

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.051;656.11:656.13

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.05>

АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ У МІСТАХ

Л.С. Абрамова¹, А.В. Рогов², Г.Г. Птиця³

¹д-р техн. наук, професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1182-9618

²канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій
та математичного моделювання,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
ORCID ID: 0009-0009-3972-4931

³канд. техн. наук, доцент кафедри організації та безпеки дорожнього руху,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5061-0144

Анотація

Вступ. Засоби управління дорожнім рухом стають важливою проблемою для великих міст через постійне зростання кількості транспортних засобів. Оскільки транспортна мережа не змінюється, то, як наслідок, збільшується кількість ситуацій із заторами на дорозі, що мають негативні ознаки зменшення надійності пересування й показників соціальної та екологічної безпеки. Тому виникає потреба в новітніх технологічних рішеннях, що мають не тільки наукове значення, а й практичну цінність. **Мета.** Ця стаття присвячена розробці адаптивного управління рухом транспортного потоку в окремих зонах мережі міста із забезпеченням сталого руху транспортних засобів шляхом узгодження оптимальних циклів світлофорного регулювання на перехрестях. **Результати.** У дослідженні надано опис принципової схеми управління дорожнім рухом у містах, що реалізує принцип багаторівневого ієрархічного управління за відповідними рівнями – локальним, тактичним, стратегічним і прийняття рішень. Визначено функціональні моделі для реалізації адаптивного управління з урахуванням зміни пропускної спроможності мережі від її нормативного значення до фактичного. Функції регуляторів на відповідних рівнях виконують дорожні контролери та технічні засоби регулювання. Адаптивне керування передбачає визначення керуючого впливу на транспортний потік відповідно до поточних умов руху у вигляді тривалості циклу світлофорного регулювання на перехрестях зони та швидкості руху транспортного потоку на перегонах. Для побудови схеми зони транспортної мережі розроблено інформаційну модель у вигляді графа, до складу якої належать моделі перехресть і перегонів, матриці потокорозподілу інтенсивностей

на перехрестях з урахуванням топологічних характеристик об'єкта дослідження. Географічні координати визначаються автоматично на підставі мапи міста з означенням їх просторової орієнтації. Це надає змогу визначити місця примикання та напрямки руху транспорту на ділянках зони дослідження. **Висновки.** У статті наведено аналітичні моделі перехресть і перегонів, вирішено задачу оптимізації тривалості циклу світлофорного регулювання з визначенням швидкості руху на підходах до перехрестя. Розробку моделей за допомогою програмного забезпечення Microsoft Visual Studio 2019 та системи GPS доведено до практичного застосування. Такий підхід дає змогу усунути затори на дорогах, скоротити час пересування й покращити екологічні показники дорожнього руху в місті.

Ключові слова: дорожній рух, адаптивне управління, цикл світлофорного регулювання, швидкість руху, оптимізація.

ADAPTIVE TRAFFIC MANAGEMENT IN CITIES

L.S. Abramova¹, A.V. Rohov², H.H. Pitysia³

¹Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Traffic Management and Road Safety,

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1182-9618

²Candidate of Engineering Sciences (Ph.D), Associate Professor at the Department of Information Technologies and Mathematical Modeling,

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0009-3972-4931

³Candidate of Engineering Sciences (Ph.D), Associate Professor at the Department of Traffic Management and Road Safety,

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5061-0144

Summary

Introduction. Traffic management has become a critical issue for large cities due to the continuous increase in the number of vehicles. As the transport network remains unchanged, the frequency of road congestion rises, adversely affecting the reliability of travel and metrics for social and environmental safety. Thus, there is a need for innovative technological solutions that hold both scientific and practical value.

Purpose. This article is dedicated to developing adaptive traffic flow management in specific city network areas to ensure sustainable vehicle movement by coordinating optimal traffic light cycles at intersections. **Results.** The study provides a description of a traffic management framework in urban areas that implements a multi-level hierarchical control principle across corresponding levels – local, tactical, strategic, and decision-making. Functional models are established to facilitate adaptive management, accounting for changes in network capacity from its normative value to the actual capacity. Control functions at the respective levels are carried out by road controllers and regulatory technical devices. Adaptive management involves defining control effects on the traffic flow according to real-time conditions, including traffic light cycle duration at intersections in a designated area and traffic flow speed on the road segments. An informational model of the traffic network zone has been developed in the

form of a graph, incorporating models of intersections and road segments, distribution matrices of traffic flow intensity at intersections, and the topological characteristics of the research area. Geographic coordinates are automatically determined based on the city map, defining their spatial orientation. This enables the identification of junction points and traffic directions within the research zone. **Conclusions.** The article presents analytical models of intersections and road segments and addresses the optimization of traffic light cycle durations with the determination of traffic speed when approaching intersections. The development of models based on the Microsoft Visual Studio 2019 software environment and GPS systems has been implemented in practical applications. This approach allows for alleviating traffic congestion, reducing travel time, and improving ecological indicators of urban traffic.

Key words: traffic management, adaptive control, traffic light cycle, traffic speed, optimization.

Вступ. Останнім часом зміна інтенсивності переміщень, пов'язана зі збільшенням кількості транспортних засобів у містах України, призвела до підвищення навантаження на транспортну систему й навколишнє середовище. Зростаючу потребу в удосконаленні умов переміщення не можна повністю задовольнити (ані в населених пунктах, ані за їх межами) лише створенням нових шляхів сполучення або проведенням інших будівельних заходів. Для виходу із цієї ситуації необхідний подальший розвиток системи управління дорожнім рухом (СУДР) і впровадження цілого комплексу заходів з організації та управління дорожнім рухом (ДР). СУДР, формуючи нові підходи до управління, які реалізують передові технології управління й усувають затори, небезпеку й економічні збитки.

Постановка проблеми. З урахуванням властивостей транспортної мережі міста існує декілька взаємопов'язаних типів управління: каналізований рух на вуличній мережі міста, потокорозподіл у межах окремого перехрестя та на сукупності перехресть, що поєднані міською магістраллю. Основний обсяг транспортної роботи здійснюється на головних магістралях, які утворюють відповідні зони на мережі. Задля високого рівня обслуговування транспортних потоків пропонуємо застосувати організацію рівномірної швидкості руху, що сприятиме зменшенню заторів, часу транспортної затримки та підвищенню екологічної безпеки міст загалом. Отримання такого результату передбачає розробку адаптивного управління ДР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Затори на дорогах впливають на надійність та ефективність функціонування транспортної системи загалом. З метою вирішення цієї проблеми дослідники пропонують різні типи систем управління ДР, щоб максимізувати транспортний потік та оптимізувати проїзд перехрестя, оскільки саме вони є причиною заторів [1]. В основі закордонних публікацій міститься опис застосування інтелектуальних систем управління ДР (ІТМС). Так, у роботі [2] серед декількох компонент інтелектуального управління розглядається метод управління сигналами світлофора й моніторингу транспортного потоку (ТП) засобами хмарного сервісу. Також багато уваги приділено питанню попередження водіїв щодо заторів і складних ситуацій на дорозі [3] для вибору раціонального маршруту; розглядаються пропозиції динамічних

розрахунків оптимальних маршрутів руху транспорту в різні проміжки часу [4] для мінімізації часу проїзду без заторів. Існує підхід до зменшення складності транспортної мережі, а саме до розподілу мережі на частини та впровадження окремих рівнів і засобів керування [5]. Відомі методи [6], що базуються на застосуванні розумних датчиків і виконавчих механізмів, які дають змогу транспортним засобам сприймати та передавати сигнали на світлофори. Заслугує уваги запропонована модель зміни сигналів світлофора залежно від інтенсивності трафіку [7]. Так, упровадження алгоритмів штучного інтелекту в транспортні системи надає можливості для стійкої мобільності в містах. Однак одна з головних проблем полягає у тому, щоб вирішити, коли, де і як слід застосовувати ці методи на практиці. Усі оглянуті наукові підходи потребують втілення новітніх технічних пристроїв регулювання, реорганізації центру управління й розробки сучасного програмного забезпечення.

Формулювання цілей статті. Необхідність втілення новітніх методів управління ТП на транспортній мережі впливає на вибір методу адаптивного управління з метою забезпечення надійності мережі й підвищення рівня соціальної та екологічної безпеки учасників ДР шляхом організації рівномірного руху. Статтю присвячено моделюванню безупинного руху ТП у зонах транспортної мережі на підставі розрахунку оптимальних циклів світлофорного регулювання на перехрестях без застосування штучного інтелекту за допомогою наявних технічних пристроїв засобами GPS з урахуванням складних умов воєнного стану в нашій країні.

Основний матеріал дослідження. У процесі досліджень виявлено, що найбільш ефективною системою управління ДР у містах є система, що має багаторівневу ієрархічну структуру [8], до якої належать рівні прийняття рішень, стратегічний, тактичний і локальний. Відповідно до принципів ієрархічного розподілу управління ДР, для забезпечення рівномірного руху транспортних засобів на мережі з метою адаптації теоретичної пропускної спроможності до фактичної розроблено принципову схему адаптивного управління ДР (рис. 1), яка відображає взаємозв'язки параметрів наявних рівнів управління в процесі ДР [9]. Функції регуляторів може виконувати дорожній контролер.

У центрі управління ДР містяться проектні розрахунки для заданого попиту на користування дорогою транспортним потоком, відповідно до необхідного рівня обслуговування та нормативних значень.

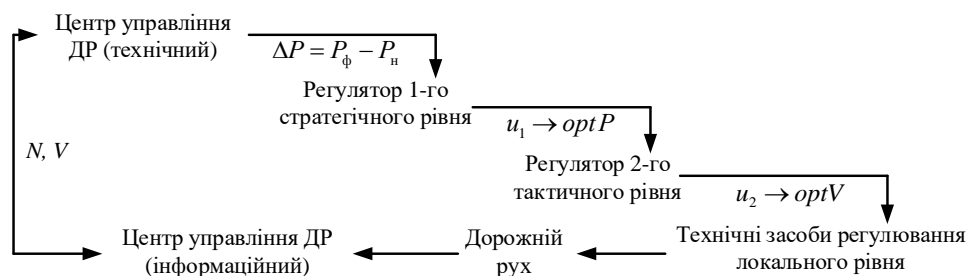


Рис. 1. Принципова схема адаптивного управління ДР

Рівень обслуговування визначається як відношення інтенсивності руху до пропускної спроможності розглянутої ділянки мережі (безрозмірний коефіцієнт, що прагне до одиниці). Тоді керуючі параметри в регуляторі 1 визначено як величину неузгодженості, що впливає на процес ДР загалом, коли поточна пропускна спроможність (P_ϕ) відрізняється від її нормативного значення (P_H):

$$\Delta P = P_\phi - P_H. \quad (1)$$

Для забезпечення попиту на користування автомобільною дорогою сформовано керуючі впливи: u_1 – для центру управління та u_2 – безпосередньо для ТП. Керуючий вплив u_1 визначено як величину розбіжності нормативних параметрів $P_H(0)$, які не змінюються в часі, та фактичних змінних $P_\phi(t)$

$$u_1(t) = \int_0^t f [P_\phi(t), P_H(0)] dt \quad (2)$$

Визначення керуючих впливів u_2 на ТП наведено залежністю (3), яка враховує зміну швидкості руху від її розрахункового значення $V_p(t)$ до фактичного $V_\phi(t)$, що впливає на зміну $P_\phi(t)$:

$$u_2(t) = \int_0^t f [V_\phi(t), P_\phi(t), V_p(t)] dt \quad (3)$$

Застосування адаптивного управління ДР у містах передбачає розв'язання першочергових задач:

- підвищення ефективності функціонування транспортної мережі міста;
- утримання необхідного рівня безпеки дорожнього руху, що існує як необхідна вимога в процесі управління ДР;
- підвищення надійності транспортної мережі, бо відмовою вважаємо втрату властивості здійснювати головну функцію – забезпечення сталого руху транспорту за маршрутами;
- підвищення екологічної безпеки навколишнього середовища.

Для розробки заходів адаптивного управління на тактичному рівні з урахуванням нерівномірності та стохастичності параметрів ТП було формалізовано задачу адаптивного управління.

Розроблено алгоритм адаптивного управління, що має дворівневу структуру: контур адаптації та узагальнювальний об'єкт, який містить усю незмінну частину системи управління: об'єкт управління (ДР) та технічні засоби регулювання. Формалізовано задачу адаптивного управління, вхідні X , вихідні Y та керуючий вплив U описуються таким чином:

$$x(t) = F_1 \cdot (N, V, K_C, l, T_{CP}); \quad (4)$$

$$Y(t) = F_2 \cdot (P, T_{Ц}, V); \quad (5)$$

$$U(t) = F_3 \cdot (T_{Ц}, V), \quad (6)$$

де P – пропускна спроможність вулично-дорожньої мережі (авт/год); l – довжина перегонів, м; T_{CP} – наявність технічних засобів регулювання (1 або 0); N – інтенсивність транспортного потоку, авт/год; V – швидкість транспортного потоку, км/год; K_C – склад транспортного потоку; $T_{Ц}$ – цикл світлофорного регулювання, с; F_1, F_2, F_3 – невідомі функції.

Вектор невідомих параметрів \bar{G} містить параметри світлофорного циклу, що входять у математичний опис об'єкта управління й відповідають оптимальному налаштуванню світлофорного регулювання

$$\bar{G} = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5), \quad (7)$$

де q_1 – тривалість основної фази циклу регулювання, с; q_2 – тривалість забороняючої фази циклу регулювання, с; q_3 – тривалість проміжних тактів циклу регулювання, с; q_4 – ефективність світлофорного циклу, q_5 – наявність перешкод.

Таким чином, доцільно синтезувати алгоритм управління, що використовує вимірювані або обчислювані значення кожного $q \in G$ для досягнення заданої цільової функції. Наданий опис задачі управління в умовах невизначеності вирішується поетапно: 1) ідентифікація вектора \bar{G} , 2) визначення алгоритму управління, що відповідає якості функціонування СУДР одним із розроблених методів; 3) формування цільової функції з урахуванням \bar{G} .

Для вирішення поставленої задачі побудовано модель зони мережі засобом трансформації геодезичних координат центрів перехресть міста для створення пласкої мапи, де всі точки мають відносні координати. Як базову точку вибрано південний захід міста, який виступає початком координат. Кожне перехрестя на мапі характеризується відносними координатами центру (x_i, y_i) та своїми розмірами у двох напрямках: захід – схід по осі X, і південь – північ по осі Y, (w_i, h_i) . Така система координат забезпечує точне позиціонування міських об'єктів і дає змогу ефективно обробляти й аналізувати просторові дані в локальних масштабах.

На базі отриманих відносних координат розроблено геоінформаційну модель, яка поєднує отримані відносні координати елементів мережі з параметрами ТП. Інформація, що стосується розташування та геометрії n перехресть, представлена як матриця C (8), кожний з n рядків якої – це чотири скаляри: відносна горизонтальна координата центру x_i , відносна вертикальна координата центру y_i та розміри перехрестя у двох напрямках w_i, h_i відповідно. Як параметри ТП в системі присутні матриці інтенсивностей на кожному перехресті. Для кожного перехрестя ця матриця N (8) має розмір 4×4 та містить інтенсивності руху з напрямку i до напрямку j :

$$C = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & w_1 & h_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & w_n & h_n \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Кодування напрямів відповідно: захід – 1, північ – 2, схід – 3, південь – 4. Наприклад, $n_{j3} = 500$ – це інтенсивність, що дорівнює 500 транспортних засобів на годину, які рухаються із заходу на схід. Матриця N потрібна для кожного перехрестя, у тому числі для перехресть, де на частині або на всіх під'єднаних перегонах організований рух транспортних засобів в один бік. У такому випадку частина елементів $n_{ij} = 0$, тобто рух в цьому напрямку неможливий.

Транспортна мережа може бути представлена як квадратна матриця L (9), розміри якої дорівнюють n – кількості перехресть, а елементами є вектори, що описують перегін – сторона світу b для початкового перехрестя i , кількість смуг l , сторона світу e для кінцевого перехрестя j , довжина перегону s :

$$L = \begin{bmatrix} (b_{11}; l_{11}; e_{11}; s_{11}) & \dots & (b_{1n}; l_{1n}; e_{1n}; s_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (b_{n1}; l_{n1}; e_{n1}; s_{n1}) & \dots & (b_{nn}; l_{nn}; e_{nn}; s_{nn}) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Мінімальне значення довжини перегону (10) – це довжина прямої лінії між координатами центрів перехресть, за винятком розмірів перехресть. Довжина може бути уточнена з урахуванням актуальної геометрії перегону, але автоматично можна визначити тільки її мінімальну величину:

$$s_{ij} \geq \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - \frac{1}{2}(z_i(b_{ij}) + z_j(e_{ij})), \quad (10)$$

де z_i – розмір перехрестя i залежно від сторони світу:

$$z_i(b) = \begin{cases} w_i, b = 1, 3 \text{ (схід - захід)} \\ h_i, b = 2, 4 \text{ (північ - південь)} \end{cases}$$

Комірка матриці L_{ij} дорівнює пустій множині \emptyset , якщо між перехрестями i та j немає ланок, або дорівнює вектору з довжиною перегону відповідно до сторони світу та $l_{ij} = l - b$ (залежно від кількості смуг, що дозволяють рух між цими перехрестями). Матриця L не є діагонально симетричною, оскільки в місті присутні ланки, на яких рух дозволено лише в одному напрямку ($l_{ij} = l$, але $l_{ji} = 0$) або різна кількість смуг по напрямках ($l_{ij} = l$, але $l_{ji} = 2$).

Зона транспортної мережі, на якій потрібно налаштувати адаптивне управління, може бути описана як вектор (11), елементами якого є перехрестя в порядку їх проїзду транспортними засобами:

$$G = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_p], \quad (11)$$

де p – кількість перехресть, що включені в зону управління. У разі потреби забезпечити беззупинний рух на декількох ділянках, які мають складну геометрію та/або не мають спільних перехресть, можна запровадити низку таких векторів G та включити їх одночасно в критерій якості для пошуку ідеального рішення. Виходячи з номерів послідовних перехресть, матриці L , визначено, як саме ці перехрестя з'єднані.

Для випадків, коли на перехресті не створено світлофорного регулювання, потрібно позначити, яка ланка є головною або другорядною. Для цього можна елементи матриці l_{ij} зробити негативними для другорядних ланок та в розрахунках використовувати абсолютну величину. Це також дає можливість надати інформацію щодо існування світлофорного регулювання – якщо $l_{ij} < 0$, то на перехресті j немає світлофора, а ланка l_{ij} – другорядна. Ці дані дають змогу перевіряти за допомогою лінійного алгоритму, чи є можливість забезпечення рівномірного руху для цієї послідовності перехресть, оскільки негативні ланки до неї входити не можуть, бо неможливо створити рівномірний рух, якщо дорога другорядна – транспортні засоби неминуче зупиняться на ній перед перехрестям.

Увесь комплекс вихідних даних для математичної моделі може бути перевірений на валідність такими правилами: 1) усі вектори ділянок зони (11) поєднують мінімум два перехрестя; 2) між послідовними перехрестями (11) існують ланки (9), та всі значення в них позитивні; 3) матриці (8) та (9) взаємопов'язані інтенсивністю та кількістю смуг руху; 4) довжини перегонів (9) мають довжину не менше ніж (10).

Якщо вихідні дані валідні, тоді за допомогою формул (12)–(14) розраховуються мінімальні цикли дозволяючого сигналу світлофора та фазових коефіцієнтів (15):

$$T_{\min} = \frac{1.5T_n + 5}{1 - y_{13} - y_{24}} \leq 120, \quad (12)$$

$$T_{\min 13} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{13}}{y_{13} + y_{24}}, \quad (13)$$

$$T_{\min 24} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{24}}{y_{13} + y_{24}}. \quad (14)$$

де $T_n = 3$ с, $y_{13} = \max(y_1, y_3)$; $y_{24} = \max(y_2, y_4)$.

$$y_i = \begin{cases} 0, l_i = 0 \\ \sum_{j=1}^4 N_{kij} \cdot \left(1 + \frac{6}{z_k(1) + z_k(2)}\right) \cdot \frac{1}{1800}, |l_i| = 1 \\ \sum_{j=1}^4 N_{kij} \cdot \left(1 + \frac{6}{z_k(1) + z_k(2)}\right) \cdot \frac{1}{3000}, |l_i| > 1 \end{cases} \quad (15)$$

Вибирається єдиний цикл для всіх світлофорів, присутніх у векторі G (11). Якщо таких векторів декілька і вони мають спільні світлофори, усі ці світлофори поєднуються в групу з однаковим повним циклом. Спільний цикл повинен бути не менший за будь-який мінімальний цикл із цієї групи (12). Оскільки частина світлофорів має менший цикл, додаткові секунди можна розподілити між вертикальним (2–4, північ – південь) і горизонтальним напрямом (1–3, захід – схід). Це можна зробити в довільній пропорції, тож кожен світлофор має змінну, яка є частиною задачі оптимізації, а саме частина часу $\beta \in [0; 1]$ додається з надлишку до вертикального напрямку. Для горизонтального напрямку ця частина буде відповідно $(1 - \beta) \in [0; 1]$.

Іншим параметром для вирішення задачі оптимізації є нормований зсув відносно будь-якого світлофора, вибраного командним, $\delta = \frac{\Delta t}{T_0} \in [0; 1]$, де T_0 – вибраний цикл для всіх світлофорів у зоні мережі. Для командного світлофора $\delta = 0$. Таким чином, кожен світлофор у зоні створює два нормовані параметра для системи оптимізації, кожен параметр перебуває в межах $[0; 1]$ (ця обставина створює сприятливі умови для роботи будь-якого методу оптимізації). Якщо вважати, що світлофорний цикл починається з дозволяючого сигналу в горизонтальному напрямку, то момент часу, коли рух буде дозволено в напрямку захід – схід (і навпаки), визначається як

$$t_{13} = (\delta + r) \cdot T_0, r \in Z, \quad (16)$$

де r – номер циклу, ціле число.

Момент дозволяючого сигналу у вертикальному напрямку залежить як від зсуву фаз, так і від балансу таким чином:

$$t_{24} = t_{13} + T_{\min 13} + (1 - \beta)T_0 + T_{II}. \quad (17)$$

Рекомендовану швидкість на ділянці зони довжиною s за умов, що на стартовому перехресті момент дозволяючого сигналу t_1 , а на кінцевому – t_2 , можна отримати таким чином:

$$V = \max\left(\frac{3,6 \cdot s}{t_2 - t_1 + rT_0}\right) \leq 50, r \in Z. \quad (18)$$

Тобто час, потрібний для подолання перегону, є або різницею між t_2 та t_1 , або ця різниця може бути збільшена на цілу кількість тактів вибраної зони. Отримана швидкість не може перевищувати дозволена в місті – 50 км/год. Ідеальний рівномірний рух – це рекомендована швидкість на всіх ділянках вектору G (11), і вона однакова. Таким чином, критерій якості задачі оптимізації, що є функцією вектора зсуву фаз і балансів циклів усіх світлофорів у зоні рівномірного руху, можна виразити таким чином:

$$Q(\bar{\beta}; \bar{\delta}) = \sum_{i=1}^{p-1} \left[(V_{G_i} - V_{0G_i})^2 l_{G_i G_{i+1}} \right] \rightarrow 0, \quad (19)$$

де V_{G_i} – отримана за (18) швидкість на перегоні, V_{0G_i} – бажана швидкість на цьому перегоні; $l_{G_i G_{i+1}}$ – довжина перегону між перехрестями, зазначеними у векторі G (11).

Швидкісний режим на ділянках зони повинен відбиватися на дорожніх знаках зі змінною інформацією у вигляді табло. За допомогою стохастичного, градієнтного або генетичного алгоритму можна отримати вектори зсуву та балансу фаз світлофорів, які наближають умови дорожнього руху до потрібних шляхом мінімізації критерію якості (19). Використання градієнтного методу для вирішення повної задачі є малоефективним, оскільки цільова функція (19) має велику кількість локальних мінімумів, і цей метод можна використати тільки для отримання початкового набору часткових рішень для подальшої оптимізації. Авторами було використано генетичний алгоритм, у якому хромосоми кодувалися небінарно, а гени були представлені у вигляді числових значень нормованих зсувів і балансів світлофорів. Хромосоми нащадків отримувались як випадкова комбінація генів батьків, що пройшли відбір після сортування результатів і вибору найкращих рішень. Завдяки великій кількості нащадків була вирішена проблема потрапляння до локального мінімуму, а проблема обмеженості ресурсів обчислювальної техніки та часу, потрібного для роботи алгоритму, вирішена завдяки обмеженню кількості цієї популяції після відбору 10 % найкращих рішень, які стають батьками для наступної ітерації.

Для реалізації розробленого математичного забезпечення адаптивного управління в зоні транспортної мережі розроблено програмне забезпечення «Контур» за допомогою інтегрованого середовища розробки (IDE) Microsoft Visual Studio 2019 мовою програмування C#.

Висновки. Таким чином, розроблено алгоритм адаптивного управління дорожнім рухом у зоні транспортної мережі міста. Для забезпечення рівномірного руху розроблено програмне забезпечення визначення параметрів управління – тривалості циклів світлофорного регулювання та швидкості руху на ділянках зони. Експериментальні дослідження було проведено в зоні мережі м. Харків засобами програмного забезпечення імітаційного моделювання багатомодального руху PTV Vissim. Порівняльний аналіз результатів імітаційного моделювання за локального й контурного управління свідчить, що запропонований підхід управління ДР забезпечує зменшення часових затримок руху автотранспортних засобів на 13 % і витрат палива на 15 % завдяки скороченню часу пересування, а також зменшення викидів забруднювальних речовин у навколишнє середовище на 15 % (за період моделювання). Отримані проміжні результати були обговорені на міжнародній конференції Transport, Ecology – Sustainable Development Eko Varna 2021 [10].

ЛІТЕРАТУРА

1. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах : монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич; за заг. ред. Є. Ю. Форнальчика. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 236 с.

2. Nigam N., Singh D.P., Choudhary J.A. Review of Different Components of the Intelligent Traffic Management System (ITMS). *Symmetry*. 2023. 15, 583. <https://doi.org/10.3390/sym15030583>.
3. Sarrab M., Pulparambil S., Awadalla M. Development of an IoT based real-time traffic monitoring system for city governance. *Global Transitions*. 2020. Vol. 2, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.09.004>.
4. Benmessaoud Y., Cherrat L., Ezziyyani M. Real-Time Self-Adaptive Traffic Management System for Optimal Vehicular Navigation in Modern Cities. *Computers*. 2023. 12, 80. <https://doi.org/10.3390/computers12040080>.
5. Vrancken J., Dos Santos Soares M. Multi-level control of networks: the case of road traffic control. *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Montreal, QC, Canada, 2007, pp. 1741–1745. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2007.4414190>.
6. Shankaran R.S., Rajendran L. Intelligent Transport Systems and Traffic Management. In: *Smart Cities*. CRC Press, 2022. pp. 133–180. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003287186-6>.
7. Lilhore U.K., Imoize A.L., Li C.-T., Simaiya S., Pani S.K., Goyal N., Kumar A., Lee, C.-C. Design and Implementation of an ML and IoT Based Adaptive Traffic-Management System for Smart Cities. *Sensors*. 2022. 22, 2908. <https://doi.org/10.3390/s22082908>.
8. Нагорний Є. В., Абрамова Л. С. Концептуальний підхід до проектування систем управління дорожнім рухом. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 99–105.
9. Abramova L., Nahornyi Y., Ptytsia H. Structure of transformation of the road motion parameters in the control system. *SHS Web of Conferences*. 2019. 67, 05001. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196705001>.
10. Abramova L., Ptytsia H., Shyrin V., Kapinus S. The concept of uniform movement of traffic flows on the contour of city highways and streets. *AIP Conf. Proc.* 2021. 2439, 020018. <https://doi.org/10.1063/5.0068472>.

REFERENCES

1. Fornalchuk, Ye.Yu., Mohyla, I.A., Trushevskiy, V.E., & Hilevych, V.V. (2018). *Traffic Management at Regulated Intersections in Cities [Upravlinnia dorozhnim rukhom na rehulovanykh perekhrestiakh u mistakh]*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 236 p. [in Ukrainian].
2. Nigam, N., Singh, D.P., & Choudhary, J.A. (2023). Review of Different Components of the Intelligent Traffic Management System (ITMS). *Symmetry*. 15, 583. <https://doi.org/10.3390/sym15030583>.
3. Sarrab, M., Pulparambil, S., & Awadalla, M. (2020). Development of an IoT based real-time traffic monitoring system for city governance. *Global Transitions*. Vol. 2, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.09.004>.
4. Benmessaoud, Y., Cherrat, L., & Ezziyyani, M. (2023). Real-Time Self-Adaptive Traffic Management System for Optimal Vehicular Navigation in Modern Cities. *Computers*. 12, 80. <https://doi.org/10.3390/computers12040080>.

5. Vrancken, J., & Dos Santos Soares, M. (2007). Multi-level control of networks: the case of road traffic control. *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Montreal, QC, Canada, pp. 1741–1745. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2007.4414190>.
6. Shankaran, R.S., & Rajendran L. (2022). Intelligent Transport Systems and Traffic Management. In: *Smart Cities*. CRC Press, 133–180. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003287186-6>.
7. Lilhore, U.K., Imoize, A.L., Li, C.-T., Simaiya, S., Pani, S.K., Goyal, N., Kumar, A., & Lee, C.-C. (2022). Design and Implementation of an ML and IoT Based Adaptive Traffic-Management System for Smart Cities. *Sensors*. 22, 2908. <https://doi.org/10.3390/s22082908>.
8. Nahorny, Y.V., & Abramova, L.S. (2017). Conceptual Approach to the Design of Traffic Management Systems [Kontseptualnyi pidkhid do proektuvannia system upravlinnia dorozhnim rukhom]. *Automobile and Electronics. Modern Technologies*. Issue 12, 99–105 [in Ukrainian].
9. Abramova, L., Nahorny, Y., & Ptytsia, H. (2019). Structure of transformation of the road motion parameters in the control system. *SHS Web of Conferences*. 67, 05001. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196705001>.
10. Abramova, L., Ptytsia, H., Shyrin, V., & Kapinus S. (2021). The concept of uniform movement of traffic flows on the contour of city highways and streets. *AIP Conf. Proc.* 2439, 020018. <https://doi.org/10.1063/5.0068472>.