі Google Maps на 18<sup>10</sup> п’ятниці  
від 15.12.2021 та 15.02.2022

Також звертає на себе увагу деяке покращення стану ОДР на паралельній просп. Науки вулиці Ключковській, що може бути пояснене або загальним скороченням трафіку в період, на якому будується даний прогноз Google, або перерозподілом ТП з вул. Ключковської на просп. Науки. У першому випадку позитивний ефект від впровадження ПК скорочується, в другому – зростає. Але виявити реальний стан речей на доступних тут даних неможливо, тож загальний висновок на основі прогнозу швидкості Google можна сформулювати таким чином, що після впровадження ПК спостерігається підвищення швидкості руху на просп. Науки та навколо нього, але чи є ПК єдиною причиною цього невідомо.

Якісний підхід до оцінки ефективності ПК являється найпростішим у даному дослідженні і наступним її кроком є порівняння результатів поїздок за допомогою методу плаваючого автомобіля. Для його реалізації був залучений співробітник ХНАДУ, який мав можливість заради експерименту змінити шлях поїздки з дому (мкрн. Олексіївський) на роботу (вул. Ярослава Мудрого, 25), а також у зворотному

напрямку та здійснювати спостереження за часом подолання ним досліджуваного фрагменту просп. Науки. Кожну таку поїздку водій фіксував на відеореєстратор. Поїздки розпочалися з кінця квітня 2021 року і тривали до кінця вересня того ж року при некоординованому варіанті роботи СО. Потім вони були поновлені після впровадження ПК в грудні 2021 року. Всі поїздки, які здійснювалися в робочі дні відносяться до відповідного піку трафіку для кожного напрямку – ранкового, для прямого напрямку ЗХ з вул. Мінської до просп. Незалежності та вечірнього, для зворотного напрямку ЗХ – від просп. Незалежності до вул. Мінської.

Обробка відеоряду надає широкі можливості для оцінки ефективності ПК, у тому числі дозволяє визначити кількість зупинок при подоланні фрагменту просп. Науки, що координується. Зупинкою вважалися усі випадки, коли швидкість автомобіля знижувалася до інтервалу від 0 до 10 км/год., але при його просуванні у складі черги перед перехрестям, кількість зупинок обмежувалась кількістю заборонних сигналів світлофора під час просування, щоб уникнути впливу манери водіння водіїв ТЗ у черзі.

Моментом прибуття автомобіля на перехрестя, у тому числі на перше в ЗХ, вважався момент його зупинки перед стоп-лінією або у кінці черги перед ним, моментом подолання перехрестя – пересічення ТЗ його стоп-лінії. Різниця між цими моментами надає час затримки на перехресті, тобто час очікування можливості проїзду через нього. У випадку подолання перехрестя без затримки, моменти прибуття ТЗ до перехрестя та відправлення від нього співпадають, а час затримки на перехресті дорівнює 0.

Щоб мінімізувати різницю в умовах проїзду по фрагменту просп. Науки прямим маршрутом від вул. Мінської до просп. Незалежності, а також у зустрічному напрямку, до та після впровадження ПК, з отриманих даних були залишені лише поїздки у робочі дні та звичайні періоди року, коли всі підприємства та навчальні заклади Харкова працюють у звичайному режимі. Після цього, шляхом обробки відеоряду були визначені основні параметри поїздок водія по фрагменту просп. Науки, що координується, додаток Г.

Отримані результати представлені в графічному вигляді на рис. 4.6 – 4.9 для прямого напрямку руху ЗХ з вул. Мінської до просп. Незалежності та на рис. 4.10 –

4.13 для зворотного напрямку руху ЗХ, на яких відображаються чотири характеристики поїздки по фрагменту просп. Науки, що координується:

- загальний час поїздки по маршруту, розрахований як різниця між моментом прибуття до першого перехрестя фрагменту просп. Науки, що координується і моментом подолання останнього перехрестя, позначений на графіках словом «Загалом»;
- час безпосередньо поїздки по маршруту, розрахований як різниця між моментами подолання першого та останнього перехрестя фрагменту просп. Науки, що координується, позначений на графіках словосполученням «Час поїздки» (4.2);
- кількість зупинок автомобіля при подоланні фрагменту, од.;
- узагальнений критерій якості поїздки маршрутом (2.1), позначений на графіках словосполученням «З врахуванням зупинок».

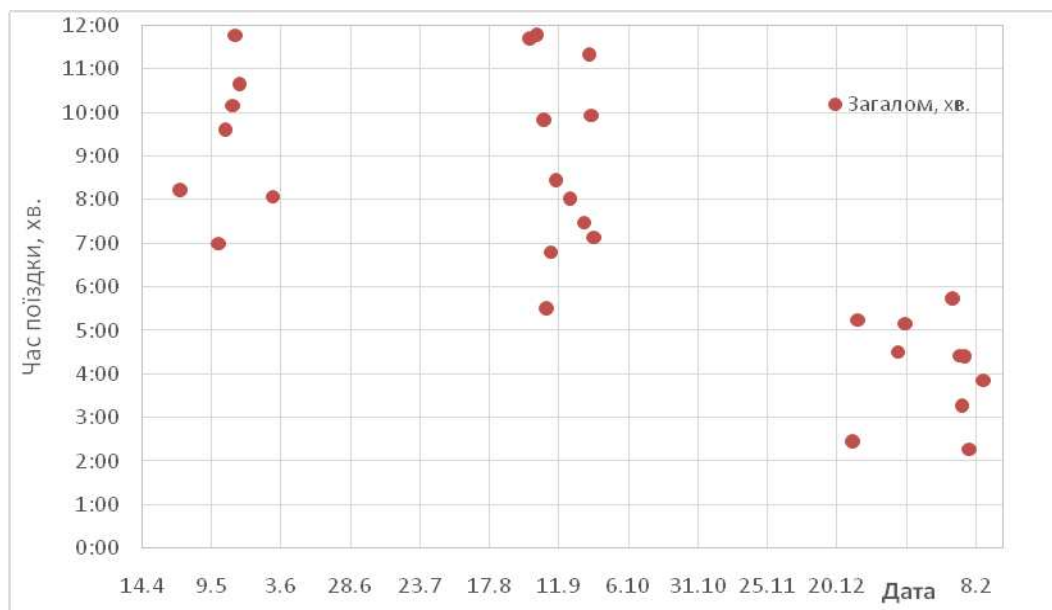


Рисунок 4.6 – Загальний час поїздки тестового автомобіля (ПТА) в прямому напрямку ЗХ від вул. Мінської до просп. Незалежності

Вісь абсцис на всіх графіках відображає дату проведення заїзду, тому на них дуже легко виділяються три групи даних, ліва група точок відноситься до квітня та травня, середня – до вересня та права – до грудня 2021 року, вже після впровадження ПК.

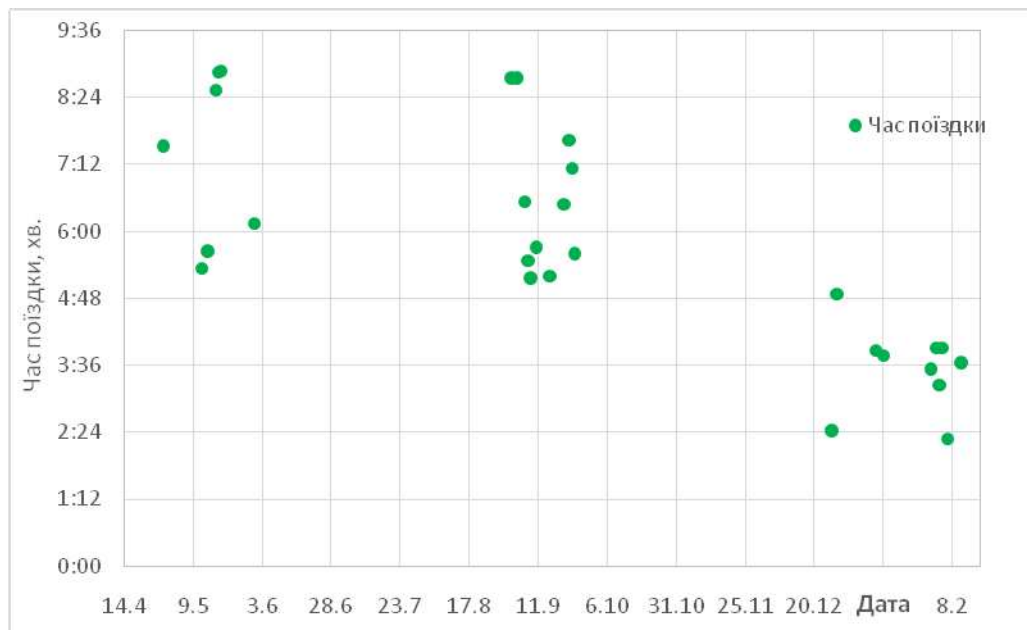


Рисунок 4.7 – Безпосередній час ПТА в прямому напрямку ЗХ від вул. Мінської до просп. Незалежності

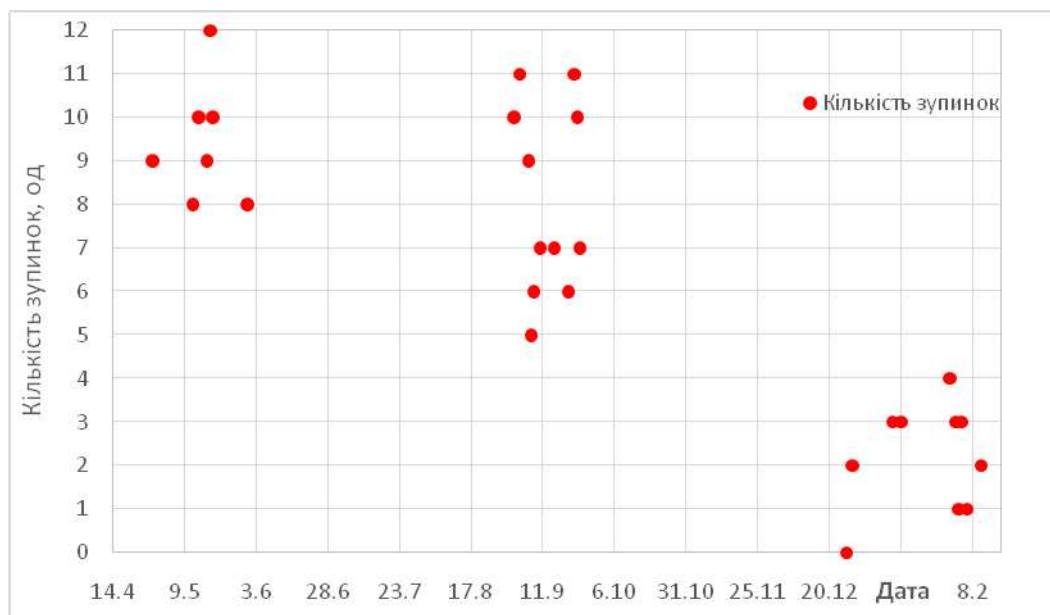


Рисунок 4.8 – Кількість зупинок тестового автомобіля в прямому напрямку ЗХ від вул. Мінської до просп. Незалежності

На всіх без виключення графіках права група точок, що відображає характеристики поїздок після впровадження ПК знаходиться набагато нижче двох інших груп точок, які не сильно відрізняються між собою за значеннями.

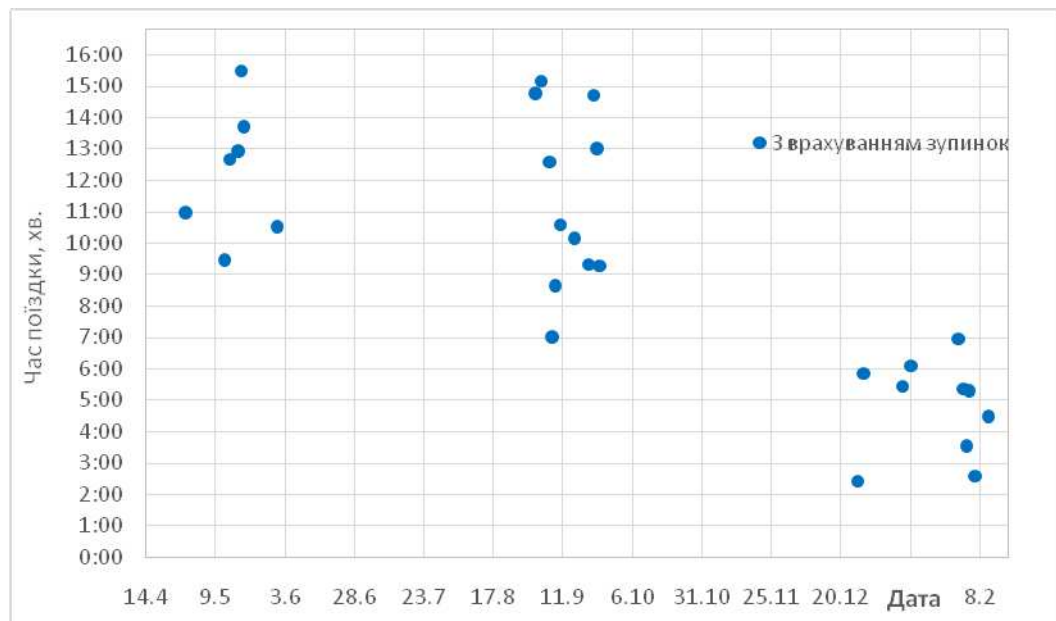


Рисунок 4.9 – Час ПТА з врахуванням кількості зупинок у прямому напрямку ЗХ від вул. Мінської до просп. Незалежності

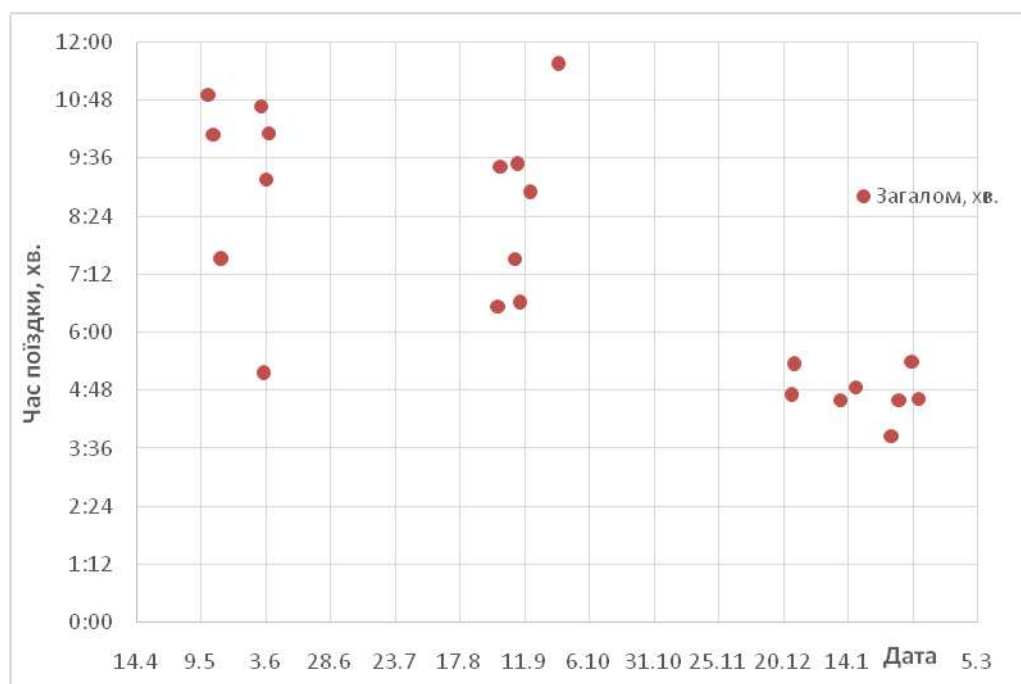


Рисунок 4.10 – Загальний час ПТА в зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

Ця помітна різниця стосується як прямого, так й зворотного напрямків та з графіків навіть не можна сказати, де вона більше, тож потрібно доповнити їх інформацію кількісною оцінкою середніх характеристик поїздок до та після впровадження ПК на просп. Науки.

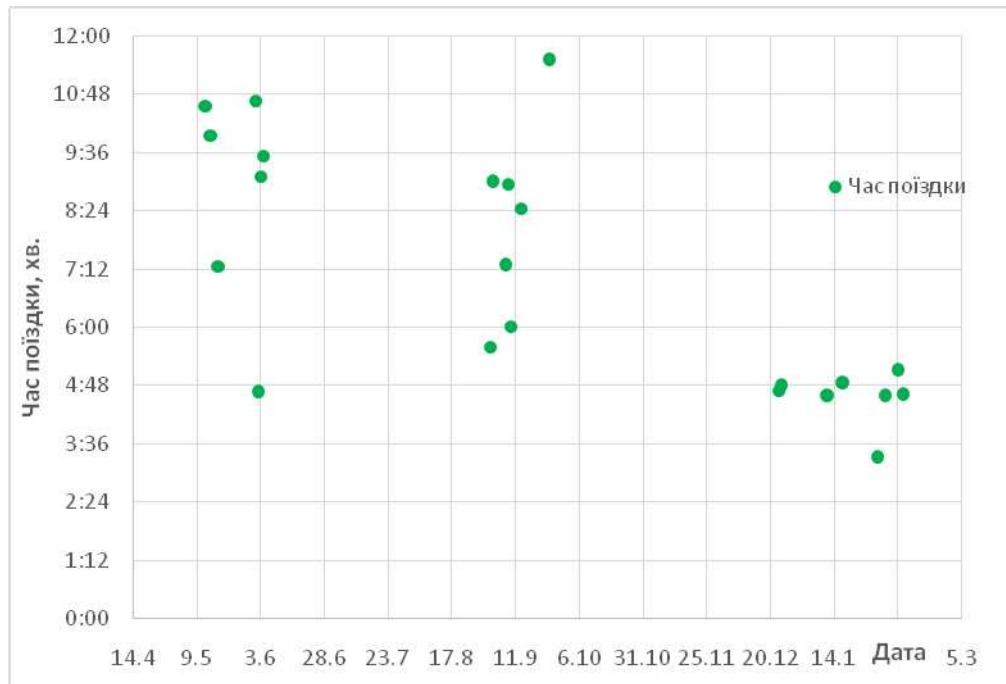


Рисунок 4.11 – Безпосередній час ПТА в зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

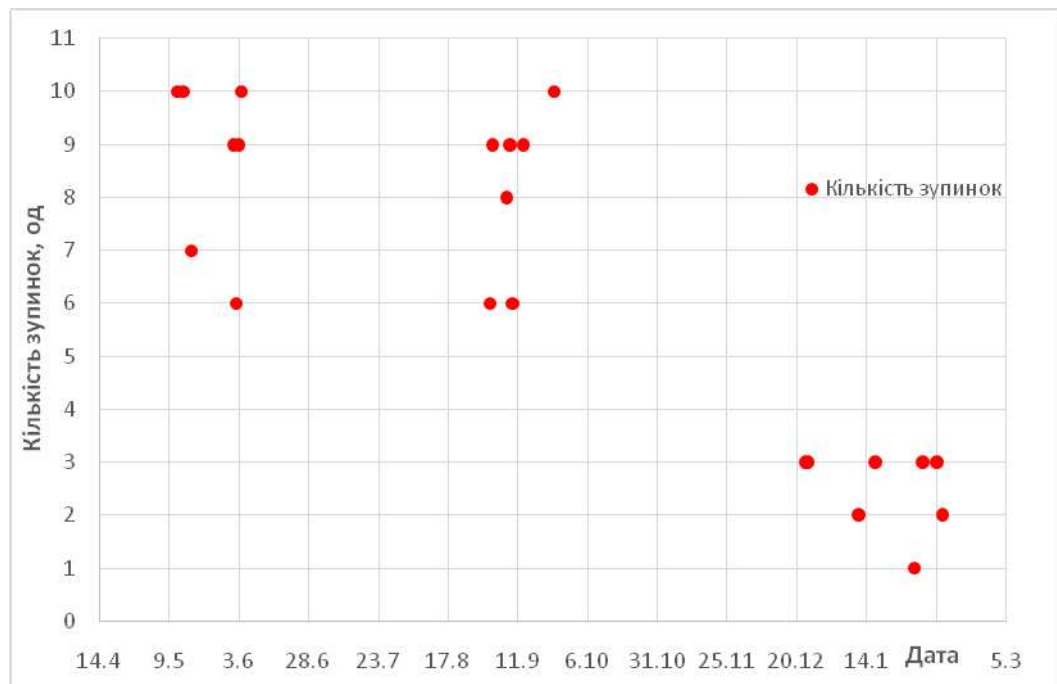


Рисунок 4.12 – Кількість зупинок тестового автомобіля в зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

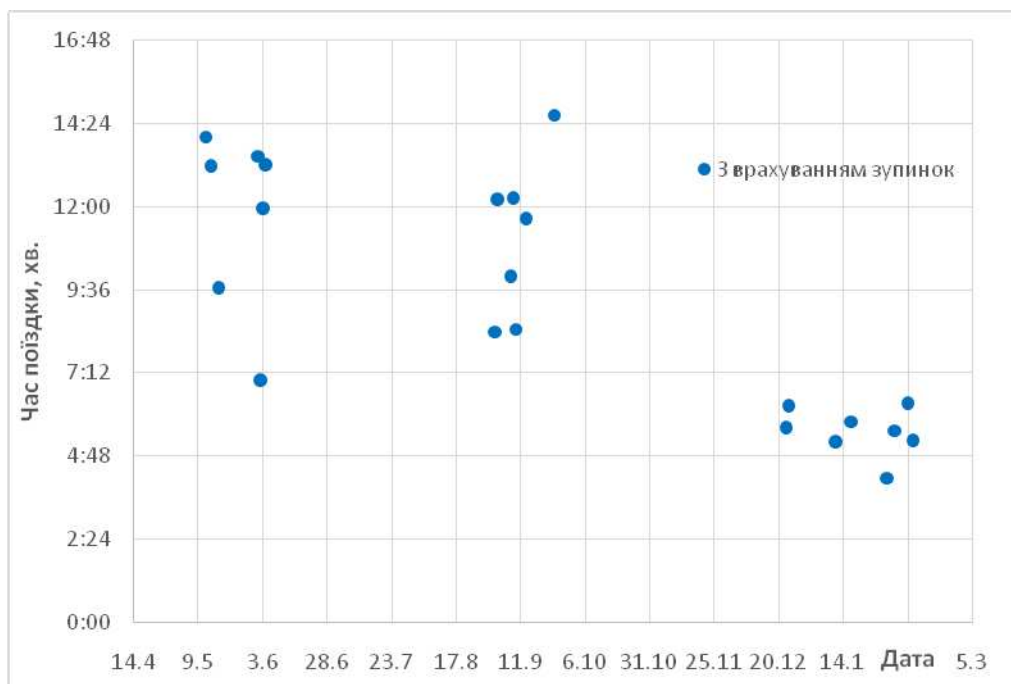


Рисунок 4.13 – Час ПТА з врахуванням кількості зупинок у зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

Кількісна оцінка результатів ПТА виконана за двома основними характеристиками випадкових величин: середнім значенням та стандартним відхиленням. Останній показник є дуже цікавим, як характеристика рівня транспортного обслуговування моторизованих учасників дорожнього руху системою ОДР, оскільки відображає передбачуваність часу поїздки. Числове порівняння відображених на рис. 4.6 – 4.13 результатів ПТА наведене для обох напрямках ЗХ в таблицях 4.6 – 4.9.

Таблиця 4.6 – Середні значення результатів ПТА в прямому напрямку від вул. Мінської до просп. Незалежності

| Показник               | До ЗХ, хв:сек | Із ЗХ, хв:сек | Різниця, хв:сек | Відсоток, % |
|------------------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| Загалом                | 9:04          | 4:07          | 4:56            | 54,47       |
| Час поїздки            | 6:51          | 3:33          | 3:18            | 48,19       |
| Кількість зупинок, од. | 8,6           | 2,2           | 6,4             | 74,45       |
| З врахуванням зупинок  | 11:43         | 4:48          | 6:54            | 58,99       |

Таблиця 4.7 – Середні значення результатів ПТА в зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

| Показник               | До ЗХ, хв:сек | Із ЗХ, хв:сек | Різниця, хв:сек | Відсоток, % |
|------------------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| Загалом                | 8:49          | 4:45          | 4:04            | 46,18       |
| Час поїздки            | 8:28          | 4:35          | 3:53            | 45,89       |
| Кількість зупинок, од. | 8,4           | 2,5           | 5,9             | 70,34       |
| З врахуванням зупинок  | 11:25         | 5:31          | 5:54            | 51,67       |

Таблиця 4.8 – Стандартне відхилення результатів ПТА в прямому напрямку від вул. Мінської до просп. Незалежності

| Показник               | До ЗХ, хв:сек | Із ЗХ, хв:сек | Різниця, хв:сек | Відсоток, % |
|------------------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| Загалом                | 2:02          | 1:10          | 0:51            | 42,55       |
| Час поїздки            | 1:27          | 0:45          | 0:41            | 47,94       |
| Кількість зупинок, од. | 2,1           | 1,2           | 0,9             | 42,39       |
| З врахуванням зупинок  | 2:40          | 1:30          | 1:09            | 43,48       |

Таблиця 4.9 – Стандартне відхилення результатів ПТА в зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

| Показник               | До ЗХ, хв:сек | Із ЗХ, хв:сек | Різниця, хв:сек | Відсоток, % |
|------------------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| Загалом                | 1:47          | 0:28          | 1:18            | 73,17       |
| Час поїздки            | 1:55          | 0:32          | 1:22            | 72,04       |
| Кількість зупинок, од. | 1,5           | 0,8           | 0,8             | 51,18       |
| З врахуванням зупинок  | 2:14          | 0:40          | 1:33            | 69,67       |

Різниця в середніх значеннях результатів ПТА до та після впровадження ПК узагальнено можна описати таким чином, що впровадження ПК дозволило водію тестового автомобіля практично у двічі скоротити час поїздки у обох напрямках руху ЗХ, з деякою перевагою прямого напрямку. Кількість зупинок при цьому скоротилася більш ніж на 70 % як у прямому, так і зворотному напрямку, також з невеликою перевагою прямого напрямку над зворотним. Стандартне відхилення результатів ПТА також істотно скоротилося, але навпаки, у більшому ступені в зворотному напрямку, де воно зменшилося орієнтовно на 60 – 70 %, тоді як для прямого напрямку це зменшення входить до інтервалу 40 – 50 %. Але, у будь-якому

випадку, ці результати переконливо свідчать про значну перевагу ПК над звичайним варіантом роботи СО на фрагменті просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінською. Та це навіть без урахування того факту, що всі часові характеристики поїздок враховують для фрагменту просп. Науки, що координується, час руху, який складає 2 хв., а СУ відповідає лише за час затримки ТЗ на перехрестях. Тобто безпосереднє скорочення затримок при впровадженні ПК за результатами заїздів тестового автомобіля буде ще вище, і стане більш ніж двократним за відносними характеристиками.

Але вважати ці результати до кінця переконливими буде не зовсім коректним, так як вони носять суб'єктивний характер – відображають манеру водіння однієї особи, до того ж професійно підготовленої та дуже глибоко знайомою з параметрами ПК. Справа у тому, що виконавець заїздів приймав безпосередню участь у його розробці та реалізації. А це надає йому суттєві привілеї перед іншими водіями у користуванні перевагами координованої роботи СО на просп. Науки. До того ж поїздки тестового автомобіля виконувалися завжди одним маршрутом, для якого власне й створювався ПК, тобто отримані результати не відображають зміни в ОДР, що трапилися на другорядних дорогах, які перетинаються з просп. Науки на тому його фрагменті, що координується. Це є ще одним фактором, що вимагає отримання більш об'єктивної оцінки результатів реалізації ПК.

Для її отримання додатково були використані дані сервісу компанії TomTom. Ця компанія заснована у 1991 році та є провідним виробником апаратного та програмного забезпечення автомобільної навігації, картографічних сервісів, у тому числі в реальному часі. Вона є акціонерним товариством, акції якого торгуються на фінансових ринках Нідерландів, що надає доступ до її звітності. Маючи в своєму розпорядженні близько 600 млн. підключених навігаційних пристроїв і використовуючи додаткові дані від інших операторів BigData, компанія TomTom з 2005 року зберігає та аналізує інформацію щодо дорожнього руху в 81 країні світу.

Дані, які аналізує TomTom є знеособленими треками автомобільних поїздок з фіксацією часу, розташування і поточної швидкості автомобіля. Використання цих даних дозволяє кількісно оцінити стан дорожнього руху на досліджуваних ділянках

ВДМ. Робота за історичними даними про дорожній рух здійснюється за допомогою порталу TomTom MOVE (<http://move.tomtom.com>).

Головними продуктами, що представлені на порталі MOVE є TomTom O/D (дослідження відправлень та прибуттів) і TomTom Traffic Stats (дослідження швидкості і часу проїзду автомобілями ділянок вулично-дорожньої мережі). Продукт TomTom Traffic Stats дозволяє визначити частину ВДМ – маршрут або кілька маршрутів чи певну територію. Для обраної частини ВДМ по заданих календарних періодах та часових інтервалах існує можливість отримати кількість зафіксованих TomTom поїздок та статистичні показники швидкості руху та часу перебування для кожної елементарної ділянки мережі, під якими розуміються частини вулиць, що не мають на собі вузлів у моделі мережі TomTom, тобто перехресть, в'їздів на прилеглу територію тощо.

Навігаційне обладнання чи ПЗ, які збирають дані для TomTom, мають далеко не всі автомобілі. Тому кількість зафіксованих треків TomTom є підмножиною повного обсягу дорожнього руху в межах досліджуваною території. Відсоток або коефіцієнт охоплення TomTom варіюється в залежності від міста та календарного періоду, який досліджується. Відповідно за допомогою сервісів TomTom можна отримати відносні показники щодо кількості ТЗ у русі, за ділянками ВДМ, за часом доби тощо. Для отримання абсолютних цифр інформацію TomTom необхідно калібрувати додатковими даними детекторів руху, транспортних моделей або натурних обстежень. Але в нашому випадку достатнім є вже те, що поїздки через ділянки ВДМ здійснюються не одним, а багатьма водіями у різних напрямках руху, які охоплюють не лише просп. Науки, а й другорядні дороги, які його перетинають. Це забезпечує комплексність та об'єктивність оцінки результатів впровадження ПК.

Особливістю даних, що надаються TomTom, є їхня прив'язка до елементарних ділянок ВДМ, кожний з яких має власну довжину, з яких складається дуже велика кількість маршрутів. При цьому оцінка часу руху за окремими маршрутами можлива лише у випадку, коли дані з TomTom отримуються саме у вигляді маршрутів, а це дуже дорога інформація, оскільки вона тарифікується пропорційно сумарній довжині ділянок, які охоплюються замовленням, а в цьому випадку – про-

порційно сумарній довжині маршрутів. Реально припустимим варіантом інформації TomTom виявилося придбання даних з області ВДМ, яка оточує фрагмент просп. Науки, що координується.

Для порівняння між собою були обрані дані про рух ТЗ у шуканому фрагменті ВДМ протягом робочих днів двох останніх тижнів січня 2021 та 2022 року. Ці періоди були обрані тому, що вони є типовими для життя Харкова, на них не розповсюджувались карантинні обмеження, викликані пандемією COVID 19 та з моменту впровадження ПК пройшов майже місяць, що зазвичай вважається достатнім для адаптації водіїв до нової схеми ОДР. Ці дані охоплюють 133 ділянки ВДМ вздовж фрагменту просп. Науки з координацією роботи СО, які представлені на рис. 4.14 і у додатку Б.

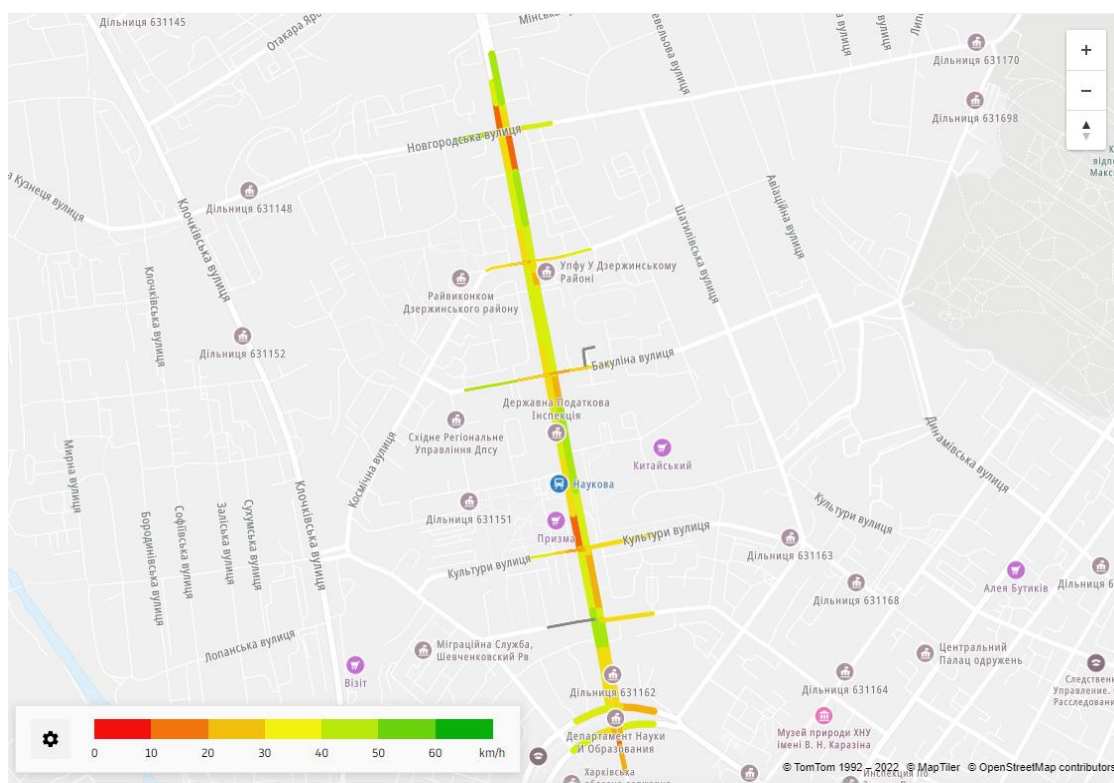


Рисунок 4.14 – Звіт TomTom з поїздок ТЗ у шуканому фрагменті ВДМ протягом робочих днів двох останніх тижнів січня 2021

Але в даному випадку, оцінити час проїзду деяким маршрутом можливо лише приблизно, оскільки по ділянках будь-якого маршруту рухаються також ТЗ, які

прямують іншими маршрутами. Це особливо важливо для маршруту безпосередньо по фрагменту просп. Науки з ПК, оскільки на ньому будуть відображатися ТЗ, які на черговому перехресті приєднуються до пачки ЗХ з інших напрямків або покидають її, що може суттєво погіршити показники руху ТЗ, які рухаються у складі пачки. Це можливо відстежити при порівнянні результатів оцінки часу прямування у прямому напрямку руху ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської та у зворотному напрямку за маршрутом тестового автомобіля за даними TomTom, табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Середній час руху по ділянках ВДМ просп. Науки між просп. Незалежності до вул. Мінської за даними TomTom

| Напрямок руху | Січень 2021, хв. | Січень 2022, хв. | Різниця, хв. | Відсоток, % |
|---------------|------------------|------------------|--------------|-------------|
| Прямий        | 5,68             | 4,76             | 0,92         | 16,13       |
| Зворотний     | 5,85             | 5,21             | 0,64         | 11,00       |

Виходячи зі змісту середнього часу руху по ділянках у мережі TomTom, наведені у таблиці дані мають подібність з часом безпосередньої поїздки по маршруту плаваючого автомобіля. Але вони не зовсім корелюються між собою, так як час поїздки у 2021 році за даними TomTom виявився суттєво нижче ніж у тестового автомобіля, а у 2022 році навпаки – помітно вище. Та, якщо друга частина цих протиріч, ще може бути пояснена суб’єктивним характером результатів поїздок тестового автомобіля, то для більш короткого часу подолання маршруту у 2021 році необхідно шукати інші пояснення. Це може бути наслідком цілодобового характеру даних або алгоритмів TomTom, де виникають досить очевидні питання технології обробки простою ТЗ на ділянках мережі або можливих ситуацій на великих перехрестях, коли ТЗ при повороті проїжджає повз точку з’єднання суміжних ділянок. Не варто забувати і про вплив ТЗ шлях яких лише частково співпадає з маршрутом ЗХ.

Але у будь-якому випадку, результат тут також виявився позитивним, хоча і не таким переконливим, як при поїздках тестового автомобіля. Та вони все одно не надають комплексної оцінки результатів впровадження ПК, оскільки не відображають поїздок по другорядним під’їздам до просп. Науки. Аналізувати різницю у

часі по всіх можливих маршрутах, кількість яких дорівнює квадрату кількості транспортних районів навколо досліджуваного фрагменту ВДМ, тобто  $212=441$ , та ще з врахуванням наведених вище особливостей даних та алгоритмів TomTom зовсім не варто, так як це не приведе до зрозумілих результатів.

Тому використовувати дані TomTom доцільно іншим шляхом – через порівняння швидкості руху на досліджуваному фрагменті ВДМ за критерієм (4.3). Розпочати аналіз ефективності ПК доцільно із загальної оцінки швидкості руху ТЗ за всіма поїздками в обраному фрагменті, табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на всіх ділянках фрагменту ВДМ навколо просп. Науки між просп. Незалежності до вул. Мінської за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 632,0    | 902,9    | 270,9   | 42,86       |
| Середня швидкість, км/год   | 22,44    | 24,27    | 1,82    | 8,12        |
| Сумарна довжина ділянок, км | 6,64     |          |         |             |

За даними TomTom помітно збільшення середньої швидкості руху ТЗ у січні 2022 року на 8,12 % у порівнянні з січнем 2021 року, що сталося на фоні значного зростання трафіку на 42,9 %. Цей підйом трафіку не варто сприймати буквально, адже це зростання власне кількості ТЗ, облаштованих навігаторами TomTom, а не всього ТП. Спочатку потрібно перевірити, чи не обумовлене це зростання виключно збільшенням частки ТЗ, облаштованих навігаторами TomTom у ТП.

Ця ситуація можлива у випадку, коли в Україні у 2021 році спостерігалось би різке зростання кількості проданих навігаторів TomTom, або кількості проданих автомобілів зі встановленим на заводі навігатором. Компанія TomTom співпрацює з одним автовиробником Renault, продажі якого в Україні за даними сайту ІТС впали у 2021 році на 6 %, при загальному збільшенні кількості проданих легковиків на 21% [187], що не свідчить на користь твердження про стрибок частки ТЗ, облаштованих навігатором TomTom у ТП.

Але продажі 103 тис. нових легкових автомобілів – це лише 17 % всіх вперше зареєстрованих в Україні легковиків за даними сайту MIND [188]. У 2021 році український автопарк поповнили 517 400 легкових авто з пробігом, серед яких автомобілі Renault займають далеко не перше місце. Ця кількість на 46% перевищує показники 2020 року та є абсолютним рекордом для країни [188]. Загалом автопарк країни у 2021 році поповнився на 620 тис. автомобілів, що майже втричі більше середньорічних обсягів зростання автопарку України у найкращі докризові роки. Саме це зростання може бути одною з основних причин підвищення трафіку, якщо у 2021 році не спостерігався стрибок кількості проданих навігаторів TomTom.

Перевірити це можливо за допомогою щорічного звіту компанії TomTom перед акціонерами, TomTom Annual Report 2021 [189]. Згідно цього звіту доходи компанії від продажів скоротилися до 99,821 тис. євро з 104,794 тис. євро у 2020 році. У такому випадку останньою причиною різкого росту кількості навігаторів TomTom у потоці ТЗ на просп. Науки могло би бути вкрай помітне зростання частки українського ринку у продажах TomTom, яке безумовно знайшло своє відображення в інформаційному просторі. Але згадок про таке диво знайдено не було, отже гіпотезу про зростання трафіку на просп. Науки виключно за рахунок частки автомобілів облаштованих навігаторами TomTom у ТП слід вважати спростованою.

Протилежна гіпотеза, яка полягає у твердженні, що зростання трафіку обумовлене виключно загальним підвищенням кількості ТЗ на просп. Науки, навпаки, отримала непряме підтвердження у вигляді великої кількості придбаних у 2021 році в Україні легкових автомобілів. Ще одне підтвердження цієї гіпотези міститься в аналітичному звіті TomTom Traffic Index де надаються середньорічні показники трафіку у світі в цілому та за країнами або окремими містами, серед яких є й Харків [190]. Вони показують, що рівень заторів у Харкові протягом 2021 року зріс з 43 % до 46 %, які означають, що на поїздку у середньому витрачається в 1,46 разів більше часу ніж у вільних умовах руху. Це може свідчити або про зростання трафіку, або про погіршення ОДР у місті, але Харків є дуже активним та ефективним містом у розвитку своєї ВДМ та покращенні ОДР у місті. Цим та усередненим характером рівня заторів можна пояснити його відносно невелике зростання в порівнянні з під-

вищенням інтенсивності ТП на просп. Науки. Тим більше, що для зростання трафіку на проспекті існує додаткова причина, яка згадувалась на першому, якісному рівні оцінки ефективності ПК. Це можливий перерозподіл ТП з інших вулиць на просп. Науки після впровадження ПК, викликаний покращенням ОДР на ньому.

Тож гіпотеза про обумовленість зростання трафіку виключно загальним підвищенням кількості ТЗ на просп. Науки всіма перевіреними фактами не спростовується, а навпаки – підтверджується, що свідчить про доцільність її використання у подальшому, завдяки чому вірним вважається твердження, що дані трафіку TomTom відображають тенденції зміни ІР ТЗ на просп. Науки та прилеглих вулицях для всього ТП.

З врахуванням цього дані табл. 4.11 вже самі по собі досить переконливо свідчать про корисність розробленого ПК, але вони не в повній мірі відображають чистий ефект від впровадження ЗХ на фрагменті просп. Науки, тому що на розглянутому фрагменті ВДМ за минулий період з січня 2021 року по січень 2022 року здійснювався не один, а два процеси – зростання інтенсивності ТП і впровадження ПК на просп. Науки. За цих умов можна вважати, що ефект безпосередньо від впровадження ПК, який міг би бути досягнутий при постійному трафіку на фрагменті ВДМ, що розглядається, ймовірно є краще середнього значення, отриманого вище.

Причиною цьому є збільшення часу простою ТЗ в очікуванні можливості проїзду регульованих перехресть з жорсткими циклами, яке завжди супроводжує зростання ІР на них та означає відповідне скорочення середньої швидкості руху ТЗ на ділянках ВДМ, що підходять до перехресть. Тобто реалізація ПК в умовах підвищеної, відносно базового періоду інтенсивності ТП, завідомо призвела до гірших результатів, ніж якщо б цей план реалізовувався при тій же інтенсивності, що спостерігалася в базовому періоді.

Так, як у дослідженні необхідно оцінити чисту ефективність створеного ПК, тобто наблизити оцінку ефективності ЗХ до її реального значення, необхідно задати відповідну базу порівняння, яка відображатиме значення швидкості ТЗ на аналізованому фрагменті ВДМ за тієї ж інтенсивності ТП, яка існувала в базовому періоді. За таку базу порівняння можна прийняти зміни у навантаженні та швидкості ТЗ

на тих ділянках із фрагмента ВДМ у TomTom, на яких умови руху залежні від параметрів роботи світлофорів, залишилися незмінними після впровадження ПК.

До таких ділянок, з погляду сталості ОДР на них, незалежно від наявності ПК на просп. Науки, можуть бути віднесені ділянки другорядних вулиць, розташовані на перехрестях між зустрічними напрямками руху просп. Науки, ділянки просп. Науки на перехресті з просп. Незалежності, між зустрічними напрямками руху просп. Незалежності та ділянки другорядних доріг на від'їздах від просп. Науки, якими ТЗ залишають перетин з просп. Науки. Насправді, для швидкості ТЗ на цих ділянках зовсім не так важливі параметри СЦ, які є основним інструментом ОДР на розглянутому фрагменті ВДМ, як для інших ділянок на просп. Науки та другорядних вулицях.

Значно більшою мірою від параметрів СЦ залежать ділянки другорядних вулиць на під'їздах до просп. Науки, що впливає із загальновідомих формул затримки на регульованих перехрестях [23, 100]. Та, незважаючи на прагнення при розробці плану координації до мінімізації змін в умовах проїзду розглянутого фрагмента ВДМ для ТЗ, що прибувають з другорядних напрямків, збільшення часу СЦ, яке відбулося на всіх перехрестях, крім перетину просп. Науки з вул. Новгородською, все ж таки означає деяку зміну умов проїзду, нехай і незначну. Але з віддаленням ділянки другорядної вулиці від просп. Науки, цей вплив має зменшуватися, і цю властивість можна використовувати для визначення бази порівняння при оцінці ефективності ПК.

З цих двох видів ділянок ВДМ необхідно вибрати шукану базу порівняння для оцінки чистого ефекту від впровадження ПК, яка найближче всього відображатиме зміни умов проїзду, викликані зростанням трафіку на регульованих перехрестях фрагменту просп. Науки, що координується. Для цього по кожному виду ділянок отримані оцінки тих самих показників, що й у загальному випадку, для всього фрагмента мережі (табл. 4.11). Ці результати наводяться в таблицях 4.12 – 4.14.

Таблиця 4.12 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на ділянках другорядних доріг, розташованих на перехрестях між зустрічними дорогами просп. Науки та на ділянках просп. Науки на перехресті з просп. Незалежності, між зустрічними дорогами просп. Незалежності за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 48,1     | 67,6     | 19,5    | 40,61       |
| Середня швидкість, км/год.  | 18,94    | 18,22    | -0,72   | -3,80       |
| Сумарна довжина ділянок, км | 0,27     |          |         |             |

На цих ділянках відбулося зниження швидкості на 3,8 %, яке в умовах практичної сталості ОТ другорядного напрямку для більшості перехресть, може бути пояснено тільки збільшенням трафіку на них та зустрічному напрямку, що призводить до більш тривалих простоїв на перехресті для ТЗ, які виконують лівий або правий поворот. Зростання трафіку тут близьке до середнього значення, хоча і трохи нижче за нього, що попередньо свідчить про прискорене зростання інтенсивності ТП на просп. Науки порівняно з другорядними напрямками руху ТЗ, оскільки на цих ділянках присутні обидва потоки. Також слід зазначити невисоку сумарну протяжність відбитих тут ділянок ВДМ, що необхідно враховувати щодо бази порівняння 2021 і 2022 років.

Таблиця 4.13 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на ділянках другорядних доріг на від'їздах від просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 81,1     | 109,2    | 28,1    | 34,71       |
| Середня швидкість, км/год.  | 28,01    | 27,04    | -0,97   | -3,47       |
| Сумарна довжина ділянок, км | 1,32     |          |         |             |

Аналогічні попереднім результати отримані і на цій множині ділянок, з мінімальним впливом ПК на них, що надає змоги використовувати у подальшому будь-яку з цих оцінок. Тут зростання трафіку вже значно нижче за середнє значення, що

підтверджує припущення про уповільнене зростання інтенсивності ТП на другорядних напрямках руху ТЗ порівняно з просп. Науки. Постає питання, чи можна використовувати ці дані як базу порівняння для оцінки ефективності безпосередньо ПК? Для остаточної відповіді на нього необхідно додатково оцінити тенденції зміни трафіку та швидкості на ділянках другорядних доріг на під'їздах до просп. Науки, які більшою мірою схильні до впливу як ПК, так і інтенсивності ТП, яка тут безпосередньо визначає навантаження на напрямки руху, що призводить до зростання часу очікування можливості проїзду перехрестя та, відповідно, до скорочення швидкості проїзду ділянок. У двох попередніх випадках цей вплив був опосередкований, без ефекту регульованого перехрестя, який описується формулою затримки Вебстера [23]. Але цей ефект присутній також й на координованій ділянці просп. Науки, що вимагає його обліку в оцінці ефективності безпосередньо ПК.

Таблиця 4.14 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на ділянках другорядних доріг на під'їздах до просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 82,4     | 112,9    | 30,6    | 37,10       |
| Середня швидкість, км/год.  | 14,09    | 14,04    | -0,05   | -0,33       |
| Сумарна довжина ділянок, км | 1,55     |          |         |             |

Тут швидкість ТЗ досить неочікувано скоротилася слабше – всього лише на одну третину відсотка, хоча зростання трафіку виявилось навіть більшим, ніж на від'їздах від просп. Науки – близько 37 %. І такі зміни можна пояснити виключно позитивним впливом ПК на ці ділянки, тим більше, що зростання трафіку потенційно більше впливає на швидкість руху ТЗ перед регульованими перехрестями, внаслідок збільшення навантаження на нього, ніж на перших двох видах ділянок, де вплив світлофорного регулювання відсутній. Для встановлення реальних причин цього несподіваного явища можна спробувати дослідити тенденції змін у швидкості руху ТЗ, по мірі віддалення ділянок від проспекту. Справа в тому, що ПК вочевидь надає максимальний вплив на найближчі до проспекту ділянки, тоді як зрос-

тання інтенсивності ТП обумовлює збільшення довжини черг і, відповідно, більшою мірою впливає на далекі від проспекту ділянки, оскільки накопичення невеликої черги ТЗ перед світлофором за час забороняючого сигналу є найпоширенішим випадком у роботі перехрестя. Дані про параметри функціонування ділянок другорядних доріг на під'їздах до просп. Науки, для різних позицій їх розташування: від перших ділянок, розташованих безпосередньо перед проспектом, до найдальших ділянок, що потрапили до фрагменту ВДМ, що розглядається у TomTom, наведені в таблицях 4.15 – 4.18.

Таблиця 4.15 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на перших ділянках другорядних доріг перед просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 31,8     | 43,5     | 11,7    | 36,71       |
| Середня швидкість, км/год.  | 11,52    | 11,56    | 0,04    | 0,33        |
| Сумарна довжина ділянок, км | 0,65     |          |         |             |

Таблиця 4.16 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на других ділянках другорядних доріг перед просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 28,9     | 39,8     | 10,9    | 37,66       |
| Середня швидкість, км/год.  | 12,65    | 12,54    | -0,11   | -0,88       |
| Сумарна довжина ділянок, км | 0,53     |          |         |             |

Таблиця 4.17 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на третіх ділянках другорядних доріг перед просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 18,7     | 25,6     | 6,9     | 36,79       |
| Середня швидкість, км/год.  | 21,22    | 21,11    | -0,11   | -0,52       |
| Сумарна довжина ділянок, км | 0,26     |          |         |             |

Таблиця 4.18 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на четвертих ділянках другорядних доріг перед просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 2,9      | 4,0      | 1,1     | 37,86       |
| Середня швидкість, км/год.  | 18,48    | 18,71    | 0,24    | 1,27        |
| Сумарна довжина ділянок, км | 0,10     |          |         |             |

Нажаль, наведені в таблицях 4.15 – 4.18 результати не свідчать про стійку тенденцію до прискореного або уповільненого падіння (зростання) швидкості руху ТЗ, при віддаленні ділянки другорядної дороги від просп. Науки, що могло би свідчити про істотний вплив зростання трафіку на неї, або навпаки – про істотний вплив ПК. Швидкість ТЗ на перших ділянках дещо збільшилася на 0,33 %, що може вважатися підтвердженням позитивного впливу ПК на другорядні напрямки, який зменшується на других ділянках перед перехрестями, де швидкість впала до -0,88 % та дещо покращується на третіх ділянках зі зменшенням швидкості у -0,52 %. Але цю тенденцію порушують четверті ділянки перед світлофорами, де швидкість руху ТЗ зросла на 1,27 %, що може бути результатом процесів формування черги перед перехрестями. Іншим поясненням також може бути випадковий характер даних TomTom, завдяки якому всі ці коливання є проявом випадковості не лише первинних даних, а й характеристик вибірки в цілому, тим більше, що всі ці коливання відбуваються близько до 0, навколо 1 %. Так, як прояснити реальні причини коливань швидкості в залежності від позиції ділянок перед перехрестям на основі наявних даних практично неможливо, використовувати дані ділянки як базу порівняння для оцінки ефективності безпосередньо ПК на фрагменті просп. Науки не варто.

З врахуванням цього, зміна швидкості руху ТЗ на просп. Науки має розглядатися не відносно нульової зміни швидкості, а відносно зниження швидкості, яке зумовлене зростанням трафіку на від'їздах другорядних доріг від просп. Науки або на ділянках другорядних доріг, розташованих на перехрестях між зустрічними дорогами просп. Науки та на ділянках просп. Науки на перехресті з просп. Незалеж-

ності, між зустрічними дорогами просп. Незалежності. У зв'язку з істотно більшою статистичною значущістю першого типу ділянок, сумарна протяжність яких дорівнює 1,32 км у порівнянні з 0,27 км сумарної довжини ділянок розташованих безпосередньо на перехрестях, саме на від'їзди другорядних доріг від просп. Науки мають стати базою порівняння для ПК.

Зростання трафіку на цих ділянках склало 34,71 %, що на даному фрагменті ВДМ призвело до зниження середньої швидкості руху ТЗ на 3,47 %. Оскільки навантаження на просп. Науки помітно вище, ніж на другорядних напрямках, як і річне зростання інтенсивності ТП на ньому, використання цих даних як основи порівняння, приведе до отримання заздалегідь гарантованої нижньої оцінки ефективності ПК. При цьому проведений вище аналіз дає підстави вважати, що використання ПК жодним чином не позначилося на другорядних під'їздах до просп. Науки і весь ефект від нього відноситься до координованого фрагменту проспекту. Оцінку параметрів функціонування цього фрагменту ВДМ на основі даних TomTom наведено у таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Кількість поїздок та середня швидкість руху ТЗ на ділянках координованого фрагменту просп. Науки за даними TomTom

| Показник                    | 2021 рік | 2022 рік | Різниця | Відсоток, % |
|-----------------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Кількість поїздок, тис. од. | 420,5    | 613,1    | 192,6   | 45,81       |
| Середня швидкість, км/год.  | 23,04    | 25,59    | 2,55    | 11,06       |
| Сумарна довжина ділянок, км | 3,49     |          |         |             |

Дані таблиці 4.19 відображають зміни на тих ділянках, які зазнали безпосереднього впливу ПК, причому зростання трафіку тут, як і передбачалося, виявилось максимальним. Тож такий стрибок може бути пояснений не лише зростанням рівня автомобілізації у Харкові, а й залученням додаткового ТП на просп. Науки, зумовленим покращенням умов проїзду до нього, як це зазначалося раніше.

При рівній ІР в 2021 та 2022 роках, в умовах припущення про однакове стартове навантаження на другорядних під'їздах до просп. Науки та власне на проспек-

ті, а також при припущенні про зростання навантаження на проспекті не меншому, ніж 34,71 %, нижня оцінка безпосереднього ефекту від запровадження ПК на просп. Науки становитиме  $11,06 + 3,47 = 14,53$  % збільшення середньої швидкості руху ТЗ на координованому фрагменті проспекту.

Реальна оцінка цього ефекту має бути суттєво вищою, оскільки тенденція збільшення тривалості очікування можливості проїзду регульованого перехрестя має прискорений характер при наближенні навантаження до максимального [23]. Це означає потенційні можливості для значного зростання ефекту від реалізації ПК по відношенню до нижньої оцінки, як при врахуванні більш високого навантаження на проспекті в порівнянні з другорядними напрямками, так і при врахуванні більшого приросту трафіку на проспекті, який дорівнює 45,81 %, порівняно з базовими 34,71 %. Проте відсутність даних про сумарну інтенсивність ТП на даному фрагменті ВДМ у січні 2021 та 2022 років у звітах TomTom, не дає можливості кількісно оцінити рівень навантаження на ньому та, відповідно, розрахувати реальний ефект від впровадження ПК на фрагменті просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської.

Однак навіть мінімальна оцінка результативності цього заходу повністю підтверджує висновки щодо високої ефективності жорсткої координації роботи світлофорів на просп. Науки, зроблені на іншій інформаційній базі. Така однозначна і висока результативність цього заходу, за мінімальних витрат на його реалізацію, переконливо свідчить на користь першочергового використання магістральної та мережевої координації у містах України, як засобу підвищення ефективності функціонуючих на сьогодні локальних СО, по зрівнянню з розвитком систем адаптивного світлофорного регулювання.

Але не слід вважати адаптивні світлофори чимось непотрібним, вони є дієвим засобом покращення умов руху не лише на ізольованих перехрестях. У будь-якому варіанті ОДР основні параметри ТП є випадковими величинами, завдяки коливанням яких з'являються можливості для точного налаштування координованих світлофорів на поточні параметри руху ТЗ по магістралі. Це дозволяє максимально ефективно використовувати час циклів для пропуску конкуруючих потоків ТЗ і за-

безпечувати пропуск більшої кількості ТЗ протягом одного циклу. Найдоцільнішим тут є спосіб адаптації, реагуючий не на конкретну транспортну ситуацію, а на поточні параметри ТП. Задля забезпечення такої можливості розроблений спосіб одночасного визначення основних параметрів ТП: моменту проїзду ТЗ контрольованої зони та перехрестя в цілому, швидкості, типу і напрямку руху ТЗ, їх ІР по кожній смузі за будь-який проміжок часу, інтервалів рухів між ТЗ, їх прискорення або уповільнення, а також тривалості проміжних і основних тактів в кожній фазі і СЦ на перехрестях координованого фрагменту ММ [6, 12, 13]. У ньому, завдяки подвійному скануванню стає можливим точно визначати тип ТЗ, склад ТП та кількість ТЗ у черзі по кожній смузі руху на підходах до перехрестя на момент зміни сигналу світлофору на зелений або на момент початку руху перших у черзі ТЗ. Крім того, це дозволяє визначати швидкість і уповільнення ТЗ і розрахувати його зупиночний шлях і в кінцевому рахунку приймати рішення про завершення проміжного такту. Все це забезпечує можливість його прямого застосування в системах координованого управління СО на ММ.

Таким чином існує можливість подальшого удосконалення роботи вже реалізованого на практиці ПК на фрагменті просп. Науки або інших магістральних ПК за рахунок реалізації способу адаптивного управління світлофорами в них. Але практична реалізація створеного методу [6, 12, 13], незважаючи на зниження вартості обладнання по зрівнянню зі звичайними методами адаптивного СУ [97], все ж таки вимагає набагато більше коштів і часу ніж реалізація ПК у жорсткому режимі функціонування и тому, поки що, не була впроваджена. Але можливості покращення роботи ПК за допомогою засобів адаптації роботи координованих СО до поточних умов трафіку являються логічним продовженням досліджень у даному напрямі розвитку методів ОДР. За відсутності необхідних аналітичних моделей оцінки затримок і довжин черги перед координованими перехрестями і з урахуванням вагової вартості технічних засобів збору інформації в адаптивних системах найбільш перспективним способом оцінки ефективності розробленого методу адаптивної координації [6, 12, 13] є імітаційне моделювання процесу координованого руху.

Дане дослідження, завдяки практичній реалізації розробленого ПК, створило повну і абсолютно надійну інформаційну основу для точного налаштування імітаційної моделі на фактичні параметри ТП, що дозволяє сподіватися на можливість подолання проблем з імітаційним моделюванням координованого руху, які виникли при розробці жорсткого ПК.

#### Висновки по четвертому розділу

1. Створена при проведенні досліджень програма «Wave» дозволила розробити раціональний ПК, який вимагає кардинальної зміни змісту циклу лише на одному перехресті, просп. Науки з вул. Новгородською. Цей план забезпечує дотримання розрахункових зсувів початку циклу на всіх перехрестях координованого фрагменту в прямому напрямку руху ЗХ у бік центру, та мінімальні відхилення фактичних зсувів від їх розрахункових значень у зворотному напрямку.

2. Констатована в роботі недостатня адекватність створених у VISSIM і SUMO імітаційних моделей реальному процесу, вимагає використання інших методів оцінки ефективності ПК та поширення переліку критеріїв ефективності у цьому процесі, оскільки визначення кількості зупинок ТЗ при подоланні фрагменту ВДМ є одною з переваг імітаційного експерименту та практично неможливе при використанні картографічних сервісів. Тому додатковими до комплексного критерію (2.1) прийняти часткові критерії часу поїздки (4.2) та швидкості руху ТЗ (4.3).

3. Поширення списку можливих критеріїв ефективності ПК суттєво покращує можливості в оцінці ефективності створеного ПК на основі результатів фактичних поїздок ТЗ через фрагмент ММ, дозволяє використовувати різні інструменти та різноманітні джерела інформації, що в свою чергу підвищує ступінь гарантованості результатів оцінки та знижує ймовірність виникнення критичних помилок у цьому процесі.

4. Якісний метод оцінки ефективності ПК на просп. Науки за допомогою

картографічного сервісу Google приводить до висновку, що після впровадження ПК спостерігається підвищення середньої швидкості руху по ділянках просп. Науки та навколо нього, але чи є впровадження ПК єдиною причиною цього зростання невідомо.

5. ПТА до та після впровадження ЗХ показали, що впровадження ПК дозволило водію тестового автомобілю практично у двічі скоротити час поїздки у обох напрямках руху ЗХ, з деякою перевагою прямого напрямку від вул. Мінської до просп. Незалежності. Кількість зупинок при цьому скоротилася більш ніж на 70 % як у прямому, так й зворотному напрямку, також з невеликою перевагою прямого напрямку над зворотним. Стандартне відхилення результатів ПТА також істотно скоротилося, але навпаки, у більшому ступені в зворотному напрямку, де воно зменшилося орієнтовно на 60-70 %, тоді як для прямого напрямку це зменшення входить до інтервалу 40-50 %. Результати ПТА переконливо засвідчили значну перевагу ПК над локальним варіантом роботи СО на координованому фрагменті просп. Науки, але вважати ці результати до кінця переконливими буде не зовсім коректним, так як вони носять дещо суб'єктивний характер.

6. Зафіксоване у даних TomTom за січень місяць 2022 року підвищення на 42,86 % кількості поїздок на просп. Науки у порівнянні з січнем 2021 року не може бути викликане зростанням частки автомобілів обладнаних навігаторами TomTom у ТП, а основною причиною цього слід вважати загальне підвищення кількості ТЗ на просп. Науки, викликане рекордною кількістю придбаних у 2021 році в Україні легкових автомобілів та перерозподілом ТП з інших вулиць на просп. Науки після впровадження ПК, обумовленим покращенням ОДР на ньому.

7. При рівній ІР у 2021 та 2022 роках, в умовах припущення про однакове стартове навантаження на другорядних від'їздах від просп. Науки та власне на проспекті, а також при припущенні про зростання навантаження на проспекті не меншому, ніж 34,71 %, нижня оцінка безпосереднього ефекту від запровадження ПК на просп. Науки становитиме 14,53 % збільшення середньої швидкості руху ТЗ на координованому фрагменті проспекту.

8. Оцінка результативності ПК на просп. Науки за всіма трьома способа-

ми однозначно свідчить про високу результативність цього заходу, що з урахуванням мінімальних витрат на його реалізацію, робить засоби магістральної координації в містах України першочерговим напрямом розвитку систем локальних світлофорів у порівнянні зі створенням систем адаптивного світлофорного регулювання.

9. Застосування систем адаптивного світлофорного регулювання для близько розташованих СО доцільно розглядати як наступний крок удосконалення роботи координованих СО, ефективність якого слід визначати за допомогою імітаційного моделювання процесу координованого руху ТЗ.

Основні результати проведених досліджень в рамках цього розділу опубліковані в роботах [4-6, 12, 13].

## ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу існуючих підходів до визначення параметрів роботи світлофорних об'єктів і методів побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів було встановлено, що на даний час не існує переконливих вказівок на ефективні напрями розвитку систем світлофорної координації в містах, а більшість робіт присвячена налаштуванню адаптивних СО на забезпечення ефективної реакції світлофорів на динамічний характер ТП, у тому числі в мережах, де функціонує декілька світлофорів на суміжних перехрестях.

2. Методичні керівництва різних країн з ОДР в основному пропонують використовувати для створення ПК ПЧД лінійної координації, хоча при цьому визнають її занадто спрощений характер та не надають чітких рекомендацій стосовно особливостей її практичного використання. Іншим варіантом координації є використання існуючого на цей час ПЗ з жорсткої або адаптивної координації, які також використовують спрощені математичні моделі для створення ПК. При цьому перехід до координованої роботи локальних світлофорів у транспортних системах українських міст є найбільш доступним напрямом розвитку СУ рухом.

3. В даному дослідженні сформовано двоетапну процедуру створення ПК на ММ, яка враховує особливості групового прибуття пачки ЗХ до чергового регульованого перехрестя на ділянці ММ, що координується, і дозволяє наблизити кінцеве рішення цієї задачі до глобального мінімуму часу очікування можливості проїзду через регульоване перехрестя.

4. Аналітична модель затримок на регульованому перехресті, створена в роботі за умови повного роз'їзду черги автомобілів протягом дозвільного сигналу, дозволила визначити граничний рівень завантаження другорядних підходів до ММ з координованим управлінням, який має використовуватися при побудові ПК. За допомогою імітаційного експерименту, вона також дозволила обґрунтувати можливість використання формули затримки Вебстера на першому, аналітичному етапі побудови плану.

5. За результатами отриманими після проведення поїздок методом тестового автомобіля до та після впровадження ПК на обраній ділянці просп. Науки показали, що час поїздки скоротився майже вдвічі у прямому та зворотному напрямках, а загальна кількість зупинок скоротилася більш ніж на 70%, як у прямому так і у зворотному напрямку.

6. Результати тестового автомобіля переконливо свідчать про перевагу ПК над існуючим варіантом роботи СО на фрагменті просп. Науки, що координується, але вважати ці результати остаточними не зовсім коректно, так як вони частково носять суб'єктивний характер.

7. Додатково, зробивши за допомогою сервісу TomTom поглиблений аналіз швидкості руху на різних типах ділянок ВДМ у двох аналогічних періодах 2021 і 2022 років, і врахувавши ефект зниження швидкості ТП при збільшенні його інтенсивності, можливо зробити висновок, що після впровадження ПК на координованому фрагменті просп. Науки, за умови незмінної ІР на ньому, середня швидкість руху збільшилася би не менше ніж на 14,53%.

8. Оцінка результативності ПК на ділянці від просп. Незалежності до вул. Мінської по просп. Науки за всіма способами, однозначно свідчить про високу результативність цього заходу, що з урахуванням мінімальних затрат на їх реалізацію, робить засоби магістральної координації у містах України першочерговим напрямом розвитку систем локальних світлофорів у порівнянні зі створенням адаптивних систем світлофорного регулювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбачов ПФ, Макарічев ОВ, Шевченко ВВ. Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць з трифазним циклом регулювання. Автомобільний транспорт. 2019;44:30-9. doi: [10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30](https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30)
2. Горбачов ПФ, Шевченко ВВ, Свічинський СВ. Визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до міської магістралі з координованим керуванням. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020;90:144-54. doi: [0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144](https://doi.org/0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144)
3. Горбачов ПФ, Макарічев ОВ, Шевченко ВВ. Імовірність виникнення неповної пачки автомобілів при координованому керуванні на міській магістралі. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2021;92(1):214-25. doi: [10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214](https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214)
4. Шевченко ВВ. Оцінка ефективного напрямку розвитку систем світлофорного управління з жорсткими циклами регулювання. Вісник машинобудування та транспорту. 2022;2(16):110-9. doi: [10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119](https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119)
5. Шевченко ВВ. Оцінка ефективності плану координації світлофорів на просп. Науки в м. Харкові. Комунальне господарство міст. 2022;6:206-15. doi: [10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215)
6. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі. Патент України на винахід № 122838. 2021 Січ 06.
7. Шевченко ВВ. Шлях до скорочення затримок транспортних засобів на регульованому перехресті міських вулиць. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. on-line конф. аспірант., мол. уч. та студ. до Дня науки; 2018 Трав 16-18; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2018. с. 77.
8. Горбачов ПФ, Ву Дик Мінь, Шевченко ВВ. Новий підхід до побудови жорстких світлофорних циклів для перехресть міських вулиць. В: Матеріали Все-

укр. наук.-практ. on-line конф. аспірант., мол. уч. та студ. до Дня науки; 2019 Трав 15-17; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2018. с. 202-3.

9. Горбачов ПФ, Шевченко ВВ. Підхід до побудови плану координації для міської магістралі. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. освіти і мол. уч, присвячена Дню науки,; 2020 Трав 11-15; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка»; 2020. с. 20.

10. Шевченко ВВ. Координація роботи локальних світлофорів і розвиток систем управління дорожнім рухом. В: Матеріали V Всеукр. наук.-теор. on-line конф. Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання; 2023 Бер 23-24; Львів. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2023. с. 47-9.

11. Горбачов ПФ, Ву Дик Мінь, Шевченко ВВ. Новий підхід до побудови жорстких світлофорних циклів для перехресть міських вулиць. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір України № 88689. 2019 Трав 20.

12. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі. Патент України на корисну модель № 137438. 2019 Жов 25.

13. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху по магістралі міста. Патент України на корисну модель № 137517. 2019 Жов 25.

14. Горбачов ПФ, Тесленко МГ, Шевченко ВВ. Комп'ютерна програма «Програма для розрахунків параметрів координованого керування світлофорами на міській магістралі» («Wave»). Свідectво про реєстрацію авторського і суміжного права на твір України №116545. 2023 Лют 23.

15. Cass S. Through Traffic Engineering Proceedings. Signal Networks. In: Conference on Improved Street Utilization; 1967. Washington DC, USA; 1967: p.127-43.

16. Hillier JA. Glasgow's Experiment in Area Traffic Control. Traff. Engn. Control [Internet]. 1965[cited 2023 Oct 21];7(8):502-9; 1966;7(9):569-71. Available from: <https://trid.trb.org/view/117125>

17. Qadri SSSM, Gökçe MA, Öner E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European Transport Research Review*. 2020;12:55. doi: [10.1186/s12544-020-00439-1](https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1)
18. Adams WF. Road Traffic Considered as it Random Series. (Includes plates). *Journal of the Institution of Civil Engineers*. 1936;4:121-30. doi: [10.1680/ijoti.1936.14802](https://doi.org/10.1680/ijoti.1936.14802)
19. Clayton AJH. Road Traffic Calculations. *Journal of the Institution of Civil Engineers*. 1941;16(7):247-84. doi: [10.1680/ijoti.1941.13660](https://doi.org/10.1680/ijoti.1941.13660)
20. Wardrop JG. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Road Paper №36. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*. 1952;1(3):325-62. doi: [10.1680/ipeds.1952.11259](https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259)
21. Newell GF. Statistical Analysis of the Flow of Highway Traffic Through a Signalized Intersection. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1956;13:353-69.
22. Beckmann MJ, McGuire CB, Winsten CB. *Studies in the Economics in Transportation*. New Haven, Yale University Press; 1956. 232 p. Available from: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_memoranda/2005/RM1488.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2005/RM1488.pdf)
23. Webster FV. Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39, Department of Scientific and Industrial Research, London, Department of Scientific and Industrial Research London, England; 1958. 45 p. Available from: [https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/traffic\\_signals\\_webster.pdf](https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/traffic_signals_webster.pdf)
24. Transportation Research Board, National Research Council. *Highway Capacity Manual*. Washington, DC; 2000. 1207 p. Available from: [https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway\\_capacital\\_manual.pdf](https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf)
25. Newell GF. Queues for a fixed-cycle traffic light. *Ann. Math. Statist*. 2016;31(3):589-97. doi: [10.1214/aoms/1177705787](https://doi.org/10.1214/aoms/1177705787)
26. Darroch JN. On the Traffic-light Queue. *Ann. Math. Statist*. 1964;35(1):380-8. doi: [10.1214/AOMS/1177703761](https://doi.org/10.1214/AOMS/1177703761)
27. Oblakova A, Hanbali AA, Boucherie RJJC. van Ommeren W, Zijm WHM. Exact expected delay and distribution for the fixed-cycle traffic-light model and similar

systems in explicit form. University of Twente, The Netherlands; 2016. 34 p. doi: [10.13140/RG.2.2.13001.75360](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13001.75360)

28. Tong Y, Zhao L, Li L, Zhang Y. Stochastic programming model for oversaturated intersection signal timing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015;58:474-86. doi: [10.1016/j.trc.2015.01.019](https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.019)

29. Castillo RG, Clempner JB, Poznyak AS. Solving the multi-traffic signal-control problem for a class of continuous-time markov games. In: 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2015. Mexico City, Mexico; 2015. p. 1-5. doi: [10.1109/ICEEE.2015.7357932](https://doi.org/10.1109/ICEEE.2015.7357932)

30. Che Y, Chen K, Hsiung P. Dynamic traffic light optimization and Control System using model-predictive control method. IEEE In: 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016. Rio de Janeiro; 2016. p. 2366-71.

31. Zhao C, Chang Y, Zhang P. Coordinated Control Model of Main-Signal and Pre-Signal for Intersections with Dynamic Waiting Lanes. *Sustainability*. 2018;10:1-14. doi: [10.3390/su10082849](https://doi.org/10.3390/su10082849)

32. Van De Weg GS, Vu HL, Hegyi A, Hoogendoorn SP. A hierarchical control framework for coordination of intersection signal timings in all traffic regimes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019;20:1815-27. doi: [10.1109/TITS.2018.2837162](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2837162)

33. Mohajerpoor R, Saberi M, Ramezani M. Analytical derivation of the optimal traffic signal timing: Minimizing delay variability and spillback probability for undersaturated intersections. *Transport Research. Part B*. 2019;119:45-68. doi: [10.1016/j.trb.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.11.004)

34. Sabar NR, Kieu LM, Chung E, Tsubota T, Maciel de Almeida PE. A memetic algorithm for real-world multi-intersection traffic signal optimisation problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2017;63:45-53. doi: [10.1016/j.engappai.2017.04.021](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.04.021)

35. Li Z, Schonfeld P. Hybrid simulated annealing and genetic algorithm for optimizing arterial signal timings under oversaturated traffic conditions. *Journal of Advanced Transportation*. 2015;49:153-70. doi: [10.1002/atr.1274](https://doi.org/10.1002/atr.1274)

36. Tan MK, Chuo HSE, Chin RKY, Beng YK, Teo KTK. Optimization of traffic network signal timing using decentralized genetic algorithm. In: IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), 2017. Kota Kinabalu, Malaysia; 2017. p. 62-7. doi: [10.1109/I2CACIS.2017.8239034](https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2017.8239034)
37. Leal SS, de Almeida PEM, Chung E Active control for traffic lights in regions and corridors: an approach based on evolutionary computation based on evolutionary computation. Transport Research Procedia. 2017;25:1769-80. doi: [10.1016/j.trpro.2017.05.140](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.140)
38. Guo J, Kong Y, Li Z, Huang W, Cao J, Wei Y. A model and genetic algorithm for area-wide intersection signal optimization under user equilibrium traffic. Mathematics and Computers in Simulation. 2019;155:92-104. doi: [10.1016/j.matcom.2017.12.003](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2017.12.003).
39. Wu N, Li D, Xi Y. Distributed Weighted Balanced Control of Traffic Signals for Urban Traffic Congestion. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019;20:3710-20. doi: [10.1109/TITS.2018.2878001](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2878001)
40. Tang C. Xia S, Zhu C, Wei X. Phase Timing Optimization for Smart Traffic Control Based on Fog Computing. IEEE Access. 2019;7:84217-28. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2925134](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925134).
41. Zhao D, Dai Y, Zhang Z. Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control: A Survey. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2012;42:485-94. doi: [10.1109/TSMCC.2011.2161577](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2161577).
42. Quan Y, Jin-Guang L, Pei-Hua L, Jian R, Xiao-Ming L. Dynamic Optimization Project Study between the Traffic Organization and the Traffic Signal Control of Urban Traffic. In: WRI World Congress Computer Science Information Engineering. 2009;3:182-6. doi: [10.1109/CSIE.2009.63](https://doi.org/10.1109/CSIE.2009.63)
43. Ng KM, Reaz MBI, Ali MAM, Chang TG. A Brief Survey on Advances of Control and Intelligent Systems Methods For Traffic-Responsive Control Of Urban Networks. Technical Gazette. 2013;20(3):555-62.

44. Jin J, Ma X, Kosonen I. An intelligent control system for traffic lights with simulation-based evaluation. *Control Engineering Practice*. 2017;58:24-33. doi: [10.1016/j.conengprac.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.09.009)
45. Vogel A, Oremović I, Simi R, Ivanjko E. Improving Traffic Light Control by Means of Fuzzy Logic. In: *International Symposium ELMAR, 2018*. Zadar, Croatia; 2018, p.16-9. doi: [10.23919/ELMAR.2018.8534692](https://doi.org/10.23919/ELMAR.2018.8534692)
46. Panovski D, Zaharia T. Simulation-Based Vehicular Traffic Lights Optimization. In: *12th International Conference on Signal-Image Technology; Internet-Based Systems (SITIS), 2016*. Naples, Italy; 2016. p.258-65. doi: [10.1109/SITIS.2016.49](https://doi.org/10.1109/SITIS.2016.49)
47. Hao W, Ma C, Moghimi B, Fan Y, Gao Z. Robust Optimization of Signal Control Parameters for Unsaturated Intersection Based on Tabu Search-Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Access*. 2018;6:32015-22. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2845673](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2845673)
48. Yu D, Tian X, Xing X, Gao S. Signal Timing Optimization Based on Fuzzy Compromise Programming for Isolated Signalized Intersection. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016;2016:1-12. doi: [10.1155/2016/1682394](https://doi.org/10.1155/2016/1682394)
49. Zhao H, Han G, Niu X. The Signal Control Optimization of Road Intersections with Slow Traffic Based on Improved PSO. *Mobile Networks and Applications*. 2019;25(2):623–31. doi: [10.1007/s11036-019-01225-7](https://doi.org/10.1007/s11036-019-01225-7)
50. Jia H, Lin Y, Luo Q, Li Y, Miao H. Multi-objective optimization of urban road intersection signal timing based on particle swarm optimization algorithm. *Advances in Mechanical Engineering* [Internet]. 2019 [cited 2023 Oct 21];11(4). Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1687814019842498https://doi.org/10.1177/1687814019842498> doi: [10.1177/1687814019842498](https://doi.org/10.1177/1687814019842498).
51. Deng G. Simulation-based optimization [dissertation on the internet]. Madison: University of Wisconsin; 2007. [cited 2023 Oct 21]. Available from: <https://pages.cs.wisc.edu/~ferris/theses/GengDeng.pdf>
52. Carson Y, Maria A. Simulation optimization: Methods and applications. In: Andradóttir S, Healy KJ, Winters DH, Nelson BL, editors. *Winter Simulation Conference Proceedings*, 1997. Atlanta, GA, USA; 1997. p. 118-26. doi: [10.1145/268437.268460](https://doi.org/10.1145/268437.268460)

53. Nguyen PTM, Passow BN, Yang Y. Improving anytime behavior for traffic signal control optimization based on NSGA-II and local search. In: International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2016. Vancouver, BC, Canada; 2016. p. 4611-8. doi: [10.1109/IJCNN.2016.7727804](https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727804)
54. Hatri CEL, Boumhidi J. Q-learning based intelligent multiobjective particle swarm optimization of light control for traffic urban congestion management. In: 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), 2016. Tangier, Morocco; 2016. p. 794-9. doi: [10.1109/CIST.2016.7804996](https://doi.org/10.1109/CIST.2016.7804996)
55. Zheng L, Xu C, Jin PJ, Ran B. Network-wide signal timing stochastic simulation optimization with environmental concerns. *Applied Soft Computing*. 2019;77:678-87. doi: [10.1016/j.asoc.2019.01.046](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.01.046)
56. Gökçe MA, Öner E, Işık G. Traffic signal optimization with particle swarm optimization for signalized roundabouts. *Simulation*. 2015;91:456-66. doi: [10.1177/0037549715581473](https://doi.org/10.1177/0037549715581473)
57. Dabiri S, Abbas M. Arterial traffic signal optimization using particle swarm optimization in an integrated VISSIM-MATLAB simulation environment. In: IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016. Rio de Janeiro, Brazil; 2016. p. 766-71. doi: [10.1109/ITSC.2016.7795641](https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795641)
58. Elgarej M, Khalifa M, Youssfi M. Traffic Lights Optimization with Distributed Ant Colony Optimization Based on Multi-agent System. In: Abdulla P, Delporte-Gallet C, editors. *Networked Systems. NETYS 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham; 2016. 9944. doi: [10.1007/978-3-319-46140-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46140-3_22)
59. Jintamuttha K, Watanapa B, Charoenkitkarn N. Dynamic traffic light timing optimization model using bat algorithm. In: 2nd International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE), 2016. Singapore; 2016. p. 181-5. doi: [10.1109/CCSSE.2016.7784378](https://doi.org/10.1109/CCSSE.2016.7784378)
60. Ahmed EKE, Khalifa AMA, Kheiri A. Evolutionary computation for static traffic light cycle optimisation. In: International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 2018. Khartoum, Sudan; 2018. p. 1-6. doi: [10.1109/ICCCEEE.2018.8515802](https://doi.org/10.1109/ICCCEEE.2018.8515802)

61. Chuo HSE, Tan MK, Chong ACH, Chin RKY, Teo KTK. Evolvable traffic signal control for intersection congestion alleviation with enhanced particle swarm optimisation. In: 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), 2017. Kota Kinabalu, Malaysia; 2017. p. 92-7. doi: [10.1109/I2CACIS.2017.8239039](https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2017.8239039)
62. Venayagamoorthy GK. A successful interdisciplinary course on computational intelligence. *IEEE Computer Intelligence Magnet*. 2009;4(1):14-23. doi: [10.1109/MCI.2008.930983](https://doi.org/10.1109/MCI.2008.930983)
63. Xiang J, Chen Z. Adaptive traffic signal control of bottleneck subzone based on grey qualitative reinforcement learning algorithm. In: Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods - Volume 2: ICPRAM, 2015. Lisbon, Portugal; 2015. p. 295-301 doi: [10.5220/0005269302950301](https://doi.org/10.5220/0005269302950301)
64. Benhamza K, Seridi H. Adaptive traffic signal control in multiple intersections network. *Journal of Intelligent&Fuzzy Systems*. 2015;28:2557-67. doi: [10.3233/IFS-151535](https://doi.org/10.3233/IFS-151535)
65. Vidhate DA, Kulkarni P. Cooperative multi-agent reinforcement learning models (CMRLM) for intelligent traffic control. In: 1st International Conference on Intelligent System sand Information Management ICISIM, 2017. Aurangabad, India; 2017. p. 325-31. doi: [10.1109/ICISIM.2017.8122193](https://doi.org/10.1109/ICISIM.2017.8122193)
66. Genders W, Razavi S. Evaluating reinforcement learning state representations for adaptive traffic signal control. *Procedia Computer Science*. 2018;130:26-33. doi: [10.1016/j.procs.2018.04.008](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.008)
67. Liang X, Du X, Member S, Wang G. A deep reinforcement learning network for traffic light cycle control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019;68:1243-53. doi: [10.1109/TVT.2018.2890726](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2890726).
68. Bernas M, Płaczek B. A neuroevolutionary approach to controlling traffic signals based on data from sensor network. *Sensors*. 2019;19:1-24. doi: [10.3390/s19081776](https://doi.org/10.3390/s19081776)
69. Abdelgawad H, Abdulhai B, El-Tantawy S, Hadayeghi A, Zvaniga B. Assessment of self-learning adaptive traffic signal control on congested urban areas: Inde-

pendent versus coordinated perspectives. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2015;42:353-66. doi: [10.1139/cjce-2014-0503](https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0503)

70. Ozan C, Baskan O, Haldenbilen S, Ceylan H. A modified reinforcement learning algorithm for solving coordinated signalized networks. *Transport Research Part C: Emerging Technology*. 2015;54:40-55. doi: [10.1016/j.trc.2015.03.010](https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.010)

71. Tarek Z, Al-Rahmawy M, Tolba A. Fog computing for optimized traffic control strategy. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2019;36(2):1401-15. doi: [10.3233/JIFS-18077](https://doi.org/10.3233/JIFS-18077).

72. Manandhar B, Joshi B. Adaptive traffic light control with statistical multiplexing technique and particle swarm optimization in smart cities. In: *Proceedings on IEEE 3rd International Conference Computing Communication Security (ICCCS)*, 2018. Kathmandu, Nepal; 2018. p. 210-7. doi: [10.1109/CCCS.2018.8586845](https://doi.org/10.1109/CCCS.2018.8586845)

73. Gao Y, Liu Y, Hu H, Ge YE. Signal optimization for an isolated intersection with illegal permissive left-turning movement. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2018;7(1):928-49. doi: [10.1080/21680566.2018.1518734](https://doi.org/10.1080/21680566.2018.1518734)

74. Gao K, Zhang Y, Su R, Yang F, Suganthan PN, Zhou M. Solving Traffic Signal Scheduling Problems in Heterogeneous Traffic Network by Using Meta-Heuristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019;20(9):3272-82. doi: [10.1109/TITS.2018.2873790](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2873790)

75. Jiao P, Li R, Li Z. Pareto front-based multi-objective real-time traffic signal control model for intersections using particle swarm optimization algorithm. *Advances in Mechanical Engineering* [Internet]. 2016 [cited 2023 Oct 21];8(8):168781401666604. Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016666042> doi: [10.1177/1687814016666042](https://doi.org/10.1177/1687814016666042)

76. Zhang Y, Zhou Y. Distributed coordination control of traffic network flow using adaptive genetic algorithm based on cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*. 2018;119:110-20. doi: [10.1016/j.jnca.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2018.07.001)

77. Xu M, An K, Vu LH, Ye Z, Feng J, Chen E. Optimizing multi-agent based urban traffic signal control system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2018;23(4):357-69. doi: [10.1080/15472450.2018.1501273](https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1501273)

78. Mohebifard R, Hajbabaie A. Optimal network-level traffic signal control: A benders decomposition-based solution algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019;121:252-74. doi: [10.1016/j.trb.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.012)
79. Yu H, Ma R, Zhang HM. Optimal traffic signal control under dynamic user equilibrium and link constraints in a general network. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018;110:302-25. doi: [10.1016/j.trb.2018.02.009](https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.02.009)
80. Yu C, Ma W, Han K, Yang X. Optimization of vehicle and pedestrian signals at isolated intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017;98:135-53. doi: [10.1016/j.trb.2016.12.015](https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.015)
81. Hajbabaie A, Benekahal RF. A Program for Simultaneous Network Signal Timing Optimization and Traffic Assignment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015;16(5):2573-86. doi: [10.1109/TITS.2015.2413360](https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2413360)
82. Li Z, Shahidehpour M, Bahramirad S, Khodaei A. Optimizing Traffic Signal Settings in Smart Cities. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017;8(5):2382–93. doi: [10.1109/TSG.2016.2526032](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2526032)
83. Ma W, An K, Lo HK. Multi-stage stochastic program to optimize signal timings under coordinated adaptive control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016;72:342-59. doi: [10.1016/j.trc.2016.10.002](https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.10.002)
84. Jiao P, Li Z, Liu M, Li D, Li Y. Real-time traffic signal optimization model based on average delay time per person. *Advances in Mechanical Engineering* [Internet]. 2015 [cited 2023 Oct 21];7(10):168781401561350. Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814015613500> doi: [10.1177/1687814015613500](https://doi.org/10.1177/1687814015613500)
85. Chen S, Sun DJ. An Improved Adaptive Signal Control Method for Isolated Signalized Intersection Based on Dynamic Programming. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2016;8(4):4-14. doi: [10.1109/MITS.2016.2605318](https://doi.org/10.1109/MITS.2016.2605318)
86. Ahmed F, Hawas YE. An integrated real-time traffic signal system for transit signal priority, incident detection and congestion management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015;60:52-76. doi: [10.1016/j.trc.2015.08.004](https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.004)

87. Dakic I, Stevanovic J, Stevanovic A. Backpressure Traffic Control Algorithms in Field-like Signal Operations. In: IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015. Gran Canaria, Spain; 2015. p. 137-42. doi: [10.1109/ITSC.2015.31](https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.31)
88. Pavleski D, Koltovska-Nechoska D, Ivanjko E. Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation. In: International Symposium ELMAR, 2017. Zadar, Croatia; 2017. p. 17-20. doi: [10.23919/ELMAR.2017.8124425](https://doi.org/10.23919/ELMAR.2017.8124425).
89. Chen X, Osorio C, Santos BF. Simulation-Based Travel Time Reliable Signal Control. *Transportation Science*. 2019;53(2):523-44. doi: [10.1287/trsc.2017.0812](https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0812).
90. Abdelgawad H, Abdulhai B, El-Tantawy S, Hadayeghi A, Zvaniga B. Assessment of self-learning adaptive traffic signal control on congested urban areas: independent versus coordinated perspectives. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2015;42(6):353–66. doi: [10.1139/cjce-2014-0503](https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0503)
91. Sultan Mohiuddin Qadri SS, Ali Gokce M, Oner E, Gokce EG. Analysis of Various Scenarios to Mitigate Congestion at a Signalized Roundabout using Microsimulation. In: Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), 2019. Izmir, Turkey; 2019. p. 1-6. doi: [10.1109/ASYU48272.2019.8946339](https://doi.org/10.1109/ASYU48272.2019.8946339)
92. Zheng L, Xue X, Xu C, Ran B. A stochastic simulation-based optimization method for equitable and efficient network-wide signal timing under uncertainties. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019;122:287-308. doi: [10.1016/j.trb.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.001)
93. Garg D, Chli M, Vogiatzis G. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Traffic Light Control. In: 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), 2018. Singapore; 2018. p. 214-8. doi: [10.1109/ICITE.2018.8492537](https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492537).
94. Shaheen S, Young T, Sperling D, Jordan D, Horan T, editors. Identification and Prioritization of Environmentally Beneficial Intelligent Transportation Technologies. California PATH Working Paper UCD-ITS-RR-98-01. Institute of Transportation Studies of University of California, Berkeley; 1998. 291 p.

95. Auer Jr JH, Huffman JP, Brady TW, inventors; SPX Corp, assignee. Progressive traffic signal control system. United States patent US3305828A. 1967 Feb 19.
96. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. 3rd ed. Ottawa: Institute of Transportation Engineers; 2008. 232 p.
97. Transportation Research Board, Signal Timing Manual. NCHRP Report 812. Washington, DC; 2015. 317 p.
98. Guide to Traffic Management Part 9: Transport Control Systems – Strategies and Operations. Sydney: Austroads Publication; 2020. 271 p.
99. Miller AJ. Australian road capacity guide: provisional introduction and signalized intersections, bulletin No. 4. Australian Road Research Board: Vermont South Vic.; 1968. 44 p.
100. Akçelik R. Traffic signals: capacity and timing analysis, ARR 123, Australian Road Research Board: Vermont South Vic.; 1981. 123 p.
101. Best Practice Guidance to Meet the Changing Needs of Transport Network Operations: Strategic Review of Austroads Guide to Traffic Management. Sydney: Austroads Publication; 2021. 27 p.
102. Traffic Control Signal Design Manual. Connecticut Department of Transportation Bureau of Engineering and Construction Division of Traffic Engineering; 2009. 201 p.
103. Vasudevan M. Robust Optimization Model for Bus Priority Control under Arterial Progression [dissertation]. Maryland, US; University of Maryland; 2005. 164 p.
104. Kim S. Dynamic Bandwidth Optimization for Coordinated Arterial [dissertation]. North Carolina, US; Raleigh; 2014. 224 p.
105. Little JDC, Martin BV, Morgan JT. Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth. Highway Research Record. 1966;118:21-47.
106. Little JDC, Kelson MD, Gartner NH. MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks. Transportation Research Record. 1981;795:40-6.

107. Stamatiadis C, Gartner NH. MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. Transportation Research Record. 1966;1554:9-17.
108. Shoufeng L, Ximin L, Shiqiang D. Revised MAXBAND Model for Bandwidth Optimization of Traffic Flow Dispersion. In: ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2008. Guangzhou, China; 2008. p. 85-9. doi: [10.1109/CCCM.2008.251](https://doi.org/10.1109/CCCM.2008.251)
109. Wu X, Tian Z, Hu P, Yuan Z. Bandwidth Optimization of Coordinated Arterials Based on Group Partition Method. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2012;43:232-44. doi: [10.1016/j.sbspro.2012.04.096](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.096)
110. Gartner NH, Little JDC. The Generalized Combination Method for Area Traffic Control. Working Paper of Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; 1973. 16 p.
111. Gartner NH, Little JDC, Gabbay H. Simultaneous Optimization of Offsets, Splits, and Cycle Time. Transportation Research Record. 1976;596:5-15.
112. Robertson DI. TRANSYT: A Traffic Network study Tool. Road Research Laboratory, UK; 1969. p. 22-41.
113. SIGOP: Traffic Signal Optimization Program: A computer program to calculate optimum coordination in a Grid network of synchronized traffic signals. Bureau of Public Roads. Traffic Research Corp., New York; 1966. 202 p.
114. Messer CJ, Whitson RH, Dudek CL, Romano EJ. A Variable-Sequence Multiphase Progression Optimization Program. Highway Research Record. 1973;445: 24-43.
115. Robertson DI. Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination, ITE journal. 1986;56:36-40.
116. Capaldo FS, Biggiero L. Some Surveys in Order to Static Traffic Light Coordination. In: First International Conference on Traffic and Transport Engineering Proceedings, 2012. Belgrade, Serbia; 2012. p. 766-71.
117. Deakin EA, Skabardonis A, May AD. Traffic Signal Timing as a Transportation System Management Measure: The California Experience. Transportation Research Record. 1986;1081:59-65.

118. Arnold Jr.ED. Signal Timing Optimization. A Review of State Programs. Virginia Transportation Research Council; 1988. 35 p. Report VTRC 88-R22.
119. Zheng J. A Performance Visualization and Fine-tuning Tool for Arterial Traffic Signal Systems [dissertation]. University of Minnesota, M.S; 2014. 55 p.
120. Ting Lu M.E. Dynamic Network-Wide Traffic Signal Optimization [dissertation]. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany; 2015. 170 p.
121. Han X. Adaptive Traffic Signal Coordination with a Game Theoretic Approach. 2017; 40 p.
122. Abdelghaffar HM. Developing and Testing a Novel De-centralized Cycle-free Game Theoretic Traffic Signal Controller: A Traffic Efficiency and Environmental Perspective [dissertation]. Blacksburg, Virginia, US; 2018. 143 p.
123. Xie Y. Development and Evaluation of an Arterial Adaptive Traffic Signal Control System Using Reinforcement Learning [dissertation]. University, College Station, Texas, US; 2007. 166 p.
124. Yue R. Determination of Progression Speeds for Traffic Signal Coordination [dissertation]. Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, US; 2020. 88 p.
125. Farzaneh M. Modeling traffic dispersion [dissertation]. Civil Engineering, Blacksburg, Virginia, US; 2005. 131 p.
126. Gartner NH. OPAC: Strategy for Demand-responsive Decentralized Traffic Signal Control. IFAC Proceedings Volumes. 1990;23(2):499-503. doi: [10.1016/S1474-6670\(17\)52677-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)52677-4)
127. Chang ECP, Koothrappally J. Coordination of actuated controllers on traffic control systems. Texas Transportation Institute of The Texas A&M, Texas, USA; 1994. 128 p. Research Report 1255-1.
128. Sropathi HK, Gartner NH, Stamatiadis C. Uniform and Variable Bandwidth Arterial Progression Schemes. Transportation Research Record. 1995;1494:135-45.

129. Gartner NH, Stamatiadis C. Concurrent Progression Schemes in Multiarterial Signal Networks Using Multiband. In: Proceeding of 68th Annual Meeting in Institute of Transportation Engineers, 1998. Toronto, Ontario, Canada; 1998. 14 p.
130. Gartner NH, Stamatiadis C. Arterial-Based Control of Traffic Flow in Urban Grid Networks. *Mathematical and Computer Modelling*. 2002;35:657-71. doi: [10.1016/S0895-7177\(02\)80027-9](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(02)80027-9)
131. Yin Y, Liu H.X., Laval J.A., Lu X.Y., Li M., Pilachowski J, et al. Development of an integrated microscopic traffic simulation and signal timing optimization tool. University of California, Berkeley, CA, USA; 2007. PATH Research Report UCB-ITS-PRR2007-2.
132. Adacher L. A global optimization approach to solve the traffic signal synchronization problem. In: 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation EWGT Proceedings, 2012. Paris, France; 2012. p. 1270-7.
133. Fernandez R. Evolution of the TRANSYT model in a developing country. *Transport Research Part A Policy and Practice*. 2006;40:386-98. doi: [10.1016/j.tra.2005.08.008](https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.008)
134. Lu S, Liu X, Dai S. Adaptive and Coordinated Traffic Signal Control Based on Q-Learning and MULTIBAND Model. In: IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2008. Chengdu, China; 2008. p.2366-71.
135. Tomforde S, Prothmann H, Rochner F, Branke J, Hähner J, Müller-Schloer C. et al. Decentralised Progressive Signal Systems for Organic Traffic Control. In: Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO, 2008. Venice, Italy; 2008. p. 413-22. doi: [10.1109/SASO.2008.31](https://doi.org/10.1109/SASO.2008.31)
136. Day CM, Sturdevant JR, Bullock DM. Outcome Oriented Performance Measures for Signalized Arterial Capacity Management. In: TRB Annual Meeting, 2010. Washington, DC, US; 2010. 31 p.
137. Gentile G, Tiddi D. Synchronization of traffic signals through a heuristic-modified genetic algorithm with GLTM. In: Proceedings of the XIII Meeting of the Euro Working Group on Transportation, 2009. Padua, Italy; 2009. p. 1-9.

138. Day CM, Haseman R, Premachandra H, Brennan TM, Wasson JS, Sturdevant JR, et al. Evaluation of Arterial Signal Coordination. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2010;2192(1):37-49. doi: [10.3141/2192-04](https://doi.org/10.3141/2192-04)
139. Day CM, Brennan TM, Premachandra H, Hainen AM, Remias SM, Sturdevant JR, et al. Quantifying Benefits of Traffic Signal Retiming. Final Report of Joint Transportation Research Program FHWA/IN/JTRP-2010/22. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana; 2010. 67 p. doi: [10.5703/1288284314250](https://doi.org/10.5703/1288284314250)
140. Day CM, Brennan TM, Premachandra H, Sturdevant JR, Richards G, Wasson JS. et al. Visualization and Assessment of Arterial Progression Quality Using High Resolution Signal Event Data and Measured Travel Time. Purdue University; 2010, 30 p. Available from: <http://docs.lib.purdue.edu/civeng/8>
141. Li M, Zhang L, Song MK, Wu G, Zhang WB, Zhang L, et al. Improving Performance of Coordinated Signal Control Systems Using Signal and Loop Data. University of California and University of Florida, USA; 2010. 129 p. Final Report for TO 6332.
142. Wang F, Tang K, Li K, Liu Z, Zhu L. A Group-Based Signal Timing Optimization Model Considering Safety for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows. Journal of Advanced Transportation. 2019;2019:1-13. doi: [10.1155/2019/2747569](https://doi.org/10.1155/2019/2747569)
143. Andalibian R, Tian Z. Signal Timing and Coordination Strategies Under Varying Traffic Demands. Nevada Department of Transportation, University of Nevada, Reno, NV, US; 2012. 46 p. NDOT Research Report № 236-11-803.
144. Wei M, Jin W, Shen L. A Platoon Dispersion Model Based on a Truncated Normal Distribution of Speed. Journal of Applied Mathematics. 2012;2012:1-13. doi: [10.1155/2012/727839](https://doi.org/10.1155/2012/727839)
145. Lighthill MJ, Whitham GB. On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1955;229(1178):317-45. doi: [10.1098/rspa.1955.0089](https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089)

146. Wong SC, Wong GCK. An analytical shock-fitting algorithm for LWR kinematic wave model embedded with linear speed-density relationship. *Transportation Research B*. 2002;36(8):683-706. doi: [10.1016/S0191-2615\(01\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00023-6)
147. Zhang P, Wong SC, Dai SQ. A conserved higher-order anisotropic traffic flow model: description of equilibrium and non-equilibrium flows. *Transportation Research B*. 2009;43(5):562-74. doi: [10.1016/j.trb.2008.10.001](https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.10.001)
148. Pacey G.M. The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal. Research Note RN/2665/GMP. Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK; 1956.
149. Grace MJ, Potts RB. A theory of the diffusion of traffic platoons. *Operation Research*. 1964;12(2):255-75.
150. Fusco G, Bielli M, Cipriani E, Gori S, Nigro M. Signal Settings Synchronization and Dynamic Traffic Modelling. *European Transport/Trasporti Europei*. 2013;53:7. Available from: <http://hdl.handle.net/10077/8693>
151. Cantarella GE, Di Pace R, Memoli S, de Luca S. The Network Signal Setting Problem: The Coordination Approach vs. the Synchronisation Approach. In: 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2013. Cambridge, UK; 2013. p. 575-9. doi: [10.1109/UKSim.2013.99](https://doi.org/10.1109/UKSim.2013.99)
152. Liu HX. Automatic Generation of Traffic Signal Timing Plan. Minnesota Department of Transportation, Minnesota, USA; 2014. 67 p. Research Report CTS Project 2013041.
153. Kim S, Hajbabaie A, Williams BM, Roupail NM. Development of Near Real Time Performance Measurements for Closed-Loop Signal Systems (CLS) Using Historical Traffic Data from Existing Loop Detectors and Signal Timing Data. Project NCDOT RP-2012-12. North Carolina State University, North Carolina, USA; 2014, 230 p.
154. Zhou Y, Jia S, Mao B, Ho TK, Wei W. An Arterial Signal Coordination Optimization Model for Trams Based on Modified AM-BAND. *Discrete Dynamics in Nature and Society* [Internet]. 2016 [cited 2023 Oct 21]. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/ddns/2016/5028095/> doi: [10.1155/2016/5028095](https://doi.org/10.1155/2016/5028095)

155. Kim SR, Warchol S, Schroeder BJ, Cunningham C. Innovative Method for Remotely Fine-Tuning Offsets Along a Diverging Diamond Interchange Corridor. *Transportation Research Record*. 2016;2557:33-43. doi: [10.3141/2557-0](https://doi.org/10.3141/2557-0)
156. Rane V, Goliya HS, Sanwaliya P, Faraz MI. Synchronization of Signalized Intersection from Rasoma to High Court in Indore District. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2016;6(4):112-6.
157. Leal SS, de Almeida PEM, Chung E. Active control for traffic lights in regions and corridors: an approach based on evolutionary computation. *Transportation Research Procedia*. 2017;25:1769-80. doi: [10.1016/j.trpro.2017.05.140](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.140)
158. Simoni MD, Claudel CG. A semi-analytic approach to model signal plans in urban corridors and its application in metaheuristic optimization. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2017;7(1):185-201. doi: [10.1080/21680566.2017.1370397](https://doi.org/10.1080/21680566.2017.1370397)
159. Hajbabaie A, Mohebifard R. Dynamic Metering in Connected Urban Street Networks: Improving Mobility. Pacific Northwest Transportation Consortium (PacTrans); 2017. 73 p. Final Project Report 2017-S-WSU-2.
160. Gao K, Yicheng Zhang, Sadollah A, Rong Su. Improved artificial bee colony algorithm for solving urban traffic light scheduling problem. In: *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 2017. Donostia, Spain; 2017. p. 395-402. doi: [10.1109/CEC.2017.7969339](https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969339)
161. Kalathil D, Kurzhanskiy AA, Varaiya P. Sustainable Operation of Arterial Networks. University of California at Berkeley Institute of Transportation Studies. Berkeley, California, USA; 2017. 73 p. Final Report CA17-3001.
162. Zhou Z, Schutter BD, Lin S, Xi Y. Two-level hierarchical model-based predictive control for large-scale urban traffic networks. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2017;25(2):496-508. doi: [10.1109/TCST.2016.2572169](https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2572169)
163. Hajbabaie A, Mohebifard R. Mohebifard AAR, Sorour S, Yaqub U. Hierarchical Priority-Based Control of Signalized Intersections in Semi-Connected Corridors. Pacific Northwest Transportation Consortium (PacTrans), 2018. 70 p. Final Project Report 2018-M-WSU-2.

164. Grandinetti P, Canudas-de-Wit C, Garin F. Distributed Optimal Traffic Lights Design for Large-Scale Urban Networks. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2019;27(3):950-63. doi: [10.1109/TCST.2018.2807792](https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2807792)
165. Scheffler R, Strehler M. Optimizing Traffic Signal Settings for Public Transport Priority. In: 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization and Systems, 2017. Vienna; 2017. doi: [10.4230/OASIcs.ATMOS.2017.9](https://doi.org/10.4230/OASIcs.ATMOS.2017.9)
166. Cabezas X, García S, Salas SD. A hybrid heuristic approach for traffic light synchronization based on the MAXBAND. *Soft Computing Letters* [Internet]. 2019[cited 2023 Oct 21];1:100001. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666222119300012?via%3Dihub> doi: [10.1016/j.socl.2019.100001](https://doi.org/10.1016/j.socl.2019.100001)
167. Zhihui L, Qian C, Yonghua Z, Pengfei T, Rui Z. Krill Herd Algorithm for Signal Optimization of Cooperative Control With Traffic Supply and Demand. *IEEE Access*. 2019;7:10776-86. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2891791](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2891791)
168. Li Z., Xu C. Zhang G. A Deep Reinforcement Learning Approach for Traffic Signal Control Optimization. *arXiv:2107.06115*. 21 p. Available from: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2107/2107.06115.pdf>.
169. Guo Q, Li L, Ban X. Urban Traffic Signal Control with Connected and Automated Vehicles: A Survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019;101:313-34. doi: [10.1016/j.trc.2019.01.026](https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.026)
170. Islam SMABA, Hajbabaie A, Aziz HMA. A real-time network-level traffic signal control methodology with partial connected vehicle information. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [Internet]. 2020 [cited 2023 Oct 21];121:102830. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X20307348?via%3Dihub> doi: [10.1016/j.trc.2020.102830](https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102830)
171. Hajbabaie A, Tajalli M. Dynamic Speed Harmonization in Connected Urban Street Networks: Improving Mobility. *Center for Advanced Multimodal Mobility Solu-*

tions and Education of The University of North Carolina, 2020. 41 p. Final Project Report No 17.

172. Tajalli M, Mehrabipour M, Hajbabaie A. Network-Level Coordinated Speed Optimization and Traffic Light Control for Connected and Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021;22(11):6748-59. doi: [10.1109/TITS.2020.2994468](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2994468)

173. Івченко А. Міста України: Довідник. Київ: НВП «Картографія», 1999. 136 с.

174. Nesheli MM, Puan OC, Roshandeh AM. Evaluation of Effect of Traffic Signal Coordination System on Congestion. In: 2nd WSEAS International Conference on urban planning and transportation, 2009. Rodos Island, Greece; 2009. p. 143-8.

175. Fernandez R. Evolution of the TRANSYT model in a developing country. *Transport Research Part A: Policy and Practice*. 2006;40:386-98. doi: [10.1016/j.tra.2005.08.008](https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.008)

176. Словник української мови: в 11 тт. Том 9. АН УРСР. Інститут мовознавства; за ред. І. К. Білодіда. К.: Наукова думка, 1978.

177. Ohno K. Computational algorithm for a fixed-cycle traffic light problem for compound Poisson arrivals. *Transportation Science*. 1978;12:29-47.

178. van Leeuwen JSH. Delay analysis for the fixed-cycle traffic-light queue. *Transportation Science*. 2006;40(2):189-99.

179. Akgungor AP, Bullen AGR. Analytical Delay Models for Signalized Intersections. In: *Transportation Frontiers for the Next Millennium: 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers*, 1999. Las Vegas, Nevada, USA; 1999. 35 p.

180. Cheng DX, Messer CJ, Zong ZT, Liu J. Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000. In: *Annual Meeting in Washington, DC*; 2003, 27 p.

181. Beckmann M, McGuire CB, Winsten CB, Koopmans TC. *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press: New Haven; 1956. 232 p.

182. Newell GF. Queues for a fixed-cycle traffic light. *Ann. Math. Statist.* 1960;31(3):589-97.

183. Darroch JN. On the traffic-light queue. Ann. Math. Statist. 1964;35(1):380-8.
184. Guide to Traffic Management. Part 2: Traffic Theory. Austroads Publication; 2008. 95 p.
185. Shilov GYe, Wallace DAR. Mathematical Analysis: A Special Course. Pergamon Press; 2014. 498 p.
186. Gnedenko BV, Belyaev JK, Solov'ev AD. Mathematical methods in the reliability theory. 2nd. ed. Burlington: Academic Press; 2014. 519 p.
187. URL: <https://itc.ua/news/za-povnij-2021-rik-ukrayinczi-pridbali-103-tis-novih-legkovih-avtomobiliv-shho-na-21-bilshe-pokaznika-poperednogo-roku/> (дата звернення 22.05.2023).
188. URL: <https://mind.ua/news/20235025-kilkist-reestracij-vzhivanih-avto-v-ukrayini-syagnula-rekordu-v-2021-roci> (дата звернення 22.05.2023).
189. URL: <https://corporate.tomtom.com/static-files/8fd1d5d2-0ecb-47b6-97b7-9c8017df91c2>. (дата звернення 22.05.2023).
190. URL: [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/kharkiv-traffic/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/kharkiv-traffic/). (дата звернення 22.05.2023).

## ДОДАТОК А

Параметри технічних засобів організації дорожнього руху, розташованих на перехрестях ділянки просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської, до впровадження плану координації

НВП "СИСТЕМА+СЕРВІС"

Україна, 61046, м. Харків, вул. Автогенна, 10/2  
т./ф. +38 (057) 714 - 35 - 44 м. 717- 40-92

Web: <http://www.komkon.ua>  
e-mail: [info@komkon.ua](mailto:info@komkon.ua)



## Звіт про об'єкт, згенерований програмою "КОМКОН-СПОД"

## Основна інформація:

Об'єкт №57, місцезнаходження: Україна, Харківська область, місто Харків,  
мережна адреса: "0", протокол обміну: "Харків (1 лінія)", магістраль "17", тип КДК "КДК 32-01-НП (Мера 128)"  
дата створення: 26.12.2012; дата запуску: 26.12.2012; технолог. "Відсічення для 1-го та 7-го напрямків"  
"пр. Науки - пр. Незалежності" (СТАРА)"

## Таблиця підключення:

| №  | Тип напрямку | Кольори  | Виходи |
|----|--------------|----------|--------|
| 1  |              | ЧЕРВОНИЙ | 1      |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 2      |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 3      |
| 2  |              | ЧЕРВОНИЙ | 4      |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 5      |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 6      |
| 3  |              | ЧЕРВОНИЙ | 7      |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 8      |
| 4  |              | ЧЕРВОНИЙ | 9      |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 10     |
| 5  |              | ЧЕРВОНИЙ | 11     |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 12     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 13     |
| 6  |              | ЧЕРВОНИЙ | 14     |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 15     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 16     |
| 7  |              | ЧЕРВОНИЙ | 17     |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 18     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 19     |
| 8  |              | ЧЕРВОНИЙ | 20     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 21     |
| 9  |              | ЧЕРВОНИЙ | 22     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 23     |
| 10 |              | ЧЕРВОНИЙ | 24     |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 25     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 26     |
| 11 |              | ЧЕРВОНИЙ | 27     |
|    |              | ЖОВТИЙ   | 28     |
|    |              | ЗЕЛЕНИЙ  | 29     |

Комбінації тумблерів на КДІП та режими роботи:



Рисунок А.1 – Таблиця підключення на перехресті просп. Науки – просп. Незалежності

Фази та напрямки, що в них приймають участь:

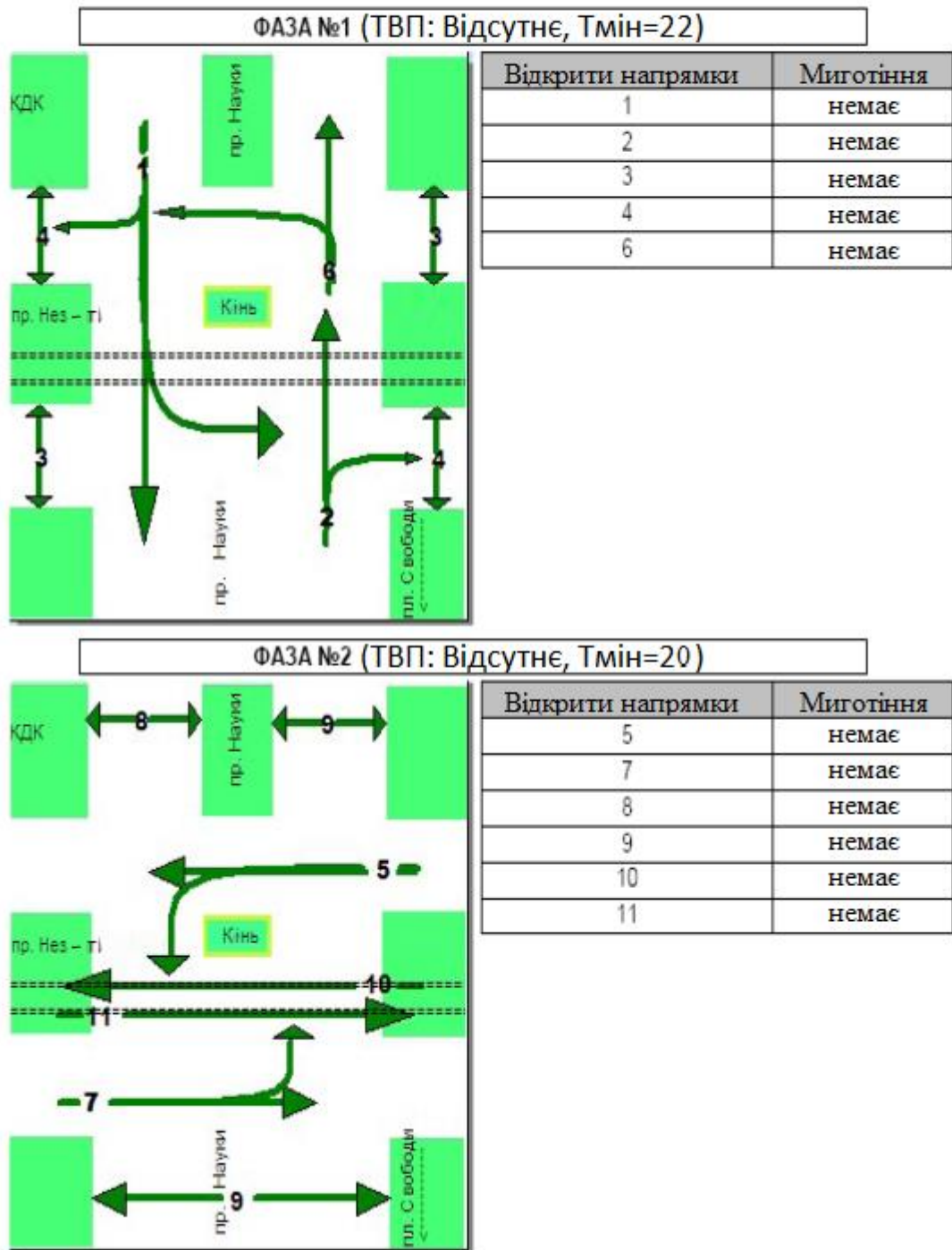


Рисунок А.2 – Фази та напрямки, що в них приймають участь  
на перехресті просп. Науки – просп. Незалежності

### Розклад роботи контролера:

#### Локальна програма № 1

Режим роботи програми: "Циклічна", тип резервної: "Відсутня"

| Фази у програмі | Тривалість фази (сек): |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 31                     |
| 2               | 31                     |

### Локальні програми роботи контролера

| День тижня | Програма № | Час запуску | Зміщення |
|------------|------------|-------------|----------|
| ПОНЕДІЛОК  | 1          | 23:59       | 0        |
| ВІВТОРОК   | 1          | 23:59       | 0        |
| СЕРЕДА     | 1          | 23:59       | 0        |
| ЧЕТВЕР     | 1          | 23:59       | 0        |
| П'ЯТНИЦЯ   | 1          | 23:59       | 0        |
| СУБОТА     | 1          | 23:59       | 0        |
| НЕДІЛЯ     | 1          | 23:59       | 0        |



Рисунок А.3 – Розклад роботи контролера  
на перехресті просп. Науки – просп. Незалежності

Циклограма, сгенерована "КОМКОН-СПОД", для об'єкта: "пр. Науки - пр. Незалежності (СТАРА)"  
програма №1.

Позначення: зелений; жовтий; червоний; червоно-жовтий; зелене миготіння.

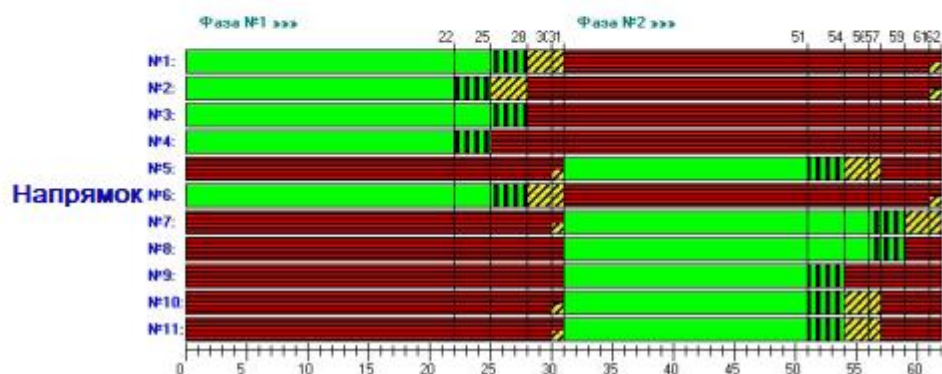


Рисунок А.4 – Циклограма роботи світлофорного об'єкта  
на перехресті просп. Науки – просп. Незалежності

## НВП "СИСТЕМА+СЕРВІС"

Україна, 61046, м. Харків, вул. Автогенна, 10/2  
т./ф. +38 (057) 714 - 35 - 44 м. 717- 40-92

Web: <http://www.komkon.ua>  
e-mail: [info@komkon.ua](mailto:info@komkon.ua)



## Звіт про об'єкт, згенерований програмою "КОМКОН-СПОД"

## Основна інформація:

Об'єкт №60, місцезнаходження: Україна, Харківська область, місто Харків,  
мережна адреса: "0", протокол обміну: "Харків (1 лінія)", магістраль "17", тип КДК "КДК 28-01-НП (Mera 12.8)"  
дата створення: 03.09.2013; дата запуску: 03.09.2013; технолог. ""  
"пр. Науки - вул. Культури" (СТАРА)"

## Таблиця підключення:

| №  | Тип напрямку                                                                        | Кольори           | Виходи   |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------|----|
| 1  |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 1  |
|    |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 2        |    |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 3        |    |
| 2  |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 4  |
|    |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 5        |    |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 6        |    |
| 3  |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 7  |
|    |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 8        |    |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 9        |    |
| 4  |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 10 |
|    |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 11       |    |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 12       |    |
| 5  |  | Поворотна стрілка | ЗЕЛЕНИЙ  | 13 |
| 6  |  | Поворотна стрілка | ЗЕЛЕНИЙ  | 14 |
| 7  |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 15 |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 16       |    |
| 8  |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 17 |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 18       |    |
| 9  |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 19 |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 20       |    |
| 10 |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 21 |
|    |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 22       |    |

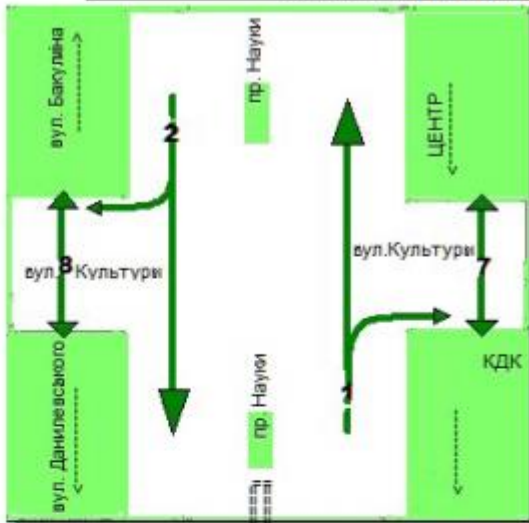
## Комбінації тумблерів на КДІП та режими роботи:



Рисунок А.5 – Таблиця підключення на перехресті просп. Науки – вул. Культури

**Фази та напрямки, що в них приймають участь:**

**ФАЗА №1 (ТВП: Відсутнє, Тмін=20)**



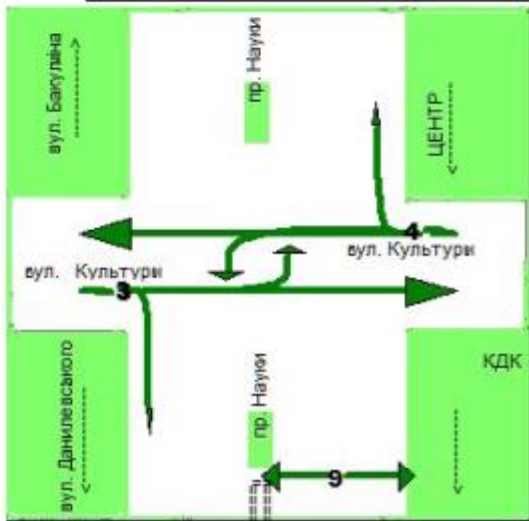
| Відкрити напрямки | Миготіння |
|-------------------|-----------|
| 1                 | немає     |
| 2                 | немає     |
| 7                 | немає     |
| 8                 | немає     |

**ФАЗА №2 (ТВП: Відсутнє, Тмін=16)**



| Відкрити напрямки | Миготіння |
|-------------------|-----------|
| 5                 | немає     |
| 6                 | немає     |
| 10                | немає     |

**ФАЗА №3 (ТВП: Відсутнє, Тмін=20)**



| Відкрити напрямки | Миготіння |
|-------------------|-----------|
| 3                 | немає     |
| 4                 | немає     |
| 9                 | немає     |

Рисунок А.6 – Фази та напрямки, що в них приймають участь на перехресті просп. Науки – вул. Культури

**Розклад роботи контролера:****Локальна програма № 1**

Режим роботи програми: "Циклічна", тип резервної: "Відсутня"

| Фази у програмі | Тривалість фази (сек): |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 26                     |
| 2               | 22                     |
| 3               | 26                     |

**Локальні програми роботи контролера**

| День тижня | Програма № | Час запуску | Зміщення |
|------------|------------|-------------|----------|
| ПОНЕДІЛОК  | 1          | 23:59       | 0        |
| ВІВТОРОК   | 1          | 23:59       | 0        |
| СЕРЕДА     | 1          | 23:59       | 0        |
| ЧЕТВЕР     | 1          | 23:59       | 0        |
| П'ЯТНИЦЯ   | 1          | 23:59       | 0        |
| СУБОТА     | 1          | 23:59       | 0        |
| НЕДІЛЯ     | 1          | 23:59       | 0        |



Рисунок А.7 – Розклад роботи контролера  
на перехресті просп. Науки – вул. Культури

Циклограма, сгенерована "КОМКОН-СПОД", для об'єкта: "пр. Науки - вул. Культури (19.07.21 р.)"  
програма №1.

Позначення: зелений; жовтий; червоний; червоно-жовтий; зелене миготіння.

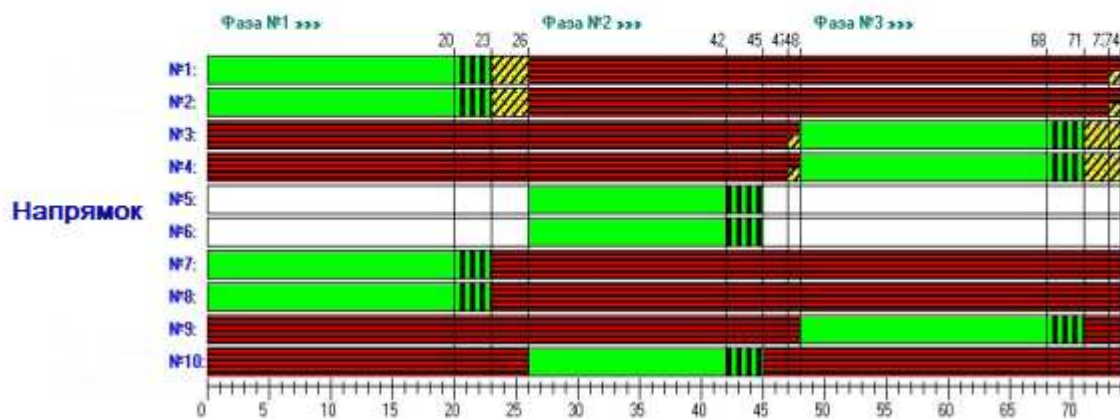


Рисунок А.8 – Циклограма роботи світлофорного об'єкта  
на перехресті просп. Науки – вул. Культури

## НВП "СИСТЕМА+СЕРВІС"

Україна, 61046, м. Харків, вул.Автогенна, 10/2  
т./ф. +38 (057) 714 - 35 - 44 т. 717- 40-92

Web: <http://www.komkon.ua>  
e-mail: [info@komkon.ua](mailto:info@komkon.ua)



## Звіт про об'єкт, згенерований програмою "КОМКОН-СПОД"

## Основна інформація:

Об'єкт №62, місцезнаходження: Україна, Харківська область, місто Харків,  
мережна адреса: "0", протокол обміну: "Харків (1 лінія)", магістраль "17", тип КДК "КДК 24-01-НП (Mera 128)"  
дата створення: 18.02.2016; дата запуску: 18.02.2016; технолог.: "Нечипоренко В.А."  
"пр. Науки - вул. Бакуліна" (СТАРА)"

## Таблиця підключення:

| № | Тип напрямку                                                                                          | Кольори  | Виходи |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|
| 1 |  Транспортний        | ЧЕРВОНИЙ | 1      |
|   |                                                                                                       | ЖОВТИЙ   | 2      |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 3      |
| 2 |  Транспортний        | ЧЕРВОНИЙ | 4      |
|   |                                                                                                       | ЖОВТИЙ   | 5      |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 6      |
| 3 |  Транспортний        | ЧЕРВОНИЙ | 7      |
|   |                                                                                                       | ЖОВТИЙ   | 8      |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 9      |
| 4 |  Транспортний       | ЧЕРВОНИЙ | 10     |
|   |                                                                                                       | ЖОВТИЙ   | 11     |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 12     |
| 5 |  Поворотна стрілка | ЗЕЛЕНИЙ  | 13     |
| 6 |  Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 14     |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 15     |
| 7 |  Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 16     |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 17     |
| 8 |  Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 18     |
|   |                                                                                                       | ЗЕЛЕНИЙ  | 19     |

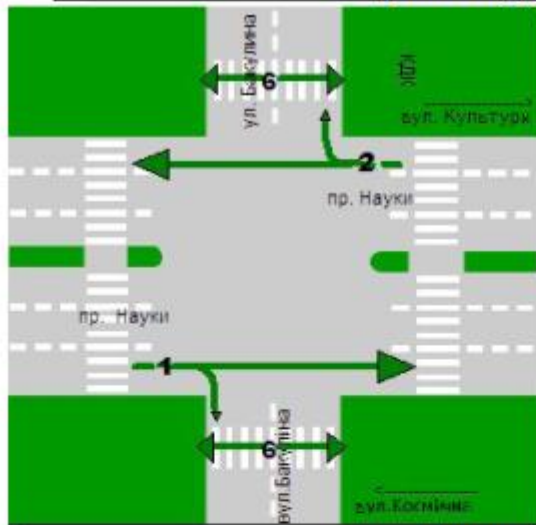
## Комбінації тумблерів на КДІП та режими роботи:



Рисунок А.9 – Таблиця підключення на перехресті просп. Науки – вул. Бакуліна

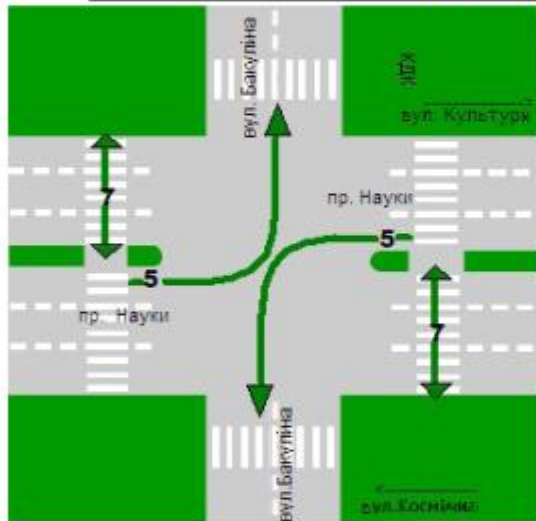
**Фази та напрямки, що в них приймають участь:**

**ФАЗА №1 (ТВП: Відсутнє, Тмін=20)**



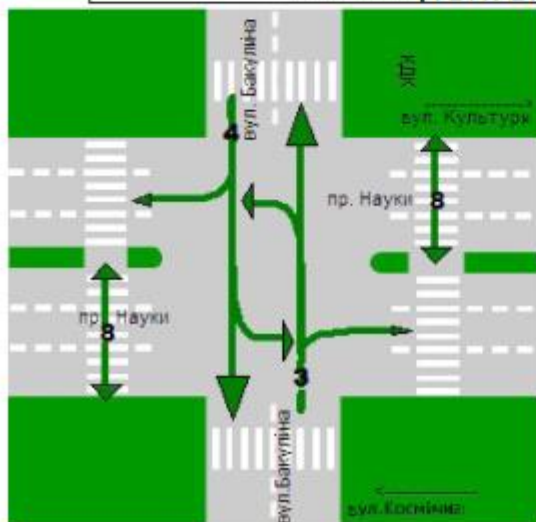
| Відкрити напрямки | Миготіння |
|-------------------|-----------|
| 1                 | немає     |
| 2                 | немає     |
| 6                 | є         |

**ФАЗА №2 (ТВП: Відсутнє, Тмін=16)**



| Відкрити напрямки | Миготіння |
|-------------------|-----------|
| 5                 | немає     |
| 7                 | немає     |

**ФАЗА №3 (ТВП: Відсутнє, Тмін=16)**



| Відкрити напрямки | Миготіння |
|-------------------|-----------|
| 3                 | немає     |
| 4                 | немає     |
| 8                 | немає     |

Рисунок А.10 – Фази та напрямки, що в них приймають участь на перехресті просп. Науки – вул. Бакуліна

**Розклад роботи контролера:****Локальна програма № 1**

Режим роботи програми: "Циклічна", тип резервної: "Відсутня"

| Фази у програмі | Тривалість фази (сек): |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 26                     |
| 2               | 22                     |
| 3               | 26                     |

**Локальні програми роботи контролера**

| День тижня | Програма № | Час запуску | Зміщення |
|------------|------------|-------------|----------|
| ПОНЕДІЛОК  | 1          | 23:59       | 0        |
| ВІВТОРОК   | 1          | 23:59       | 0        |
| СЕРЕДА     | 1          | 23:59       | 0        |
| ЧЕТВЕР     | 1          | 23:59       | 0        |
| П'ЯТНИЦЯ   | 1          | 23:59       | 0        |
| СУБОТА     | 1          | 23:59       | 0        |
| НЕДІЛЯ     | 1          | 23:59       | 0        |



Рисунок А.11 – Розклад роботи контролера  
на перехресті просп. Науки – вул. Бакуліна

Циклограма, сгенерована "КОМКОН-СПОД", для об'єкта: "пр. Науки - вул. Бакуліна (19.07.21 р.)"  
програма №1.

Позначення: зелений; жовтий; червоний; червоно-жовтий; зелене миготіння.

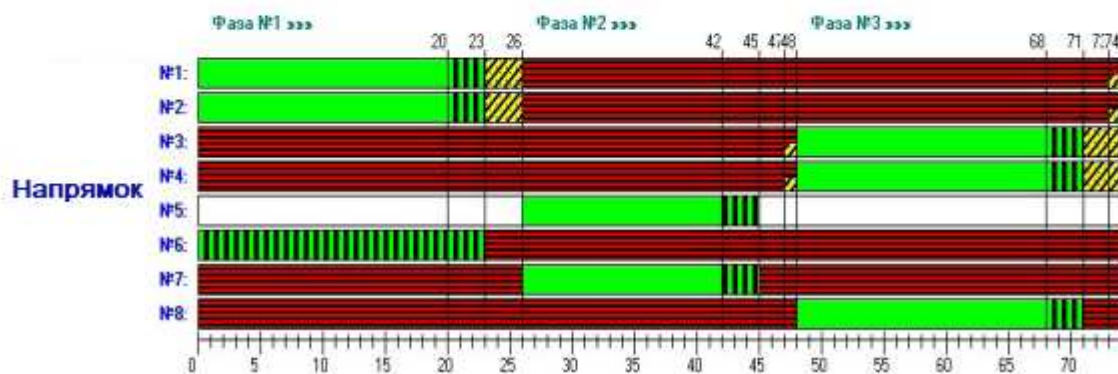


Рисунок А.12 – Циклограма роботи світлофорного об'єкта  
на перехресті просп. Науки – вул. Бакуліна

## НВП "СИСТЕМА+СЕРВІС"

Україна, 61046, м. Харків, вул. Автогенна, 10/2  
т./ф. +38 (057) 714 - 35 - 44 т. 717- 40-92

Web: <http://www.komkon.ua>  
e-mail: [info@komkon.ua](mailto:info@komkon.ua)



## Звіт про об'єкт, згенерований програмою "КОМКОН-СПОД"

Основна інформація:

Об'єкт №61, місцезнаходження: Україна, Харківська область, місто Харків,  
мережна адреса: "0", протокол обміну: "Харків (1 лінія)", магістраль "17", тип КДК "КДК 24-01-НП (Mera 128)"  
дата створення: 08.02.2016; дата запуску: 08.02.2016; технолог.: "Нечипоренко В.А."  
"пр. Науки - вул. Космічна" (СТАРА)"

Таблиця підключення:

| № | Тип напрямку                                                                        | Кольори           | Виходи   |    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------|----|
| 1 |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 1  |
|   |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 2        |    |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 3        |    |
| 2 |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 4  |
|   |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 5        |    |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 6        |    |
| 3 |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 7  |
|   |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 8        |    |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 9        |    |
| 4 |    | Транспортний      | ЧЕРВОНИЙ | 10 |
|   |                                                                                     | ЖОВТИЙ            | 11       |    |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 12       |    |
| 5 |  | Поворотна стрілка | ЗЕЛЕНИЙ  | 13 |
| 6 |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 14 |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 15       |    |
| 7 |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 16 |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 17       |    |
| 8 |  | Пішохідний        | ЧЕРВОНИЙ | 18 |
|   |                                                                                     | ЗЕЛЕНИЙ           | 19       |    |

## Комбінації тумблерів на КДІП та режими роботи:



Рисунок А.13 – Таблиця підключення на перехресті просп. Науки – вул. Космічної

**Фази та напрямки, що в них приймають участь:**

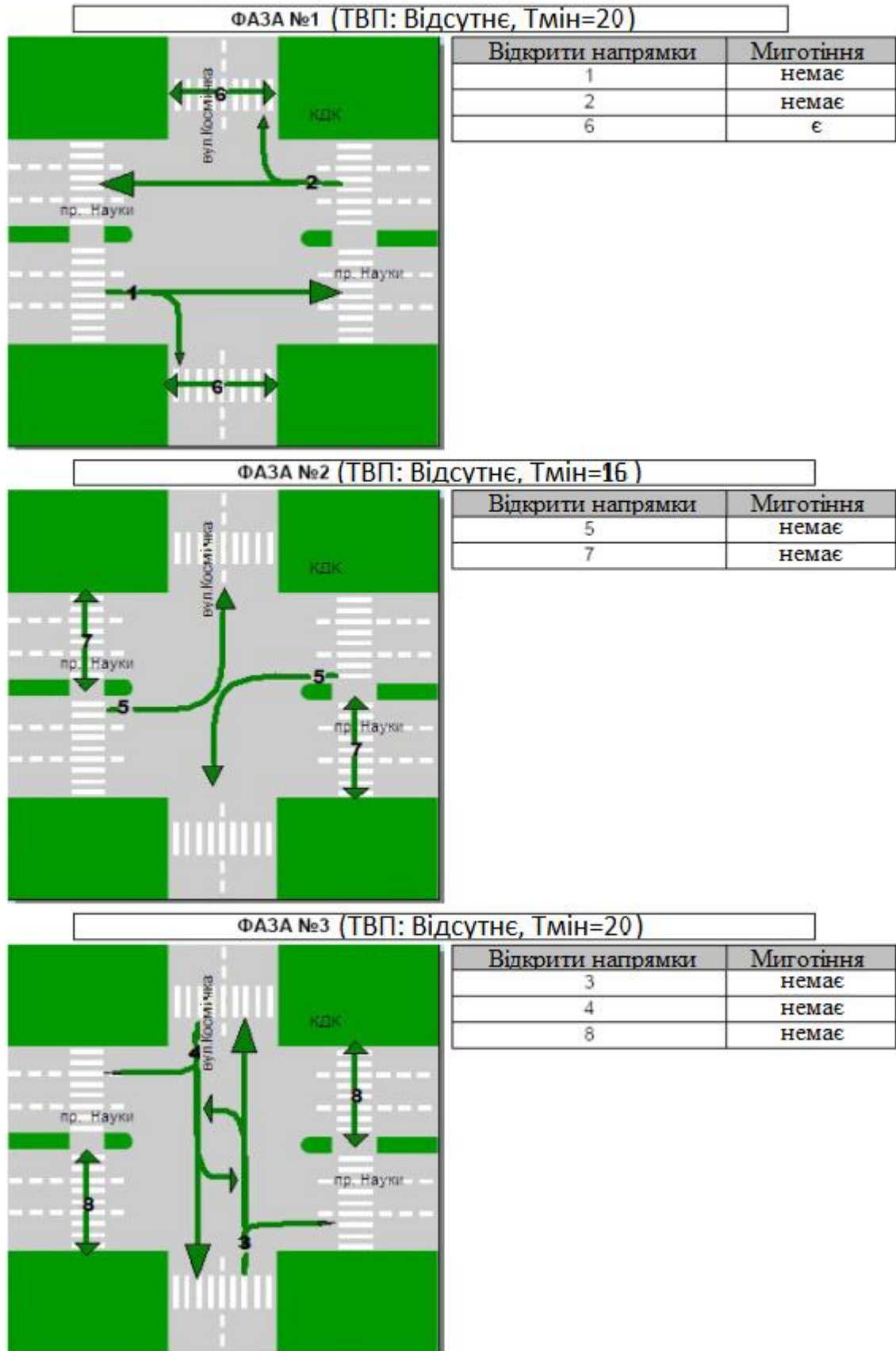


Рисунок А.14 – Фази та напрямки, що в них приймають участь на перехресті просп. Науки – вул. Космічної

**Розклад роботи контролера:****Локальна програма № 1**

Режим роботи програми: "Циклічна", тип резервної: "Відсутня"

| Фази у програмі | Тривалість фази (сек): |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 26                     |
| 2               | 22                     |
| 3               | 26                     |

**Локальні програми роботи контролера**

| День тижня | Програма № | Час запуску | Зміщення |
|------------|------------|-------------|----------|
| ПОНЕДІЛОК  | 1          | 23:59       | 0        |
| ВІВТОРОК   | 1          | 23:59       | 0        |
| СЕРЕДА     | 1          | 23:59       | 0        |
| ЧЕТВЕР     | 1          | 23:59       | 0        |
| П'ЯТНИЦЯ   | 1          | 23:59       | 0        |
| СУБОТА     | 1          | 23:59       | 0        |
| НЕДІЛЯ     | 1          | 23:59       | 0        |



Рисунок А.15 – Розклад роботи контролера  
на перехресті просп. Науки – вул. Космічної

Циклограма, сгенерована "КОМКОН-СПОД", для об'єкта: "пр. Науки - вул. Космична (19.07.21р.)"  
програма №1.

Позначення: зелений; жовтий; червоний; червоно-жовтий; зелене миготіння.

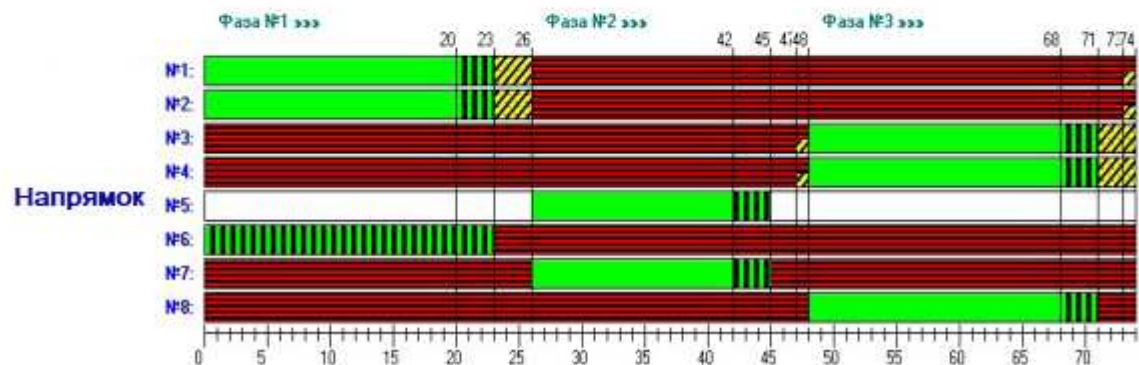


Рисунок А.16 – Циклограма роботи світлофорного об'єкта

на перехресті просп. Науки – вул. Космічної

НВП "СИСТЕМА+СЕРВІС"

Україна, 61046, м. Харків, вул. Автогенна, 10/2  
т./ф. +38 (057) 714 - 35 - 44 м. 717- 40-92

Web: <http://www.komkon.ua>  
e-mail: [info@komkon.ua](mailto:info@komkon.ua)



### Звіт про об'єкт, згенерований програмою "КОМКОН-СПОД"

#### Основна інформація:

Об'єкт №58, місцезнаходження: Україна, Харківська область, місто Харків,  
мережна адреса: "0", протокол обміну: "Харків (1 лінія)", магістраль "17", тип КДК "КДК 24-01-НП (Мега 128)"  
дата створення: 29.01.2021; дата запуску: 29.01.2021; технолог.: "пішохідники розведені".  
"пр. Науки - вул. Новгородська" (СТАРА)"

#### Таблиця підключення:

| №  | Тип напрямлення | Цвета    | Выходы |
|----|-----------------|----------|--------|
| 1  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 1      |
|    |                 | ЖОВТИЙ   | 2      |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 3      |
| 2  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 4      |
|    |                 | ЖОВТИЙ   | 5      |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 6      |
| 3  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 7      |
|    |                 | ЖОВТИЙ   | 8      |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 9      |
| 4  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 10     |
|    |                 | ЖОВТИЙ   | 11     |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 12     |
| 5  |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 13     |
| 6  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 14     |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 15     |
| 7  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 16     |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 17     |
| 8  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 18     |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 19     |
| 9  |                 | ЧЕРВОНИЙ | 20     |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 21     |
| 10 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 22     |
|    |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 23     |

Комбінації тумблерів на КДП та режими роботи:



Рисунок А.17 – Таблиця підключення на перехресті  
просп. Науки – вул. Новгородської

**Фази та напрямки, що в них приймають участь:**

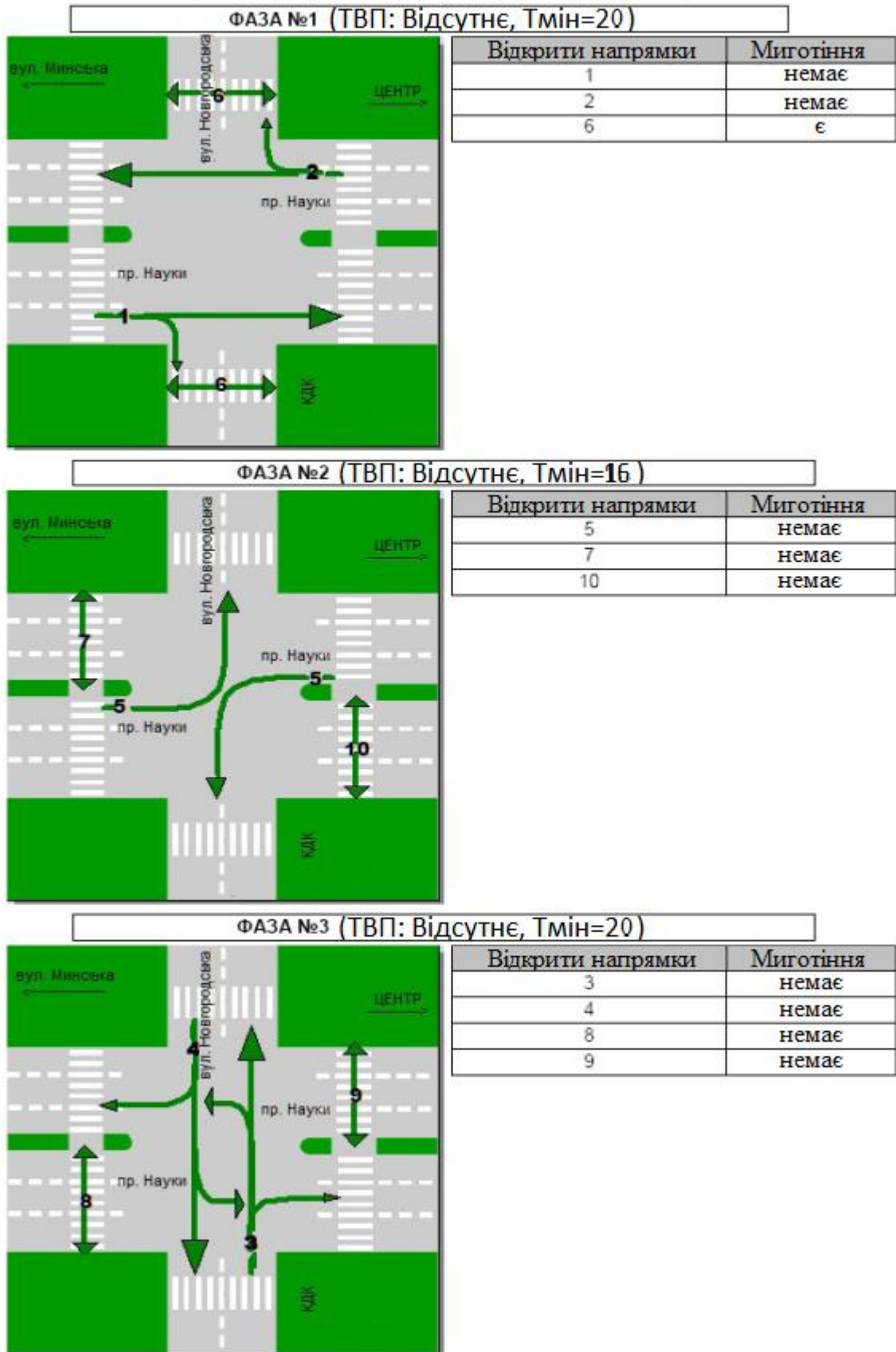


Рисунок А.18 – Фази та напрямки, що в них приймають участь на перехресті просп. Науки – вул. Новгородської

**Розклад роботи контролера:****Локальна програма № 1**

Режим роботи програми: "Циклічна", тип резервної: "Відсутня"

| Фази у програмі | Тривалість фази (сек): |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 26                     |
| 2               | 22                     |
| 3               | 29                     |

**Локальні програми роботи контролера**

| День тижня | Програма № | Час запуску | Зміщення |
|------------|------------|-------------|----------|
| ПОНЕДІЛОК  | 1          | 23:59       | 0        |
| ВІВТОРОК   | 1          | 23:59       | 0        |
| СЕРЕДА     | 1          | 23:59       | 0        |
| ЧЕТВЕР     | 1          | 23:59       | 0        |
| П'ЯТНИЦЯ   | 1          | 23:59       | 0        |
| СУБОТА     | 1          | 23:59       | 0        |
| НЕДІЛЯ     | 1          | 23:59       | 0        |



Рисунок А.19 – Розклад роботи контролера  
на перехресті просп. Науки – вул. Новгородської

Циклограма, сгенерована "КОМКОН-СПОД", для об'єкта: "пр. Науки - вул. Новгородська (29.01.21 р.)"  
програма №1.

Позначення: зелений; жовтий; червоний; червоно-жовтий; зелене миготіння.

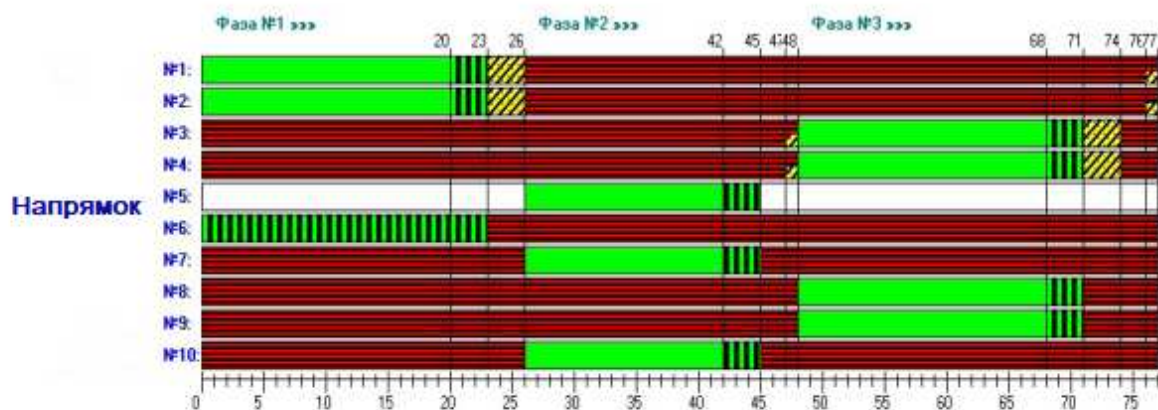


Рисунок А.20 – Циклограма роботи світлофорного об'єкта  
на перехресті просп. Науки – вул. Новгородської

## НВП "СИСТЕМА+СЕРВІС"

Україна, 61046, м. Харків, вул. Автогенна, 10/2  
т./ф. +38 (057) 714 - 35 - 44 т. 717- 40-92

Web: <http://www.komkon.ua>  
e-mail: [info@komkon.ua](mailto:info@komkon.ua)



## Звіт про об'єкт, згенерований програмою "КОМКОН-СПОД"

## Основна інформація:

Об'єкт №59, місцезнаходження: Україна, Харківська область, місто Харків,  
мережна адреса: "0", протокол обміну: "Харків (1 лінія)", магістраль "17", тип КДК "КДК 16-01-НП (Мера 128)"  
дата створення: 27.12.2013; дата запуску: 27.12.2013; технолог.: "прибрали ЖМ".  
"пр. Науки - вул. Мінська (19.07.2021 р.)" (СТАРА)

## Таблиця підключення:

| № | Тип напрямлення | Цвета    | Выходы |
|---|-----------------|----------|--------|
| 1 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 1      |
|   |                 | ЖОВТИЙ   | 2      |
|   |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 3      |
| 2 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 4      |
|   |                 | ЖОВТИЙ   | 5      |
|   |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 6      |
| 3 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 7      |
|   |                 | ЖОВТИЙ   | 8      |
|   |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 9      |
| 4 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 10     |
|   |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 11     |
| 5 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 12     |
|   |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 13     |
| 6 |                 | ЧЕРВОНИЙ | 14     |
|   |                 | ЗЕЛЕНИЙ  | 15     |

## Комбінації тумблерів на КДІП та режими роботи:



Рисунок А.21 – Таблиця підключення на перехресті  
просп. Науки – вул. Мінської



### Розклад роботи контролера:

#### Локальна програма № 1

Режим роботи програми: "Циклічна", тип резервної: "Відсутня"

| Фази у програмі | Тривалість фази (сек): |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 29                     |
| 2               | 24                     |

### Локальні програми роботи контролера

| День тижня | Програма № | Час запуску | Зміщення |
|------------|------------|-------------|----------|
| ПОНЕДІЛОК  | 1          | 23:59       | 0        |
| ВІВТОРОК   | 1          | 23:59       | 0        |
| СЕРЕДА     | 1          | 23:59       | 0        |
| ЧЕТВЕР     | 1          | 23:59       | 0        |
| П'ЯТНИЦЯ   | 1          | 23:59       | 0        |
| СУБОТА     | 1          | 23:59       | 0        |
| НЕДІЛЯ     | 1          | 23:59       | 0        |



Рисунок А.23 – Розклад роботи контролера  
на перехресті просп. Науки – вул. Мінської

Циклограма, сгенерована "КОМКОН-СПОД", для об'єкта: "пр. Науки - вул. Мінська (19.07.21 р.)"  
програма №1.

Позначення: зелений; жовтий; червоний; червоно-жовтий; зелене миготіння.

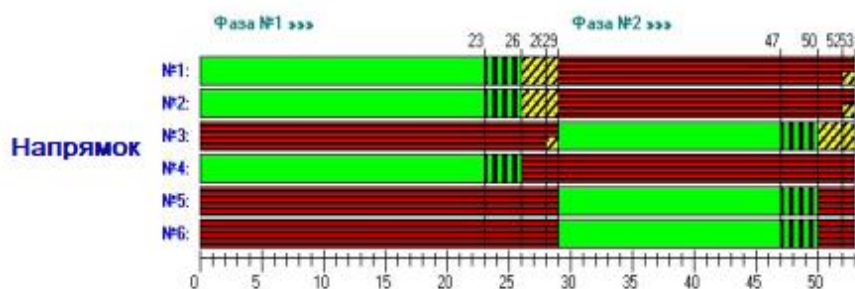


Рисунок А.24 – Циклограма роботи світлофорного об'єкта  
на перехресті просп. Науки – вул. Мінської



Рисунок А.25 – Схема дислокації дорожніх знаків на перехресті просп. Науки – просп. Незалежності



Рисунок А.26 – Схема дислокації дорожніх знаків на перехресті просп. Науки – вул. Культури



Рисунок А.27 – Схема дислокації дорожніх знаків на

### перехресті просп. Науки – вул. Бакуліна



Рисунок А.28 – Схема дислокації дорожніх знаків на перехресті просп. Науки – вул. Космічної



Рисунок А.29 – Схема дислокації дорожніх знаків на перехресті просп. Науки – вул. Новгородської



Рисунок А.30 – Схема дислокації дорожніх знаків на перехресті просп. Науки – вул. Мінської

## ДОДАТОК Б

Результати обстеження інтенсивності руху транспортних потоків на перехрестях  
ділянки просп. Науки, що координується

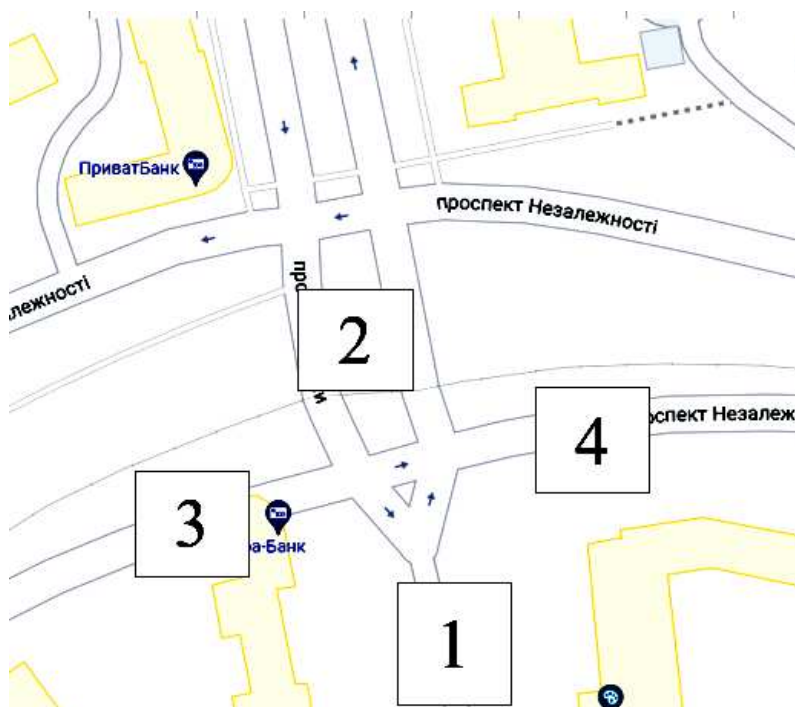


Рисунок Б.1 – Позначення напрямків руху ТЗ на перехресті просп. Науки – просп. Незалежності



Рисунок Б.2 – Позначення напрямків руху ТЗ на перехресті просп. Науки – вул. Культури



Рисунок Б.3 – Позначення напрямків руху ТЗ на перехресті просп. Науки – вул. Бакуліна



Рисунок Б.4 – Позначення напрямків руху ТЗ на перехресті просп. Науки – вул. Космічної

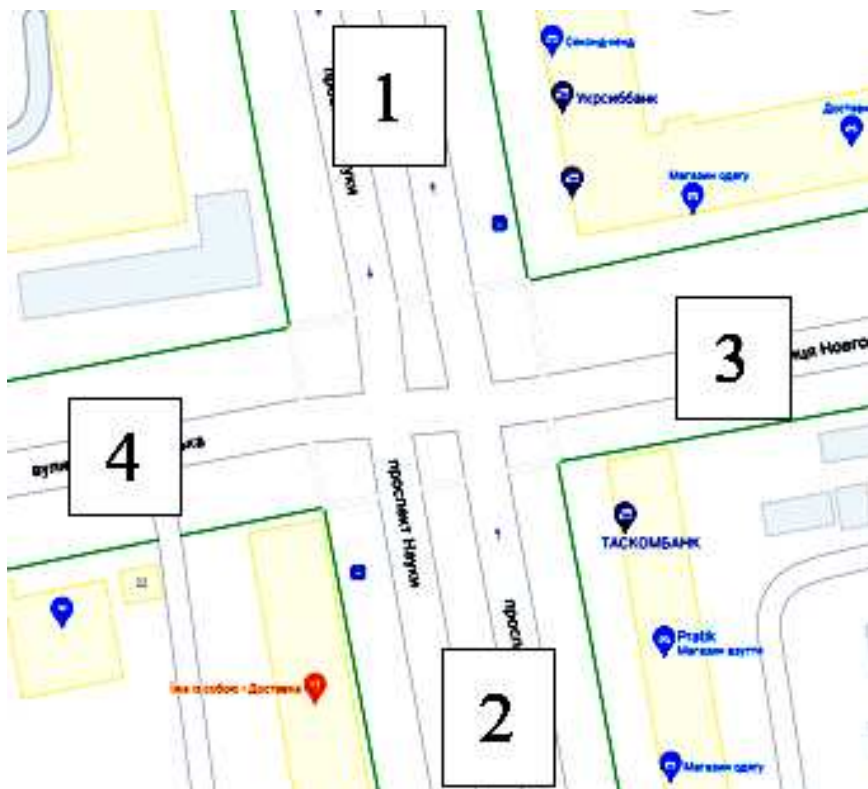


Рисунок Б.5 – Позначення напрямків руху ТЗ на перехресті просп. Науки – вул. Новгородської



Рисунок Б.6 – Позначення напрямків руху ТЗ на перехресті просп. Науки – вул. Мінської

Таблиця Б.1 – Результат обстеження ТП на перехресті просп. Науки та просп. Незалежності

| Період         |       | з–1  |      | з–2  |      |      | з–3  |      |      | Сума |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                |       | в 2  | в 4  | в 1  | в 2  | в 4  | в 1  | в 2  | в 4  |      |
| 10:00          | 10:01 | 2    | –    | 13   | 1    | 10   | 2    | 5    | 14   | 47   |
| 10:01          | 10:02 | 4    | 1    | 12   | 2    | 6    | 1    | 5    | 7    | 38   |
| 10:02          | 10:03 | 4    | 1    | 4    | 1    | 7    | –    | 5    | 15   | 37   |
| 10:03          | 10:04 | 6    | 1    | 6    | 1    | 6    | –    | 7    | 18   | 45   |
| 10:04          | 10:05 | 1    | –    | 5    | –    | 13   | 1    | 9    | 13   | 42   |
| 10:05          | 10:06 | 5    | 1    | 4    | –    | 2    | 1    | 11   | 13   | 37   |
| 10:06          | 10:07 | 5    | –    | 10   | 1    | 3    | –    | 5    | 15   | 39   |
| 10:07          | 10:08 | 1    | 1    | 2    | –    | 8    | –    | 3    | 13   | 28   |
| 10:08          | 10:09 | 3    | 1    | 5    | –    | 7    | 2    | 4    | 12   | 34   |
| 10:09          | 10:10 | 6    | 1    | 15   | 1    | 2    | –    | 6    | 7    | 38   |
| Сума           |       | 37   | 7    | 76   | 7    | 64   | 7    | 60   | 127  | 385  |
| Від–вузла      |       | 83   |      | 104  |      |      | 0    |      |      | 187  |
| К–вузлу        |       | 44   |      | 147  |      |      | 194  |      |      | 385  |
| Розподіл–поток |       | 0,84 | 0,16 | 0,52 | 0,05 | 0,44 | 0,04 | 0,31 | 0,65 |      |

Таблиця Б.2 – Результат обстеження ТП на перехресті просп. Науки та вул. Культури

| Період          |       | з 1  |      |      |      | з 2  |      |      |      | з 3 |     |     |     | з 4  |      |      |     | Сума |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|
|                 |       | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1 | в 2 | в 3 | в 4 | в 1  | в 2  | в 3  | в 4 |      |
| 08:00           | 08:01 | –    | 9    | 1    | 1    | 8    | –    | 3    | –    | –   | –   | –   | –   | –    | 1    | 2    | –   | 25   |
| 08:01           | 08:02 | 1    | 15   | 1    | 3    | –    | 2    | –    | 1    | –   | –   | –   | –   | 1    | –    | 1    | –   | 25   |
| 08:02           | 08:03 | 1    | 4    | –    | –    | 7    | 3    | –    | 1    | –   | –   | –   | –   | 1    | –    | 1    | –   | 18   |
| 08:03           | 08:04 | 1    | 17   | 1    | 2    | 12   | 1    | 1    | –    | –   | –   | –   | –   | –    | –    | 3    | –   | 38   |
| 08:04           | 08:05 | 3    | 13   | –    | –    | 8    | 1    | 3    | 1    | –   | –   | –   | –   | –    | –    | –    | –   | 29   |
| 08:05           | 08:06 | 1    | 10   | 2    | 3    | 17   | –    | 5    | –    | –   | –   | –   | –   | –    | –    | 1    | –   | 39   |
| 08:06           | 08:07 | –    | 14   | –    | –    | 10   | 1    | 2    | –    | –   | –   | –   | –   | –    | –    | 1    | –   | 28   |
| 08:07           | 08:08 | 1    | –    | –    | 4    | 2    | 2    | 2    | –    | –   | –   | –   | –   | 1    | –    | 4    | –   | 16   |
| Сума            |       | 8    | 82   | 5    | 13   | 64   | 10   | 16   | 3    | 0   | 0   | 0   | 0   | 3    | 1    | 13   | 0   | 218  |
| Від вузла       |       | 67   |      |      |      | 93   |      |      |      | 34  |     |     |     | 16   |      |      |     | 210  |
| К вузлу         |       | 108  |      |      |      | 93   |      |      |      | 0   |     |     |     | 17   |      |      |     | 218  |
| Розподіл потоку |       | 0,07 | 0,76 | 0,05 | 0,12 | 0,69 | 0,11 | 0,17 | 0,03 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,18 | 0,06 | 0,76 | 0   |      |

Таблиця Б.3 – Результат обстеження ТП на перехресті просп. Науки та вул. Бакуліна

| Період          |       | з 1  |      |      |      | з 2  |      |      |      | з 3  |      |     |      | з 4  |      |      |     | Сума |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|
|                 |       | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3 | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4 |      |
| 08:30           | 08:31 | 1    | 14   | 1    | 2    | 4    | 4    | 1    | –    | –    | –    | –   | –    | –    | –    | –    | –   | 27   |
| 08:31           | 08:32 | –    | 12   | –    | –    | 7    | 2    | 1    | 2    | 2    | 4    | –   | 3    | 2    | –    | 2    | –   | 37   |
| 08:32           | 08:33 | 3    | 22   | 1    | –    | 11   | –    | 1    | –    | 1    | 1    | –   | 2    | –    | –    | 1    | –   | 43   |
| 08:33           | 08:34 | –    | 10   | –    | –    | 5    | –    | –    | 1    | 2    | 3    | –   | 3    | 3    | –    | 4    | –   | 31   |
| 08:34           | 08:35 | 3    | 10   | –    | 1    | 2    | 1    | –    | 1    | 1    | 4    | –   | –    | –    | 2    | 1    | –   | 26   |
| 08:35           | 08:36 | 1    | 20   | 3    | –    | 17   | 2    | –    | 1    | –    | –    | –   | –    | –    | –    | 3    | –   | 47   |
| 08:36           | 08:37 | –    | 18   | –    | –    | 12   | –    | 2    | 1    | 1    | 1    | –   | 2    | –    | 2    | –    | –   | 39   |
| 08:37           | 08:38 | 1    | 20   | 1    | –    | 16   | –    | 1    | –    | –    | 5    | –   | 1    | 1    | 2    | –    | –   | 48   |
| 08:38           | 08:39 | 3    | 22   | –    | –    | 9    | 3    | –    | –    | –    | 3    | –   | 2    | 1    | 4    | 1    | –   | 48   |
| Сума            |       | 12   | 148  | 6    | 3    | 83   | 12   | 6    | 6    | 7    | 21   | 0   | 13   | 7    | 10   | 12   | 0   | 346  |
| Від вузла       |       | 97   |      |      |      | 191  |      |      |      | 24   |      |     |      | 22   |      |      |     | 334  |
| К вузлу         |       | 169  |      |      |      | 107  |      |      |      | 41   |      |     |      | 29   |      |      |     | 346  |
| Розподіл потоку |       | 0,07 | 0,88 | 0,04 | 0,02 | 0,78 | 0,11 | 0,06 | 0,06 | 0,17 | 0,51 | 0   | 0,32 | 0,24 | 0,34 | 0,41 | 0   |      |

Таблиця Б.4 – Результат обстеження ТП на перехресті просп. Науки та вул. Космічна

| Період          |       | з 1  |      |      |      | з 2  |      |      |      | з 3  |      |     |      | з 4  |      |      |     | Сума |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|
|                 |       | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3 | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4 |      |
| 08:40           | 08:41 | –    | 18   | 1    | –    | 22   | –    | 12   | 2    | –    | 1    | –   | 1    | 2    | 2    | 1    | –   | 62   |
| 08:41           | 08:42 | 2    | 19   | –    | 1    | 21   | 2    | 19   | 2    | 1    | 6    |     | 3    | –    | –    | –    | –   | 76   |
| 08:42           | 08:43 | –    | 12   | –    | –    | 27   | –    | 4    | 2    | 1    | 6    | –   | 1    | 2    | 3    | 2    | –   | 60   |
| 08:43           | 08:44 | 1    | 17   | –    | –    | 24   | –    | 5    | –    | –    | 4    | –   | 1    | 1    | 4    | 6    | –   | 63   |
| 08:44           | 08:45 | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 8    | –    | –    | 7    | –   | 2    | 2    | 2    | 4    | –   | 25   |
| 08:45           | 08:46 | 1    | 9    | 1    | –    | 25   | –    | 3    | 1    | –    | 3    | –   | 1    | –    | –    | 1    | –   | 45   |
| 08:46           | 08:47 | –    | 13   | –    | –    | 25   | –    | 6    | 1    | –    | 6    | –   | –    | –    | 1    | –    | –   | 52   |
| 08:47           | 08:48 | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 1    | 6    | –   | –    | 4    | 3    | 1    | –   | 15   |
| Сума            |       | 4    | 88   | 2    | 1    | 144  | 2    | 57   | 8    | 3    | 39   | 0   | 9    | 11   | 15   | 15   | 0   | 398  |
| Від вузла       |       | 158  |      |      |      | 144  |      |      |      | 74   |      |     |      | 18   |      |      |     | 394  |
| К вузлу         |       | 95   |      |      |      | 211  |      |      |      | 51   |      |     |      | 41   |      |      |     | 398  |
| Розподіл потоку |       | 0,04 | 0,93 | 0,02 | 0,01 | 0,68 | 0,01 | 0,27 | 0,04 | 0,06 | 0,76 | 0   | 0,18 | 0,27 | 0,37 | 0,37 | 0   |      |

Таблиця Б.5 – Результат обстеження ТП на перехресті просп. Науки та вул. Новгородська

| Період          |       | з 1  |      |      |      | з 2  |      |      |      | з 3  |      |     |      | з 4  |      |      |     | Сума |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|
|                 |       | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4  | в 1  | в 2  | в 3 | в 4  | в 1  | в 2  | в 3  | в 4 |      |
| 09:20           | 09:21 | 1    | 26   | 8    | 4    | 13   | –    | 3    | 4    | 5    | –    | –   | –    | –    | 1    | 2    | –   | 67   |
| 09:21           | 09:22 | –    | 23   | 9    | 2    | 19   | –    | 4    | 1    | 6    | 5    | –   | 9    | 1    | 2    | 7    | –   | 88   |
| 09:22           | 09:23 | –    | 33   | –    | 2    | 20   | 2    | 2    | 1    | 6    | 3    | –   | 6    | 2    | 3    | 8    | –   | 88   |
| 09:23           | 09:24 | –    | –    | 9    | 1    | –    | –    | 3    | –    | 3    | 5    | –   | 7    | 3    | 1    | 2    | –   | 34   |
| 09:24           | 09:25 | 1    | 20   | 9    | 1    | 18   | –    | 2    | 5    | 5    | 5    | –   | 4    | 1    | 5    | 5    | –   | 81   |
| 09:25           | 09:26 | 1    | 27   | 6    | 2    | 10   | –    | 6    | 2    | 5    | 6    | –   | 4    | –    | –    | 1    | –   | 70   |
| 09:26           | 09:27 | –    | 28   | 8    | 1    | 15   | –    | 4    | 2    | 8    | –    | –   | –    | –    | 3    | –    | –   | 69   |
| 09:27           | 09:28 | 1    | 30   | 8    | 4    | 12   | –    | 4    | 4    | 6    | 4    | –   | 4    | 3    | 3    | 10   | –   | 93   |
| Сума            |       | 4    | 187  | 57   | 17   | 107  | 2    | 28   | 19   | 44   | 28   | 0   | 34   | 10   | 18   | 35   | 0   | 590  |
| Від вузла       |       | 161  |      |      |      | 235  |      |      |      | 120  |      |     |      | 70   |      |      |     | 586  |
| К вузлу         |       | 265  |      |      |      | 156  |      |      |      | 106  |      |     |      | 63   |      |      |     | 590  |
| Розподіл потоку |       | 0,02 | 0,71 | 0,22 | 0,06 | 0,69 | 0,01 | 0,18 | 0,12 | 0,42 | 0,26 | 0   | 0,32 | 0,16 | 0,29 | 0,56 | 0   |      |

Таблиця Б.6 – Результат обстеження ТП на перехресті просп. Науки та вул. Мінська

| Період          |       | з 1  |      |      |     | з 2  |      |      |     | з 3  |      |     |     | з 4 |     |     |     | Сума |
|-----------------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                 |       | в 1  | в 2  | в 3  | в 4 | в 1  | в 2  | в 3  | в 4 | в 1  | в 2  | в 3 | в 4 | в 1 | в 2 | в 3 | в 4 |      |
| 09:20           | 09:21 | –    | 28   | –    | –   | 15   | –    | 2    | –   | –    | –    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 45   |
| 09:21           | 09:22 | –    | 32   | 1    | –   | 11   | –    | 1    | –   | 1    | 1    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 47   |
| 09:22           | 09:23 | –    | 22   | 2    | –   | 23   | 1    | 1    | –   | 1    | –    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 50   |
| 09:23           | 09:24 | 2    | 21   | 2    | –   | 23   | –    | 1    | –   | –    | –    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 49   |
| 09:24           | 09:25 | –    | 28   | 1    | –   | 8    | –    | –    | –   | 1    | 1    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 39   |
| 09:25           | 09:26 | 1    | 22   | 1    | –   | 17   | 1    | –    | –   | –    | –    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 42   |
| 09:26           | 09:27 | –    | 28   | 1    | –   | 30   | 1    | 1    | –   | –    | –    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 61   |
| 09:27           | 09:28 | –    | 26   | 2    | –   | 16   | –    | –    | –   | –    | 2    | –   | –   | –   | –   | –   | –   | 46   |
| Сума            |       | 3    | 207  | 10   | 0   | 143  | 3    | 6    | 0   | 3    | 4    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 379  |
| Від вузла       |       | 146  |      |      |     | 214  |      |      |     | 16   |      |     |     | 0   |     |     |     | 376  |
| К вузлу         |       | 220  |      |      |     | 152  |      |      |     | 7    |      |     |     | 0   |     |     |     | 379  |
| Розподіл потоку |       | 0,01 | 0,94 | 0,05 | 0   | 0,94 | 0,02 | 0,04 | 0   | 0,43 | 0,57 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |      |

## ДОДАТОК В

Параметри роботи в плані координації світлофорних об'єктів, розташованих на ділянці просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської

Таблиця В.1 – Постійні параметри побудови плану координації в програмі «Wave»

| № з/п | Найменування параметру                                                                 | Значення |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1.    | Обмеження на максимальний рівень загрузки за напрямком руху пачки ЗХ                   | 0,6      |
| 2.    | Обмеження на максимальний рівень загрузки для лівого повороту з напрямку руху пачки ЗХ | 0,75     |
| 3.    | Обмеження на максимальний рівень загрузки для другорядних напрямків руху               | 0,813    |
| 4.    | Швидкість руху пішохода, км/год                                                        | 4,7      |
| 5.    | Мінімальна тривалість дозвільного сигналу для другорядних напрямків і ЛП, с            | 14       |
| 6.    | Задана швидкість руху ЗХ, км/год                                                       | 50       |
| 7.    | Тривалість проміжного такту перед дозвільною фазою для ЗХ, с                           | 3        |
| 8.    | Тривалість проміжного такту перед дозвільною фазою для лівоповоротних автомобілів, с   | 1        |
| 9.    | Тривалість проміжного такту перед дозвільною фазою для другорядних напрямків руху, с   | 3        |
| 10.   | Інтервал роз'їзду ТЗ для автомобілів з ЗХ, с                                           | 2,25     |
| 11.   | Інтервал роз'їзду ТЗ для лівоповоротних автомобілів, с                                 | 2,25     |
| 12.   | Інтервал роз'їзду ТЗ для другорядних автомобілів, с                                    | 2        |
| 13.   | Інтервал роз'їзду ТЗ для додаткових автомобілів, с                                     | 2,25     |
| 14.   | Час на старт та розгін додаткових автомобілів, с                                       | 4        |
| 15.   | Довжина пачки на одну смугу руху в зворотному напрямку, од.                            | 9        |
| 16.   | Мінімальна тривалість дозвільного сигналу для другорядних напрямків руху, с            | 20       |

### Пофазний роз'їзд на перехресті просп. Науки - просп. Незалежності

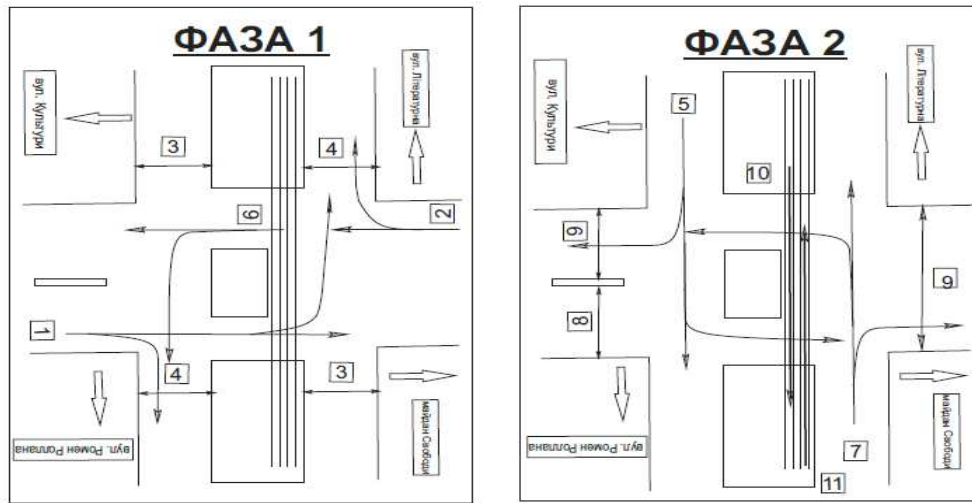


Рисунок В.1 – Схема пофазного роз'їзду перехрестя  
просп. Науки з просп. Незалежності

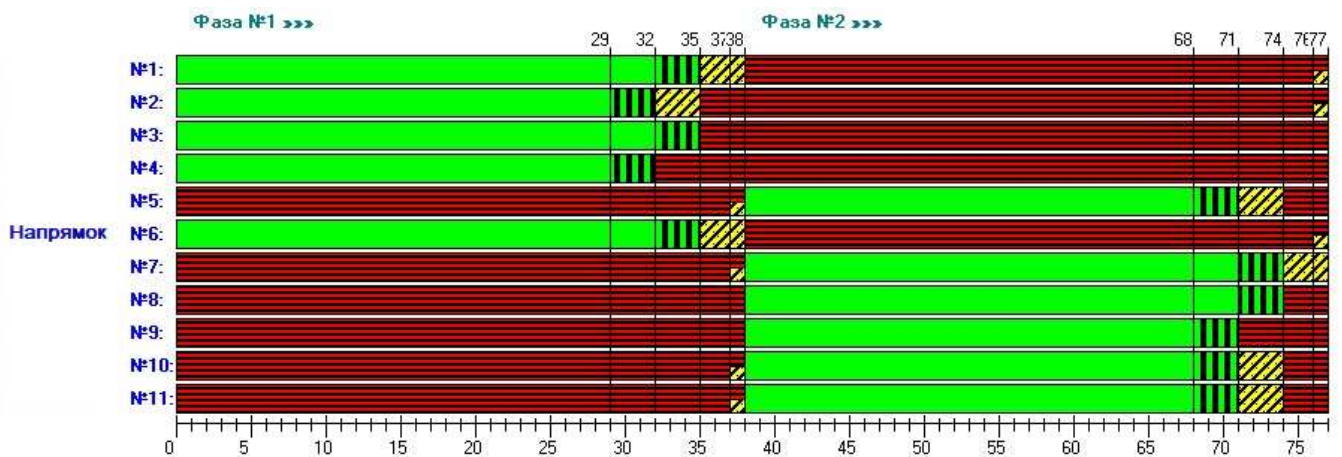


Рисунок В.2 – Циклограма світлофорного об'єкта на перехресті  
просп. Науки з просп. Незалежності

### Пофазний роз'їзд на перехресті просп. Науки - вул. Культури

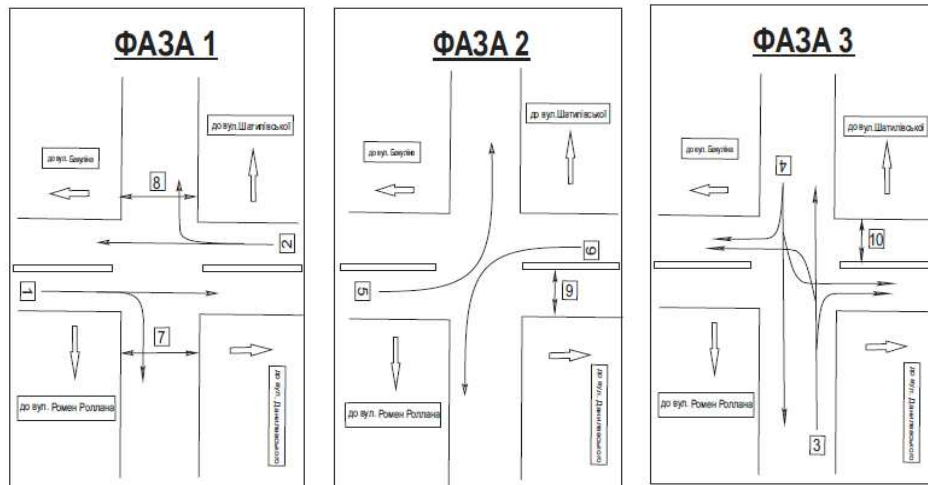


Рисунок В.3 – Схема пофазного роз'їзду перехрестя  
просп. Науки з вул. Культури

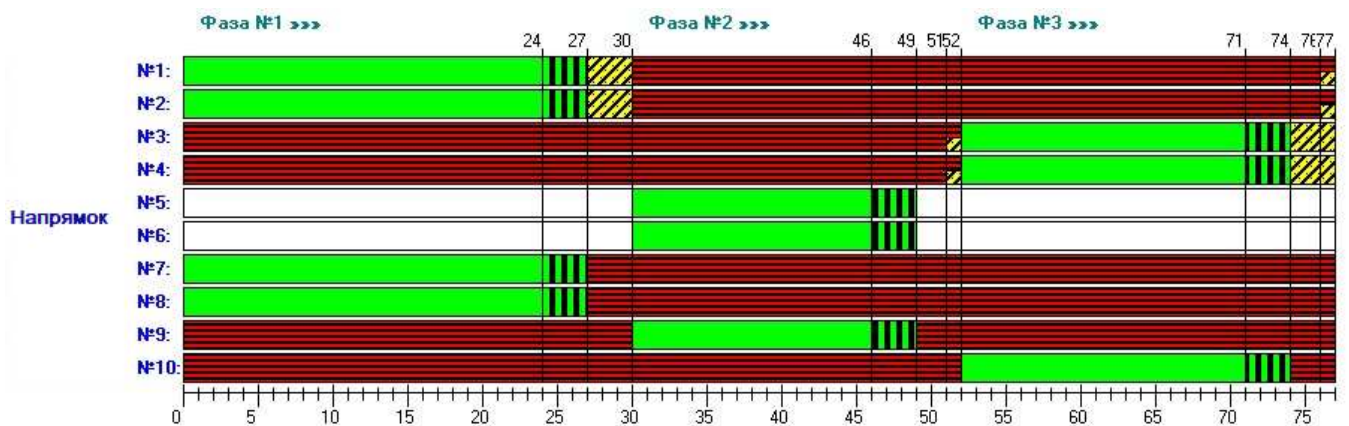


Рисунок В.4 – Циклограма світлофорного об'єкта на перехресті  
просп. Науки з вул. Культури

Пофазний роз'їзд на перехресті  
просп. Науки - вул. Бакуліна

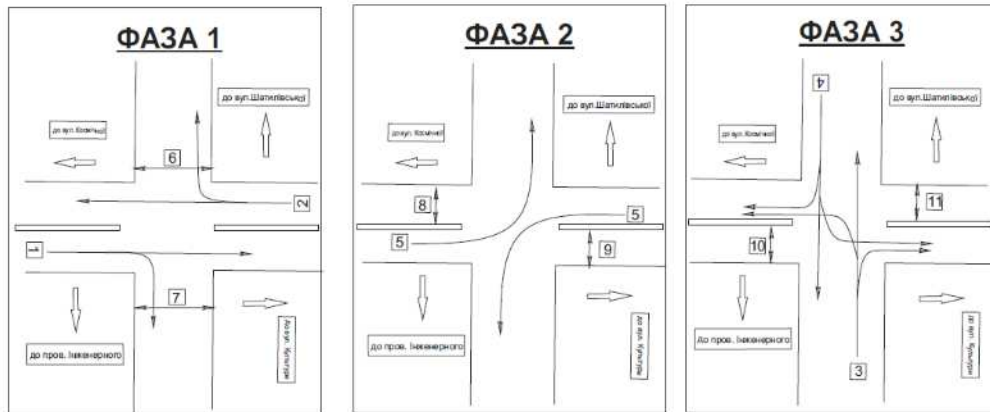


Рисунок В.5 – Схема пофазного роз'їзду перехрестя  
просп. Науки з вул. Бакуліна

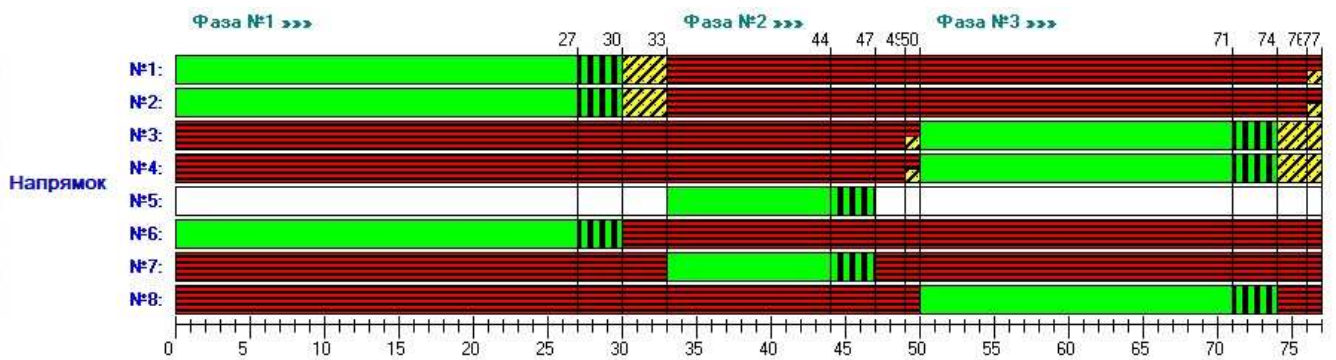


Рисунок В.6 – Циклограма світлофорного об'єкта на перехресті  
просп. Науки з вул. Бакуліна

### Пофазний роз'їзд на перехресті просп. Науки - вул. Космічна

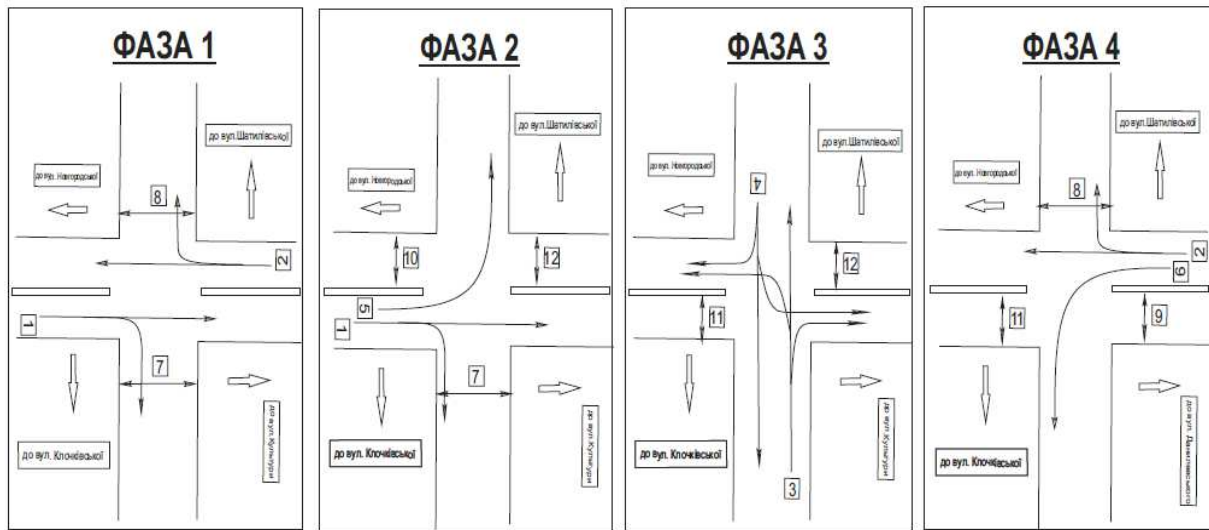


Рисунок В.7 – Схема пофазного роз'їзду перехрестя  
просп. Науки з вул. Космічною

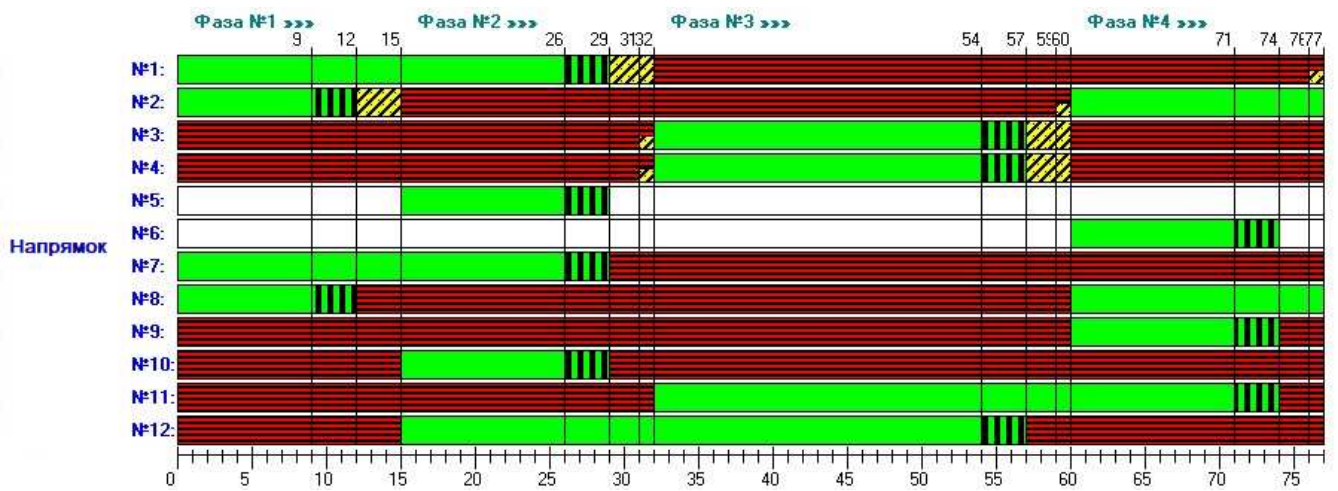


Рисунок В.8 – Циклограма світлофорного об'єкта на перехресті  
просп. Науки з вул. Космічною

### Пофазний роз'їзд на перехресті просп. Науки - вул. Новгородська

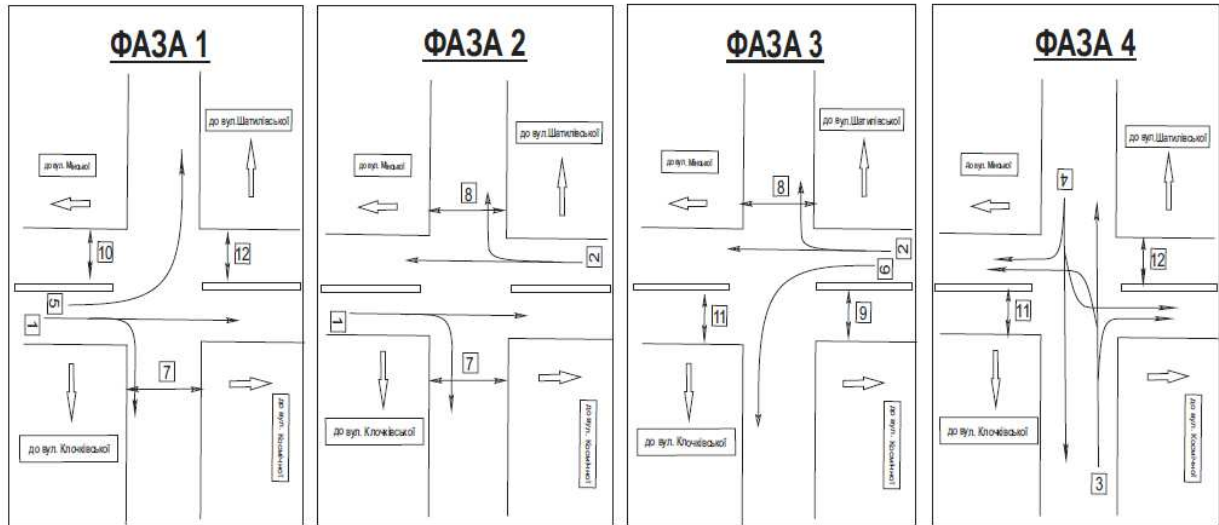


Рисунок В.9 – Схема пофазного роз'їзду перехрестя  
просп. Науки з вул. Новгородською

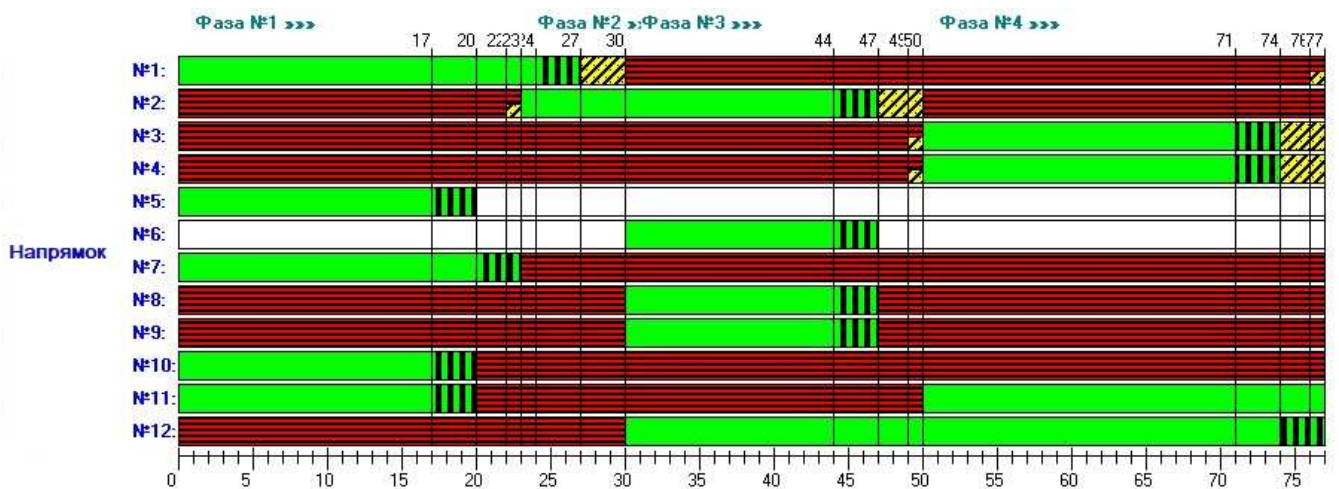


Рисунок В.10 – Циклограма світлофорного об'єкта на перехресті  
просп. Науки з вул. Новгородською

### Пофазний роз'їзд на перехресті просп. Науки - вул. Мінська

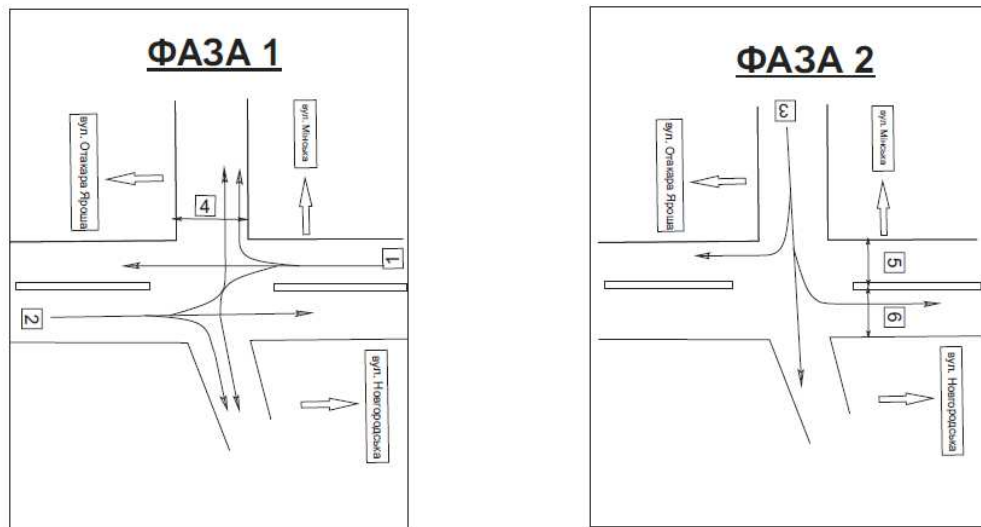


Рисунок В.11 – Схема пофазного роз'їзду перехрестя  
просп. Науки з вул. Мінською

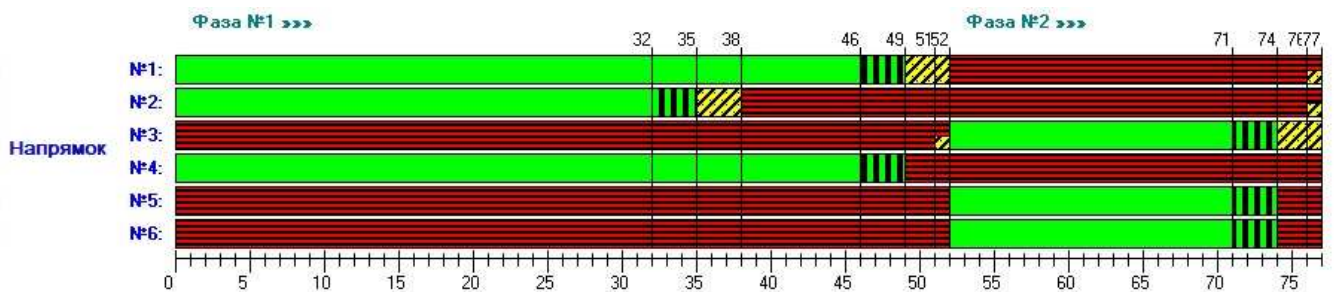


Рисунок В.12 – Циклограма світлофорного об'єкта на перехресті  
просп. Науки з вул. Мінською

## ДОДАТОК Г

Результати поїздок плаваючого автомобілю по ділянці просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінської до та після впровадження плану координації

Таблиця Г.1 – Час поїздок та кількість зупинок при русі у прямому напрямку ЗХ від вул. Мінської до просп. Незалежності

| Дата поїздки | Час поїздки, хв:сек. |                   |                       | Кількість зупинок, од. |
|--------------|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
|              | Загальний            | У складі пачки ЗХ | З врахуванням зупинок |                        |
| 28.04.21     | 8:12                 | 7:32              | 10:58                 | 9                      |
| 12.05.21     | 7:00                 | 5:20              | 9:27                  | 8                      |
| 14.05.21     | 9:35                 | 5:39              | 12:39                 | 10                     |
| 17.05.21     | 10:10                | 8:32              | 12:56                 | 9                      |
| 18.05.21     | 11:47                | 8:51              | 15:28                 | 12                     |
| 19.05.21     | 10:38                | 8:53              | 13:42                 | 10                     |
| 31.05.21     | 8:04                 | 6:09              | 10:31                 | 8                      |
| 01.09.21     | 11:41                | 8:45              | 14:45                 | 10                     |
| 03.09.21     | 11:46                | 8:45              | 15:09                 | 11                     |
| 06.09.21     | 9:49                 | 6:32              | 12:35                 | 9                      |
| 07.09.21     | 5:29                 | 5:29              | 7:01                  | 5                      |
| 08.09.21     | 6:48                 | 5:10              | 8:38                  | 6                      |
| 10.09.21     | 8:26                 | 5:43              | 10:35                 | 7                      |
| 15.09.21     | 8:00                 | 5:12              | 10:09                 | 7                      |
| 20.09.21     | 7:29                 | 6:29              | 9:19                  | 6                      |
| 22.09.21     | 11:19                | 7:38              | 14:42                 | 11                     |
| 23.09.21     | 9:56                 | 7:08              | 13:00                 | 10                     |
| 24.09.21     | 7:08                 | 5:36              | 9:17                  | 7                      |
| 26.12.21     | 2:26                 | 2:26              | 2:26                  | 0                      |
| 28.12.21     | 5:15                 | 4:53              | 5:51                  | 2                      |
| 11.01.22     | 4:31                 | 3:52              | 5:26                  | 3                      |
| 14.01.22     | 5:10                 | 3:47              | 6:05                  | 3                      |
| 31.01.22     | 5:43                 | 3:32              | 6:56                  | 4                      |
| 02.02.22     | 4:26                 | 3:55              | 5:21                  | 3                      |
| 03.02.22     | 3:15                 | 3:15              | 3:33                  | 1                      |
| 04.02.22     | 4:23                 | 3:55              | 5:18                  | 3                      |
| 06.02.22     | 2:17                 | 2:17              | 2:35                  | 1                      |
| 11.02.22     | 3:52                 | 3:39              | 4:28                  | 2                      |

Таблиця Г.2 – Час поїздки та кількість зупинок при русі у зворотному напрямку ЗХ від просп. Незалежності до вул. Мінської

| Дата поїздки | Час поїздки, хв:сек. |                   |                       | Кількість зупинок, од. |
|--------------|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
|              | Загальний            | У складі пачки ЗХ | З врахуванням зупинок |                        |
| 12.05.21     | 10:55                | 9:13              | 13:59                 | 10                     |
| 14.05.21     | 10:05                | 8:42              | 13:09                 | 10                     |
| 17.05.21     | 7:30                 | 7:08              | 9:39                  | 7                      |
| 01.06.21     | 10:40                | 9:17              | 13:26                 | 9                      |
| 02.06.21     | 5:09                 | 4:59              | 6:59                  | 6                      |
| 03.06.21     | 9:10                 | 8:08              | 11:56                 | 9                      |
| 04.06.21     | 10:07                | 8:07              | 13:11                 | 10                     |
| 01.09.21     | 6:32                 | 5:16              | 8:22                  | 6                      |
| 02.09.21     | 9:26                 | 8:44              | 12:12                 | 9                      |
| 07.09.21     | 7:31                 | 6:57              | 9:58                  | 8                      |
| 08.09.21     | 9:28                 | 9:16              | 12:14                 | 9                      |
| 09.09.21     | 6:36                 | 6:18              | 8:26                  | 6                      |
| 13.09.21     | 8:53                 | 8:01              | 11:39                 | 9                      |
| 24.09.21     | 11:32                | 11:21             | 14:36                 | 10                     |
| 23.12.21     | 4:42                 | 4:23              | 5:37                  | 3                      |
| 24.12.21     | 5:20                 | 5:20              | 6:15                  | 3                      |
| 11.01.22     | 4:36                 | 4:36              | 5:12                  | 2                      |
| 17.01.22     | 4:52                 | 4:36              | 5:47                  | 3                      |
| 31.01.22     | 3:52                 | 3:52              | 4:10                  | 1                      |
| 03.02.22     | 4:36                 | 4:23              | 5:31                  | 3                      |
| 08.02.22     | 5:24                 | 5:24              | 6:19                  | 3                      |
| 10.02.22     | 4:38                 | 4:38              | 5:14                  | 2                      |

## ДОДАТОК Д

## Акти впровадження результатів дослідження



УКРАЇНА

ХАРКІВСЬКА МІСЬКА РАДА ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ  
ДЕПАРТАМЕНТ БУДІВНИЦТВА ТА ШЛЯХОВОГО ГОСПОДАРСТВА**КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
“ХАРКІВ-СИГНАЛ”**61012, м. Харків, вул. Чоботарська, 6, тел./факс (057) 731-59-54, тел. (057) 731-27-84  
E-mail: kh-signal@ukr.net Код ЄДРПОУ 35586054

від 17.02.2023 № 58

**АКТ О ВПРОВАДЖЕННІ****Найменування пропозиції о впровадженні:**

В рамках дисертаційної роботи за темою: "Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях" було розроблено та реалізовано план координації світлофорних об'єктів по просп. Науки на ділянці від просп. Незалежності до вул. Мінської в м. Харкові.

**Ким запропоновано:**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних систем і логістики, автор – Шевченко В.В.

**Де, коли, для яких цілей впроваджено**

Вказані схеми координації світлофорних об'єктів по просп. Науки на ділянці від просп. Незалежності до вул. Мінської в м. Харкові було впроваджено в грудні 2021 року для покращення пропускної спроможності та зменшення часу у дорозі її учасників по просп. Науки.

**Напрямки, результати, ефективність впровадження**

Поїздки плаваючого автомобіля до та після впровадження плану координації показали, що час поїздки у обох напрямках руху «зеленої хвилі» скоротився практично вдвічі, а кількість зупинок при цьому скоротилася більш ніж на 70 %

**Висновки, зауваження, пропозиції.**

Впровадження дозволяє зробити висновок про високу результативність магістральної координації роботи світлофорів та пріоритетність цього напрямку розвитку систем локальних світлофорів у Харкові.

Начальник КП «ХАРКІВ-СИГНАЛ»



А.В. КУРЛОВ



## ТОВ «КОМКОН ТРАФІК»

UA 68 322313 0000026004000036787  
 АТ «УКРЕКСІМБАНК»  
 UA903515330000026006052242011  
 ГРУ АТ КБ «ПРИВАТБАНК»  
 Код ЄДРПОУ 41138650

вул. Автогенна, 10/2,  
 м. Харків, 61046  
 Тел.: (057) 717-40-92  
 Факс: (057) 714-35-44

### АКТ О ВПРОВАДЖЕННІ

#### **Найменування пропозиції о впровадженні:**

В рамках дисертаційної роботи за темою: "Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях" були переобладнані та переналаштовані діючі контролери світлофорних об'єктів по просп. Науки на ділянці від просп. Незалежності до вул. Мінської в м. Харкові.

#### **Ким запропоновано:**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних систем і логістики, автор – Шевченко В.В.

#### **Де, коли, для яких цілей впроваджено**

З 15 по 22 грудня 2021 року були впроваджені нові параметри роботи у синхронізованому режимі світлофорів КОМКОН по просп. Науки на ділянці від вул. Мінської до просп. Незалежності задля забезпечення координованого руху транспортних потоків на даній ділянці.

#### **Напрямки, результати, ефективність впровадження**

Тривалість світлофорних циклів у плані координації склала 77 секунд, відповідно до чого була змінена тривалість основних тактів. Також були змінені послідовності основних тактів на окремих світлофорах та забезпечена синхронна робота контролерів за допомогою їх дообладнання GPS синхронізаторами.

За даними навігаційного сервісу TomTom час поїздки автомобілів вздовж координованої ділянки мережі в лютому 2022 року скоротився на 31 % у порівнянні з лютим 2021 року в напрямку руху від вул. Мінської до просп. Незалежності та на 25 % – у зустрічному напрямку.

#### **Висновки, зауваження, пропозиції.**

Дані навігаційного сервісу TomTom про фактичний час поїздки вздовж координованої ділянки підтверджують ефективність координації роботи світлофорів за допомогою GPS синхронізаторів та свідчать на користь подальшого розповсюдження цієї практики в містах України.

Директор  
 ТОВ «КОМКОН ТРАФІК»



Стаханов С.І.

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспортних систем  
Кафедра транспортних систем і логістики



Перший проректор  
проф. С.Я. Батракова  
16 лютого 2023 р.

### АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи Шевченко Володимира Вадимовича «Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях», яка представляється на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 27 – «Транспорт» за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)»**

Комісією у складі завідувача кафедри транспортних систем і логістики д.т.н., проф. Горбачова П.Ф., заступника завідувача кафедри транспортних систем і логістики к.т.н., доц. Любого Є.В., доцента кафедри транспортних систем і логістики к.т.н., доц. Свічинського С.В., складено акт про те, що результати дисертації Шевченко Володимира Вадимовича, у вигляді методу координованого управління рухом транспортних засобів на міських магістралях, впроваджено в навчальний процес кафедри транспортних систем і логістики при викладанні дисципліни «Моделювання транспортних систем» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті для студентів, які навчаються за спеціальністю 275.03 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті).

Зав. каф. ТСЛ,  
д.т.н., професор

П.Ф. Горбачов

заст. зав. каф. ТСЛ,  
к.т.н. доцент

Є.В. Любий

к.т.н. доцент

С.В. Свічинський

## ДОДАТОК Е

### Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Горбачов ПФ, Макарічев ОВ, Шевченко ВВ. Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць з трифазним циклом регулювання. Автомобільний транспорт. 2019;44:30-9. doi: [10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30](https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30)
2. Горбачов ПФ, Шевченко ВВ, Свічинський СВ. Визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до міської магістралі з координованим керуванням. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020;90:144-54. doi: [0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144](https://doi.org/0.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144)
3. Горбачов ПФ, Макарічев ОВ, Шевченко ВВ. Імовірність виникнення неповної пачки автомобілів при координованому керуванні на міській магістралі. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2021;92(1):214-25. doi: [10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214](https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214)
4. Шевченко ВВ. Обґрунтування ефективного напрямку розвитку систем світлофорного управління з жорсткими циклами регулювання. Вісник машинобудування та транспорту. 2022;2(16):110-9. doi: [10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119](https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119)
5. Шевченко ВВ. Оцінка ефективності плану координації світлофорів на просп. Науки в м. Харкові. Комунальне господарство міст. 2022;6:206-15. doi: [10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-206-215)
6. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі. Патент України на винахід № 122838. 2021 Січ 06.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Шевченко ВВ. Шлях до скорочення затримок транспортних засобів на регульованому перехресті міських вулиць. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. on-line конф. аспірант., мол. уч. та студ. до Дня науки; 2018 Трав 16-18; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2018. с. 77.
8. Горбачов ПФ, Ву Дик Мінь, Шевченко ВВ. Новий підхід до побудови жорстких світлофорних циклів для перехресть міських вулиць. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. on-line конф. аспірант., мол. уч. та студ. до Дня науки; 2019 Трав 15-17; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2018. с. 202-3.
9. Горбачов ПФ, Шевченко ВВ. Підхід до побудови плану координації для міської магістралі. В: Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. освіти і мол. уч, присвячена Дню науки,; 2020 Трав 11-15; Житомир. Житомир: ДУ «Житомирська політехніка»; 2020. с. 20.
10. Шевченко ВВ. Координація роботи локальних світлофорів і розвиток систем управління дорожнім рухом. В: Матеріали V Всеукр. наук.-теор. on-line конф. Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання; 2023 Бер 23-24; Львів. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2023. с. 47-9.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Горбачов ПФ, Ву Дик Мінь, Шевченко ВВ. Новий підхід до побудови жорстких світлофорних циклів для перехресть міських вулиць. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір України № 88689. 2019 Трав 20.
12. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі. Патент України на корисну модель № 137438. 2019 Жов 25.
13. Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, винахідники; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Денисенко ОВ, Шевченко ВВ, патентовласники. Спосіб координованого управління руху транспортних засобів по магістралі міста. Патент України на корисну модель № 137517. 2019 Жов 25.

14. Горбачов ПФ, Тесленко МГ, Шевченко ВВ. Комп'ютерна програма «Програма для розрахунків параметрів координованого керування світлофорами на міській магістралі» («Wave»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України №116545. 2023 Лют 23.

Матеріали й результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

- 83-87-й науково-технічних та науково-методичних конференціях ХНАДУ (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), 2019-2023 рр.);
- I міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт та інфраструктура» (м. Київ, НУБіП України, 2018 рік);
- Всеукраїнській науково-практичній Інтернет конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених присвяченій дню науки, (м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка», 2018-2020 роки);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», (м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 2018 рік);
- Науково-практичній on-line конференція з нагоди 90-річчя ДП «ДержавтотрансНДІпроект» «Наукове забезпечення розвитку автомобільного транспорту та його інтеграції до європейської транспортної системи», (м. Київ, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2020 рік);
- V Всеукраїнській науково-теоретичній on-line конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання», Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 2023 рік.