

**В.В. Шевченко**

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна*

## **ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАНУ КООРДИНАЦІЇ СВІТЛОФОРІВ НА ПРОСПЕКТИ НАУКИ В МІСТІ ХАРКІВ**

*Представлені результати оцінки ефективності створеного за новим методом та реалізованого на практиці плану координації роботи шести локальних світлофорів на проспект Науки в м. Харків. Порівняно результати застосування нових параметрів роботи світлофорів, з існуючим до його впровадження станом. Для цього було проведено дослідження методом «плаваючого автомобіля» та використані дані сервісу TomTom.*

**Ключові слова:** координація роботи світлофорів, міська магістраль, час поїздки, швидкість руху транспортного засобу.

### **Постановка проблеми**

Вибір найбільш ефективного напрямку розвитку існуючих систем організації дорожнього руху (ОДР) є важливим питанням не лише для українських міст, а й для міст багатьох країн, що розвиваються. Технічною базою такого розвитку зазвичай являються локальні світлофорні об'єкти (СО) з жорсткими світлофорними циклами, які є найбільш доступним засобом розподілу в часі конкуруючих потоків учасників руху на перехрестях вулиць і доріг в одному рівні. У розвинених країнах, чії міста вже подолали цей перехід, застосовуються дві різні альтернативи для розвитку локальних СО: адаптивні системи управління СО та координоване світлофорне управління (СУ). Ці альтернативи не є взаємовиключними та можуть застосовуватися сумісно, що й робиться в багатьох випадках. Паралельна робота транспортних систем різних міст з адаптивними СО у координованому та некоординованому режимах у деякій мірі свідчить про приблизно рівну ефективність цих альтернатив та залишає країни, що розвиваються, без відповіді на питання чи доцільним є створення жорстких планів координації (ПК) на фрагментах вулично-дорожньої мережі (ВДМ) в містах, як першого та найбільш доступного кроку на шляху розвитку систем локальних СО. Для того, щоб відповісти на це актуальне питання, необхідне створення та реалізація нового, ефективного методу розробки жорсткого ПК, який враховує об'єктивні властивості процесу координованого руху транспортних потоків (ТП) на міських магістралях (ММ) та дозволяє з'ясувати реальну результативність цього процесу з точки зору якості обслуговування учасників руху. Такий метод був створений та впроваджений на одній з центральних магістралей міста Харкова –

просп. Науки, що дозволило створити реально діючий приклад скоординованої роботи локальних СО, для якого залишилось лише отримати об'єктивну оцінку змін у рівні обслуговування учасників руху.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Основні риси нового методу створення ПК наведені у роботі [1], з якої можна побачити суттєву різницю між ним та існуючими методиками координації світлофорів, найближча з яких представляє собою основну просторово-часову діаграму (ПЧД) [2]. ПЧД є відомим засобом відображення ПК на цей час, який застосовувався безліч разів багатьма спеціалістами в різних країнах для ручного налаштування ПК, але має багато недоліків, детально описаних у [2]. Новий метод [1] дозволяє позбавитись основних з них, тобто врахувати прискорення транспортних засобів (ТЗ) від стоп-лінії та наявність ТЗ, які накопичуються на перехрестях протягом заборонного сигналу для ЗХ. Метод [1] також заснований на новому, нестандартному підході до визначення тривалості світлофорного циклу в цілому та його основних тактів, але має й спільні риси з ПЧД, які полягають у ручному налаштуванні ЗХ в зустрічному напрямі, по відношенню до напрямку руху, обраному в ПК прямим. Цей метод та його практична реалізація на просп. Науки є лише першим кроком на шляху створення досконалого методу магістральної координації, розробити який можна за рахунок поглиблення як теоретичних знань, так і практичних навичок у цій сфері. Але вже при першому застосуванні він дозволяє визначити масштаб потенційних можливостей магістральної координації локальних світлофорів у містах та надати остаточну оцінку її перспективності у

порівнянні з адаптивними світлофорами, для чого необхідно оцінити ефективність створеного та реалізованого ПК. Основним засобом оцінки ефективності заходів у сфері ОДР в останній час стало імітаційне моделювання [3]. Воно використовується не лише на кінцевому етапі досліджень, а дуже часто стає частиною чергового методу СУ, що породило цілий клас оптимізаційних моделей на основі мікросимуляції, де методи оптимізації інтегруються з імітаційними моделями [4]. Метою таких методів є найкращі значення цільової змінної серед усіх альтернатив без моделювання кожної з них [5]. Автори таких робіт вважають за можливе достатньо точно оцінити вплив коливань у факторах на параметри функціонування світлофорів за допомогою мікросимуляції, без фактичної реалізації заходу чи методу. Роботи Нгуєн та ін. [6], Хатрі і Бумхіді [7], Чжен та ін. [8] є дослідженнями, в яких використовуються багатоцільовий підхід до оптимізації СУ з використанням SimOpt або VISSIM. Нгуєн та ін. [6] інтегрували генетичний алгоритм локального пошуку без домінування з ітераціями таким чином, що вихідні дані стали попередниками наступного покоління у своєму дослідженні. Результати запропонованого алгоритму порівнювались з багатоцільовими диференціальними еволюційними алгоритмами та було з'ясовано, що запропонований алгоритм був кращим, ніж два інших підходи, і хороші результати моделювання були досягнуті на ранній фазі процедури оптимізації. Щоб збалансувати справедливість та ефективність ТП у міській мережі, Zheng et al. [8] представили двохцільовий стохастичний підхід у імітаційному середовищі SimOpt. Два типи сурогатних моделей також використовувалися для відображення зв'язку між змінними критерію та цілями і результати дослідження продемонстрували, що запропонована модель перевершувала інші аналоги. Система моделювання тестового стенда для оцінки продуктивності самонавчаючої адаптивної системи керування сигналами дорожнього руху представлена у статті [9]. Оцінені два режими роботи системи (локальні чи координовані СО) при різних рівнях навантаження у місті Берлінгтон, Онтаріо, США. Результати показали, що система перевершує базовий сценарій, заощаджуючи до 25% затримок на рівні мережі та 15% скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Це дослідження демонструє високу ефективність сумісного використання методів координованого та адаптивного СУ, за умови коректного налаштування імітаційної моделі.

Черговим прикладом використання імітації для оцінки ефективності ПК є застосування програмного забезпечення (ПЗ) NETSIM для порівняння різних

методів координації U-Band, MAXBAND, V-Band та MultiBAND [10, 11], які є представниками аналітичних методів створення ПК з використанням ефективності хвилі як критерію оптимізації. Але результати імітації для всіх варіантів не виглядають дуже переконливими, так як кількість зупинок у всіх випадках перевищує 50 %, що свідчить не на користь перелічених ПЗ, але ці дані можуть стати непоганою інформаційною основою для порівняння з іншими випадками координації. У роботі [12] за рахунок інтеграції ПЗ з імітаційного моделювання трафіку Paramics та Synchro, за допомогою програми формування ПК TRANSYT-7F був створений новий інструмент для більш точного налаштування зміщень сигналу, щоб підвищити плавність руху в односторонній або двосторонній координації. ПЗ VISSIM використовувалось авторами звіту [13] для оцінки доцільності використання адаптації або координації в залежності від відсотка зупинок на фрагменті ММ з локальними СО. На основі імітаційного експерименту було визначено, що адаптація є однозначно переважною, якщо початкова частка зупинок менше 20 %, координація – більше 50 %. VISSIM також використовувався у роботі [14] для оцінки застосування моделі оптимізації координації артеріальних сигналів для руху трамваїв на основі асиметричного багатодіапазонного методу (AMBAND). Імітаційний експеримент показав, що час у дорозі трамваїв зменшується. Прикладом оцінки ефективності ПК за рахунок його впровадження є робота [15] де за суб'єктивною оцінкою автора були отримані позитивні результати використання програм TRANSYT та SCOOT у Чилі. Обидві потребували суттєвого налаштування на місцеві умови, що дозволило охопити 1410 з 1750 СО з жорсткими циклами. Нажаль у роботі відсутня об'єктивна оцінка результативності створених ПК. Підсумовуючі проведеній аналіз оцінки якості створених ПК необхідно відзначити, що в світі не існує єдиного підходу до вирішення цього питання, а основним засобом її виконання є імітаційне моделювання процесів руху ТЗ на ВДМ. При цьому виникає питання коректності налаштувань імітаційної моделі, адже при достатньо широких можливостях розробників моделей, які забезпечуються багатим інструментарієм більшості ПЗ з імітації трафіку, цей інструментарій далеко не завжди супроводжується чіткими вказівками щодо його використання, що може призводити до втрати точності відображення реального транспортного процесу. Але за умови створення адекватної імітаційної моделі об'єкту, цей інструмент є дуже корисним як на стадії проектування, так й на стадії експлуатації ПК. Єдиним прикладом оцінки наслідків фактичної реалізації ПК на практиці, в

огляді виявилось останнє джерело [15], але це не означає безперспективності цього варіанту оцінки ефективності ПК. Бажано лише отримувати об'єктивну оцінку результатів поїздок ТЗ по ВДМ за базовою та новою схемою СУ, для чого можуть бути корисними існуючі на цей час у світі картографічні сервіси з маршрутизацією поїздок у режимах реального часу або прогнозування трафіку. Результати аналізу також свідчать, що при оцінці ефективності ПК широко застосовується такий показник якості транспортного обслуговування, як кількість зупинок на шляху прямування ТЗ, який може оцінюватися як самостійно, так й у складі комплексного критерію ефективності сумісно з тривалістю поїздки.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтована оцінка ефективності ПК світлофорів на просп. Науки в м. Харків з точки зору учасників руху. Для її досягнення необхідно порівняти параметри поїздок ТЗ на ВДМ, що оточує фрагмент просп. Науки від просп. Незалежності до вул. Мінської, для якого був створений та реалізований ПК. Об'єктивність оцінки має забезпечуватися різноманітним джерелом інформації та коректним ставленням до параметрів поїздок в умовах локальної роботи світлофорів і після впровадження ПК. Основним критерієм ефективності ПК  $E$  має виступати комплексний показник якості руху, що враховує тривалість поїздки та кількість зупинок на шляху прямування:

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

де  $N$  – кількість ТЗ для яких формується ПК, од.;  
 $t_i$  – час подолання  $i$ -м ТЗ ВДМ, навколо фрагменту просп. Науки, що координується, с;  
 $S$  – перевідний коефіцієнт від кількості зупинок до часу очікування,  $S=20$  с [Ошибка! Источник ссылки не найден.];  
 $n_{si}$  – кількість зупинок  $i$ -го ТЗ під час подолання фрагменту ММ, що координується, од.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Паралельно з формуванням ПК за методикою [1] об'єкт дослідження моделювався у програмному продукті VISSIM для того, щоб мати можливість найточнішого налаштування ПК та оцінити його ефективність на кінцевому етапі дослідження. Створена у середовищі VISSIM імітаційна модель, була налаштована на діючі до впровадження ПК параметри роботи СО на фрагменті просп. Науки, що координується. Але, нажаль, її прогнози показали, що

модель не здатна допомогти ані у тонкому налаштуванні ПК ані в адекватній оцінці результатів подолання ТЗ цього фрагменту ВДМ. Невідповідність моделі VISSIM реальному об'єкту відображається в основному на пачці ЗХ, яка вкрай рідко досягає останнього перехрестя напряму в більш-менш значущому складі. Найчастіше за все жоден ТЗ зі стартового складу пачки ЗХ на першому перехресті, до кінця фрагменту просп. Науки взагалі не доїжджає. Така ситуація не відповідає реальному стану речей, коли більшість ТЗ з початкової пачки досягає останнього перехрестя цього фрагменту, тому створена модель була визнана недостатньо точною. Це зробило імітаційний експеримент не самим результативним способом оцінки ефективності ПК 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 вкрай важко. З урахуванням складнощів, які виникли під час імітаційного моделювання, це приводить до питання щодо однозначності використання лише критерію (1). Ще одним фактором, який обумовлює додаткові сумніви в обов'язковості в його використання є різна манера водіння водіїв ТЗ, які в одних й 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 (1), а й спрощений критерій середнього часу поїздки на фрагменті ММ, що координується:

$$E_t = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \rightarrow \min \quad (2)$$

Тоді оцінювати ефективність ПК стає можливим за допомогою інших характеристик транспортного процесу, пов'язаних із часом руху. Непрямим способом оцінки ефективності ПК за умови сталості геометричних параметрів об'єкту дослідження є також порівняння середньої швидкості руху ТЗ на фрагменті ВДМ до та після впровадження ПК.

$$E_v = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \rightarrow \max, \quad (3)$$

де  $V_i$  – середня швидкість руху  $i$ -го ТЗ на ВДМ,

навколо фрагменту просп. Науки, що координується.

Критерії (2) та (3) суттєво поширюють можливості оцінки 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 в дослідженні використані два способи порівняння параметрів поїздок на досліджуваному фрагменті ВДМ до та після впровадження ПК. Ними стали дослідження методом «плаваючого автомобіля» та використання даних сервісу TomTom.

Для оцінки результатів поїздок методом плаваючого автомобіля 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 напрямі та здійснювати спостереження за часом подолання ним досліджуваного фрагменту просп. Науки. Кожну таку поїздку дослідник фіксував на відеореєстратор, поїздки розпочалися з кінця квітня 2021 року та тривали до кінця вересня того ж року при некоординованому варіанті роботи СО. Потім вони були поновлені після впровадження ПК у грудні 2021 року. Всі поїздки, які здійснювалися в робочі дні відносяться до відповідного піку трафіку для кожного напрямку – ранкового, для прямого напрямку ЗХ від вул. Мінської до просп. Незалежності та вечірнього, для зворотного напрямку. Наявність відеореєстру надає широкі можливості для оцінки ефективності ПК, у тому числі дозволяє визначити кількість зупинок при подоланні фрагменту просп. Науки, що координується. Кількісна оцінка результатів заїздів плаваючого автомобіля виконана за середнім значенням та стандартним відхиленням. Останній показник є дуже цікавим як характеристика рівня транспортного обслуговування моторизованих учасників руху системою ОДР, оскільки відображає передбачуваність часу поїздки.

Різниця у середніх значеннях результатів поїздок плаваючого автомобіля до та після впровадження ЗХ узагальнено можливо описати таким чином, що робота ПК дозволила водію плаваючого автомобіля практично у двічі скоротити час поїздки в обох напрямках руху ЗХ, з деякою перевагою прямого напрямку. Кількість зупинок при цьому скоротилася більш ніж на 70 % як у прямому, так й зворотному напрямі, також з невеликою перевагою прямого напрямку над зворотним. Стандартне відхилення результатів поїздок плаваючого автомобіля також істотно

скоротилося, але навпаки, у більшому ступені в зворотному напрямі, де воно зменшилося орієнтовно на 60-70 %, тоді як для прямого напрямку це зменшення входить до інтервалу 40-50 %. Результати заїздів переконливо свідчать про значну перевагу ПК над звичайним варіантом роботи СО на фрагменті просп. Науки між просп. Незалежності та вул. Мінською включно.

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 плаваючого 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 є провідним виробником апаратного та програмного забезпечення автомобільної навігації, картографічних сервісів, у тому числі у реальному часі. Вона є акціонерним товариством, акції якого торгуються на фінансових ринках Нідерландів, що надає доступ до її звітності. Маючи у своєму розпорядженні близько 600 млн. підключених навігаційних пристроїв та використовуючи додаткові дані від інших операторів BigData, компанія TomTom з 2005 року зберігає та аналізує інформацію щодо дорожнього руху у 81 країні світу. Дані, які аналізує TomTom (Floating Car Data) є знеособленими треками автомобільних поїздок з фіксацією часу, розташування та поточної швидкості автомобіля. Продукт TomTom Traffic Stats дозволяє визначити частину ВДМ – маршрут або кілька маршрутів чи певну територію. Для обраної частини ВДМ по заданих календарних періодах і часових інтервалах існує можливість отримати кількість зафіксованих TomTom поїздок та статистичні показники швидкості руху та часу перебування для кожної елементарної ділянки мережі.

Навігаційне обладнання чи програмне забезпечення, які збирають дані для TomTom, мають далеко не всі автомобілі. Тому кількість зафіксованих треків TomTom є підмножиною

повного обсягу дорожнього руху в межах досліджуваної території. Відповідно за допомогою сервісів TomTom можна отримати лише відносні показники щодо кількості ТЗ у русі, за ділянками ВДМ, за часом доби тощо. 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. При цьому оцінка часу руху за окремими маршрутами можлива лише у випадку, коли дані з TomTom отримуються саме у вигляді маршрутів, а це дуже коштвна інформація, оскільки вона тарифікується пропорційно сумарній довжині ділянок, які охоплюються замовленням, а в цьому випадку – пропорційно сумарній довжині маршрутів. Реально доступним варіантом інформації TomTom виявилось придбання даних 133 ділянок 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 є типовими для життя Харкова, на них не розповсюджувались карантинні обмеження, викликані пандемією COVID 19 та з моменту впровадження ПК пройшов майже місяць, що є достатнім для адаптації водіїв до нової схеми ОДР.

Оцінити час проїзду деяким маршрутом за допомогою даних TomTom можливо лише приблизно, оскільки по ділянках будь-якого маршруту рухаються ТЗ, які прямують будь-якими маршрутами. Це особливо важливо для основного маршруту по фрагменту просп. Науки з ПК, оскільки на ньому будуть відобразитися ТЗ, які на черговому перехресті приєднуються до пачки ЗХ з інших напрямів 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 та зворотному напрямках руху ЗХ за маршрутом плаваючого автомобілю з даними TomTom. Виходячи зі змісту середнього часу руху по ділянках у мережі TomTom, дані мають подібність з часом безпосередньої поїздки по маршруту плаваючого автомобілю. Але вони не зовсім корелюються між собою, так як час поїздки у 2021 році за даними TomTom виявився суттєво нижче ніж у плаваючого автомобілю, а у 2022 році навпаки – помітно вище. Та, якщо друга частина цих протиріч, ще може бути пояснена суб'єктивним характером результатів поїздок плаваючого автомобілю, то для більш короткого часу подолання маршруту у 2021 році необхідно шукати інші пояснення. Але у будь-якому випадку результат тут

також виявився позитивним, хоча і не таким переконливим, як при поїздках плаваючого 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 за всіма можливими маршрутами з урахуванням наведених вище особливостей даних та алгоритмів TomTom зовсім не варто, так як не приведе до зрозумілих результатів. Тому використовувати дані TomTom доцільно іншим шляхом – через порівняння швидкості руху на досліджуваному фрагменті ВДМ за критерієм (3). Розпочати аналіз ефективності ПК доцільно із загальної оцінки швидкості руху ТЗ за всіма поїздками в обраному фрагменті. За даними TomTom помітно збільшення середньої швидкості 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, обладнаних навігаторами TomTom, а не всього ТП. Спочатку потрібно перевірити, чи не обумовлене це зростання виключно збільшенням частки ТЗ, обладнаних 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 в 2021 році на 6 %, при загальному збільшенні кількості проданих легковиків на 21% [16], що не свідчить на користь твердження про стрибок частки ТЗ, обладнаних навігатором TomTom у ТП. Але продажі 103 тис. нових легкових автомобілів – це лише 17 % всіх вперше зареєстрованих в Україні легковиків за даними сайту MIND [16]. У 2021 році український автопарк поповнили 517 400 легкових авто з пробігом, серед яких автомобілі Renault займають далеко не першу позицію, а тому не можуть суттєво підвищити частку навігаторів TomTom у ТП. Але ця кількість на 46% перевищує показники 2020 року та є абсолютним рекордом для країни [16]. Загалом автопарк країни у 2021 році поповнився на 620 тис. автомобілів, що майже втричі більше середньорічних обсягів зростання автопарку України у найкращі до кризові роки. Саме це зростання може бути однією з основних причин підвищення трафіку, якщо в 2021 році не спостерігався стрибок кількості проданих навігаторів TomTom. Перевірити це можливо за допомогою щорічного звіту компанії TomTom перед акціонерами, TomTom Annual Report 2021 [17].

Згідно цьому 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 зростання 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, то ж гіпотезу про зростання трафіку на просп. Науки виключно за рахунок частки автомобілів обладнаних 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 [18]. Вони показують, що рівень пробок у Харкові протягом 2021 року зріс з 43 до 46 %, що свідчить про те, що на поїздку в 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 рівню пробок можна пояснити його відносно невелике зростання по зрівнянню з підвищенням інтенсивності ТП на просп. Науки. Тим більше, що для зростання трафіку на проспекті існує додаткова причина, а саме 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 справедливим вважається твердження, що дані трафіку по навігаторах TomTom відображають загальні тенденції зміни ТП на просп. Науки та прилеглих вулицях у цілому.

Тобто на розглянутому фрагменті ВДМ за минулий період з січня 2021 року по січень 2022 року здійснювався не один, а два процеси – зростання інтенсивності ТП та 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 буде краще середнього значення. Причиною цьому є збільшення часу простою ТЗ в очікуванні можливості проїзду регульованих перехресть з жорсткими циклами, яке завжди супроводжує зростання інтенсивності руху 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 би цей план реалізовувався при тій самій 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 відобразить 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 залишилися незмінними після впровадження ЗХ. До таких ділянок, 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. Для швидкості ТЗ на цих ділянках зовсім не так важливі параметри циклу світлофорного регулювання, які є основним інструментом ОДР на розглянутому фрагменті ВДМ.

Значно більшою мірою від параметрів циклів світлофорного регулювання залежать ділянки другорядних вулиць на під'їздах до просп. Науки. 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 світлофорного циклу, 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 використати 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 відобразить зміни умов проїзду, обумовлені зростанням трафіку на перехрестях.

На цих ділянках відбулося зниження швидкості на 3,8 %, яке в умовах практичної сталості основних тактів другорядного напрямку для більшості перехресть, може бути пояснене тільки збільшенням трафіку на них, 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. Також слід зазначити невисоку сумарну протяжність таких ділянок ВДМ, що також необхідно враховувати.

Аналогічні попереднім результати отримані й на 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 й 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 [Webster]. Але цей ефект спостерігається також й на координованому фрагменті просп. Науки, що вимагає його обліку в оцінці ефективності безпосередньо ПК. Тут швидкість ТЗ досить не очікувано скоротилася менше – всього лиш на одну третину відсотка, хоча зростання трафіку виявилось навіть більшим, ніж на від'їздах від просп. Науки – близько 37 %. Такі зміни можна пояснити виключно позитивним впливом ПК, тим більше, що зростання трафіку потенційно більше впливає на швидкість ТЗ перед регульованими перехрестями, ніж на перших двох видах ділянок, де вплив світлофорного регулювання відсутній.

Встановлення реальних причин цього несподіваного явища можливо за рахунок тенденції змін у швидкості ТЗ, по мірі віддалення ділянок від проспекту. Справа в тому, що ПК вочевидь надає максимальний вплив на найближчі до проспекту ділянки, тоді як зростання інтенсивності ТП обумовлює збільшення довжини черг і, відповідно, більшою мірою впливає на віддалені від проспекту

ділянки, оскільки накопичення невеликої черги ТЗ перед світлофором за час забороненого сигналу є найпоширенішим випадком у роботі перехрестя. Але, результати не показали стійкої тенденції до прискореного або уповільненого падіння (зростання) швидкості ТЗ при віддаленні ділянки другорядної дороги від просп. Науки, що могло би свідчити про істотний вплив трафіку або ПК. Швидкість ТЗ на перших ділянках дещо збільшилася на 0,33 %, що може вважатися підтвердженням позитивного впливу ПК на другорядні напрями, 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 ТомТом, завдяки якому всі ці коливання є проявом випадковості не лише первинних даних, а й характеристик вибірки, тим більше, що всі ці коливання відбуваються близько до 0, навколо 1 %.

Зі всього цього аналізу очевидним стає факт, що швидкість руху ТЗ підверглась помітному впливу збільшеного трафіку на досліджуваному фрагменті ВДМ, тому розглядати її після впровадження ПК необхідно не відносно нуля, а відносно зміни швидкості, обумовленої підвищенням інтенсивності руху. У зв'язку з істотно більшою статистичною значущістю на від'їздах другорядних доріг від просп. Науки, сумарна протяжність яких дорівнює 1,32 км у зрівнянні з 0,27 км сумарної довжини ділянок розташованих безпосередньо на перехрестях, саме від'їзди другорядних доріг 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 такої основи порівняння, приведе до отримання заздалегідь гарантованої нижньої оцінки ефективності ПК. Стрибок трафіку може бути пояснений не лише зростанням рівня автомобілізації в Харкові, а й залученням додаткового ТП на просп. Науки, зумовленим покращенням умов проїзду до нього, як це зазначалося раніше. При рівній інтенсивності руху у 2021 та 2022 роках, в умовах припущення про однакове стартове навантаження на другорядних від'їздах від просп. Науки та власне на проспекті, 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. Це означає, що реальна оцінка ефекту може бути значно вище ніж нижня оцінка, 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 координованому фрагменті просп. Науки.

Але навіть мінімальна оцінка результативності цього заходу повністю підтверджує попередні висновки щодо високої ефективності жорсткої координації роботи світлофорів на просп. Науки. Така однозначна та висока результативність цього заходу, за мінімальних витрат на його реалізацію, однозначно свідчить на користь першочергового використання засобів магістральної координації у містах України по зрівнянню з розвитком систем адаптивного світлофорного регулювання.

## Висновки

Констатована у роботі недостатня адекватність імітаційних моделей реальному процесу, вимагає використання інших методів оцінки ефективності ПК та поширення переліку критеріїв ефективності, оскільки можливість визначення кількості зупинок ТЗ при подоланні фрагменту ВДМ є однією з переваг імітаційного експерименту та практично неможливе при використанні картографічних сервісів. Тому в роботі додатковими до комплексного критерію (1) прийняті часткові критерії часу поїздки (2) та швидкості руху ТЗ (3). Поширення списку доступних 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.

Поїздки плаваючого автомобіля до та після впровадження ЗХ показали, що робота ПК дозволила його водію практично в двічі скоротити час поїздки в обох напрямках руху ЗХ, з деякою перевагою прямого напрямку від вул. Мінською до

просп. Незалежності. Кількість зупинок при цьому скоротилася більш ніж на 70 % як у прямому, так й зворотному напрямі, також з невеликою перевагою прямого напрямку над зворотним. Результати поїздок переконливо свідчать про значну перевагу ПК над звичайним варіантом роботи СО на фрагменті просп. Науки, що координується, але вважати ці результати кінцевими не зовсім коректно, адже вони носять суб'єктивний характер.

При рівній інтенсивності руху в 2021 та 2022 роках, за умови припущення про однакове стартове навантаження на другорядних від'їздах від просп. Науки та власне на самому 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. Реальна оцінка цього ефекту має бути суттєво вищою, але вона залишилась не відомою.

Оцінка ефективності ПК на просп. Науки за обидвома способами 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 управління дорожнім рухом на основі локальних світлофорів, у зрівнянні зі створенням систем адаптивного світлофорного регулювання.

## Література

1. Горбачов П.Ф., Шевченко В.В., Свйчинський С.В. Визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до міської магістралі з координованим керуванням. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020. № 90. С. 144–154.
2. Signal Timing Manual. TRB, NCHRP Report 812, Washington, D. C., 2015. 317 P.
3. Qadri S.S.S.M., Gökçe M.A. and Öner E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities European Transport Research Review volume 12, Article number: 55 (2020) <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1>.
4. Deng, G. (2007). Simulation-based optimization doctoral dissertation, University of Wisconsin-Madison.
5. Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: Methods and applications. In S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Winters, & B. L. Nelson (Eds.), *Proceedings of the 1997 winter simulation conference*, (pp. 118-126).
6. Nguyen, P. T. M., Passow, B. N., & Yang, Y. (2016). Improving anytime behavior for traffic signal control optimization based on NSGA-II and local search. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, 4611-4618. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727804>.
7. Hatri, C. E. L., & Boumhidi, J. (2016). Q-learning based intelligent multiobjective particle swarm optimization of light control for traffic urban congestion management. In *2016 4th IEEE international colloquium on information science and technology (CiSt)*, (pp. 794-799).



<https://doi.org/10.1109/CIST.2016.7804996>.

8. Zheng, L., Xu, C., Jin, P. J., & Ran, B. (2019). Network-wide signal timing stochastic simulation optimization with environmental concerns. *Applied Soft Computing - Journal*, 77, 678-687. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.01.046>.
9. Baldi, S., Michailidis, I., Ntampasi, V., et al. (2019). A simulation-based traffic signal control for congested urban traffic networks. *Transportation Science*, 53, 6-20. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0754>.
10. Sropathi H.K., Gartner N.H. and Stamatiadis C. Uniform and Variable Bandwidth Arterial Progression Schemes, *Transportation Research Record*, No. 1494, 1995. pp. 135-145.
11. Gartner N.H. and Stamatiadis C. Concurrent Progression Schemes in Multiarterial Signal Networks Using Multiband, *Proceeding of 68th Annual Meeting in Institute of Transportation Engineers, Toronto, Ontario, Canada, 1998*. 14 P.
12. Yin Y., Liu H.X., Laval J.A., Lu X.Y., Li M., Pilachowski J., Zhang W.B. An Offset Refiner for Coordinated Actuated Signal Control Systems, *California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2007-2*, University of California, California, USA, 2007. 121 P.
13. Andalibian R., Tian Z. Signal Timing and Coordination Strategies Under Varying Traffic Demands. Nevada Department of Transportation. *NDOT Research Report No. 236-11-803*, 2012. 46 P.
14. Zhou Y., Jia S., Mao B., Ho T.K., and Wei W. An Arterial Signal Coordination Optimization Model for Trams Based on Modified AM-BAND. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Volume 2016, 10 P.
15. Fernandez R. Evolution of the TRANSYT model in a developing country. *Transport Research Part A Policy and Practice*, 40, 2006. pp. 386-398. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.008>.
16. За повний 2021 рік українці придбали 103 тис. нових автомобілів, що на 21% більше показника попереднього року (Топ 10 брендів). *ITCua*. Режим доступу: <https://itc.ua/news/za-povnij-2021-rik-ukrayinczi-pridbali-103-tis-novih-legkovih-avtomobiliv-shho-na-21-bilshe-pokaznika-poperednogo-roku/>
17. Кількість реєстрацій вживаних авто в Україні сягнула рекорду в 2021 році. *MIND*. Режим доступу: <https://mind.ua/news/20235025-kilkist-reestracij-vzhivanih-avto-v-ukrayini-syagnula-rekordu-v-2021-roci>.
18. TomTom Annual Report 2021, 122 p. Режим доступу: <https://corporate.tomtom.com/static-files/8fd1d5d2-0ecb-47b6-97b7-9c8017df91c2>.

## References

1. Horbachov P.F., Shevchenko V.V., Svichynskyi S.V. Determining the maximum threshold of saturation level for minor approaches to the arterial street with coordinated control. *Herald Kharkov National Automobile and Highway University*. 2020. № 90. PP. 144-154.
2. Signal Timing Manual. TRB, NCHRP Report 812, Washington, D. C., 2015. 317 P.
3. Qadri S.S.S.M., Gökçe M.A. and Öner E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European Transport Research Review*, volume 12, Article number: 55 (2020) <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1>.
4. Deng, G. (2007). Simulation-based optimization doctoral dissertation, University of Wisconsin-Madison.
5. Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: Methods and applications. In S. Andradottir, K.

- J. Healy, D. H. Winters, & B. L. Nelson (Eds.), Proceedings of the 1997 winter simulation conference, (pp. 118-126).
6. Nguyen, P. T. M., Passow, B. N., & Yang, Y. (2016). Improving anytime behavior for traffic signal control optimization based on NSGA-II and local search. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, 4611-4618. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727804>.
7. Hatri, C. E. L., & Boumhidi, J. (2016). Q-learning based intelligent multiobjective particle swarm optimization of light control for traffic urban congestion management. *In 2016 4th IEEE international colloquium on information science and technology (CIST)*, (pp. 794-799). <https://doi.org/10.1109/CIST.2016.7804996>.
8. Zheng, L., Xu, C., Jin, P. J., & Ran, B. (2019). Network-wide signal timing stochastic simulation optimization with environmental concerns. *Applied Soft Computing - Journal*, 77, 678-687. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.01.046>.
9. Baldi, S., Michailidis, I., Ntampasi, V., et al. (2019). A simulation-based traffic signal control for congested urban traffic networks. *Transportation Science*, 53, 6-20. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0754>.
10. Sropathi H.K., Gartner N.H. and Stamatiadis C. Uniform and Variable Bandwidth Arterial Progression Schemes, *Transportation Research Record*, No. 1494, 1995. pp. 135-145.
11. Gartner N.H. and Stamatiadis C. Concurrent Progression Schemes in Multiarterial Signal Networks Using Multiband, *Proceeding of 68th Annual Meeting in Institute of Transportation Engineers, Toronto, Ontario, Canada, 1998*. 14 P.
12. Yin Y., Liu H.X., Laval J.A., Lu X.Y., Li M., Pilachowski J., Zhang W.B. An Offset Refiner for Coordinated Actuated Signal Control Systems, *California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2007-2*, University of California, California, USA, 2007. 121 P.
13. Andalibian R., Tian Z. Signal Timing and Coordination Strategies Under Varying Traffic Demands. Nevada Department of Transportation. *NDOT Research Report No. 236-11-803*, 2012. 46 P.
14. Zhou Y., Jia S., Mao B., Ho T.K., and Wei W. An Arterial Signal Coordination Optimization Model for Trams Based on Modified AM-BAND. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Volume 2016, 10 P.
15. Fernandez R. Evolution of the TRANSYT model in a developing country. *Transport Research Part A Policy and Practice*, 40, 2006. pp. 386-398. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.008>.
16. За повний 2021 рік українці придбали 103 тис. нових автомобілів, що на 21% більше показника попереднього року (Топ 10 брендів). *ITCua*. Retrieved from: <https://itc.ua/news/za-povnij-2021-rik-ukrayinczi-pridbali-103-tis-novih-legkovih-avtomobiliv-shho-na-21-bilshe-pokaznika-poperednogo-roku/>
17. Кількість реєстрацій вживаних авто в Україні сягнула рекорду в 2021 році. *MIND*. Retrieved from: <https://mind.ua/news/20235025-kilkist-reestracij-vzhivanih-avto-v-ukrayini-syagnula-rekordu-v-2021-roci>.
18. TomTom Annual Report 2021, 122 p. Retrieved from: <https://corporate.tomtom.com/static-files/8fd1d5d2-0ecb-47b6-97b7-9c8017df91c2>.

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. П.Ф. Горбачов, завідувач кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна.

**Автор:** ШЕВЧЕНКО Володимир Вадимович  
аспірант кафедри транспортних систем і  
логістики  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет  
E-mail - vvshevchenko.25@gmail.com  
ID ORCID: <http://orcid.org/ua/0000-0002-7099-910X>

**EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE TRAFFIC LIGHT COORDINATION PLAN ON  
NAUKI AVENUE IN KHARKIV**

V. Shevchenko

Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

*The paper presents the results of evaluating the performance measures of the newly developed and implemented in practice plan for coordinating the work of six local traffic lights on a 1.8 km long fragment of Nauki Avenue in Kharkiv. The analysis of existing methods of coordinated traffic light management has shown that at present they do not provide high performance and are roughly equal in effect to adaptive traffic light management methods. The main instrument of evaluation was the comparison of the results of the application of new parameters of traffic lights operation on the fragment of the street and road network, surrounding the coordinated section, with the traffic situation existing before its implementation. For this purpose, a study of travel time and the number of vehicle stops at intersections was conducted using the "floating car" method, and the speed of vehicles was calculated using TomTom service data. Each of these methods has its own advantages and disadvantages, and therefore they complemented each other in assessing the direct impact of the coordination plan on the state of traffic management on the studied fragment of the road network. The dual evaluation of the performance measures proved to be very appropriate in light of the operating conditions of the coordinated fragment of Nauki Avenue and the road network around it, which recorded a significant increase in traffic intensity during 2021 and after the implementation of the coordination plan in early 2022. The evaluation of its effectiveness in both ways convincingly showed the high efficiency of this measure, in terms of the number of stops and travel time, and the TomTom service data showed that even with an increase in traffic volume by almost one and a half times, the speed of cars in general increased by more than 14%. Taking into account the minimal costs for the implementation of the coordination plan, this testifies in favor of the means of arterial coordination in the Ukraine cities, as a priority direction for the development of local traffic lights systems in comparison with the creation of adaptive traffic light control systems.*

**Keywords:** coordination of traffic lights, urban arterial, travel time, vehicle speed.