

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 можливість 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 перехрест' 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-

recommendations 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 koordynovanykh 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 gospodarstvo 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 politekhnikha», 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 politekhnikha», 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 politekhnikha»; 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 politekhnikha», 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.