

# ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОГО НАПРЯМУ РОЗВИТКУ СИСТЕМ СВІТЛОФОРНОГО УПРАВЛІННЯ З ЖОРСТКИМИ ЦИКЛАМИ РЕГУЛЮВАННЯ

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Робота спрямована на визначення пріоритетів у розвитку мереж локальних світлофорних об'єктів, наявність яких є характерною для більшості міст України, задля чого проаналізовано сучасні методи світлофорного управління дорожнім рухом у містах. Велика кількість таких досліджень покладається на застосування сучасних механізмів прийняття рішень на основі обраної авторами евристики або переробки великих масивів даних за допомогою штучного інтелекту. Створені в результаті таких досліджень методи зазвичай демонструють деяке покращення характеристик руху транспортних засобів порівняно з його існуючим станом або базовими альтернативами, але не можуть претендувати на загальність та поширене застосування, а виглядають більше як чергова спроба знайти прийнятне рішення в організації дорожнього руху завдяки застосуванню методів, які непогано зарекомендували себе в інших сферах знання. В основній частині робіт у сфері світлофорного управління розглядають питання адаптивного управління окремими світлофорами або їхніми групами в містах та демонструють обмежену результативність, яка не перевищує ефективності методів координації роботи світлофорів. В той же час сумісне застосування методів координованого та адаптованого світлофорного управління приводить до значно більш високих результатів, що може свідчити на користь координації як першочергового напрямку розвитку систем локальних світлофорів.*

*До такого ж попереднього висновку приводять й результати порівняння ефективності локальних та координованих фрагментів вулично-дорожньої мережі, де не використовувались існуючі програмні засоби з простої або адаптованої координації, а також результати ручного налаштування планів координації. Але для остаточного вирішення питання першочерговості напрямів адаптивного чи координованого управління при розвитку систем локальних світлофорів, необхідне створення та реалізація нового методу координації, який дозволить переконливо засвідчити на її користь, як більш ефективного першого кроку на шляху від локальних світлофорів до розумного міста.*

**Ключові слова:** локальний світлофорний об'єкт, координація роботи світлофорів, адаптивне світлофорне управління, регульоване перехрестя, міська магістраль, вулично-дорожня мережа, транспортний засіб, транспортні потоки, інтенсивність руху.

## Вступ

Проблема розподілу в часі руху конкуруючих потоків учасників дорожнього руху є дуже поширеною по всьому світу та досі не має свого до кінця обґрунтованого і зрозумілого рішення навіть якщо взяти до уваги лише транспортні потоки (ТП). Особливо актуальною вона постає у містах, для яких характерною є висока інтенсивність руху (ІР) на багатьох фрагментах вулично-дорожньої мережі (ВДМ), а зробити всі перетини різних напрямів руху його учасників безперешкодними не можливо. Існує два основних засоби розділу часу між учасниками руху – надання абсолютного пріоритету комусь з них за допомогою Правил дорожнього руху (ПДР) або по чергове надання права перетину конфліктного простору за допомогою світлофорів, який у містах на цей час є основним. Базовим варіантом світлофорного управління (СУ) є жорстке регулювання рухом за заздалегідь визначеними світлофорними циклами (СЦ), яке є найбільш розповсюдженим в Україні та є основою для розвитку більш досконалих методів управління рухом, серед яких можливо виділити два конкуруючих напрями: адаптивне та координоване управління, кожний з цих напрямів має власні переваги та недоліки.

При адаптивному управлінні світлофорні об'єкти (СО) облаштовуються датчиками руху транспортних засобів (ТЗ) та програмним забезпеченням (ПЗ), яке реагує на поточну транспортну ситуацію на перехресті. Адаптивне СУ є більш корисним на ізольованих перехрестях з випадковим прибуттям учасників руху до нього, порівняно з жорстким регулюванням руху, і тут постає лише одне питання – високої вартості облаштування СО відповідним обладнанням.

Але далеко не всі СО в містах можуть вважатися ізольованими і може стати так, що з точки зору часу подолання відповідного фрагменту вулично-дорожньої мережі (ВДМ) сумісна скоординована робота декількох суміжних світлофорів буде більш ефективною ніж адаптація окремих СО під поточну ситуацію. Така можливість в першу чергу виникає на фрагментах міських магістралей (ММ) зі значними ТП. Вартість налаштування на сумісну роботу декількох СО є дуже скромною та можлива у локальному режимі роботи світлофорів, коли вона в основному складається лише з вартості GPS

синхронізаторів, а результатом координації може стати значне скорочення часу очікування можливості подолання кожного чергового перехрестя та часу поїздки в цілому.

Оскільки жорстке регулювання рухом є найбільш розповсюдженим в Україні, а швидке зростання рівня автомобілізації вимагає удосконалення систем організації дорожнього руху (ОДР) та підвищення пропускної спроможності ВДМ, вибір раціонального напрямку розвитку систем СУ з жорстким циклами регулювання є актуальною задачею для нашої країни на цей час.

Метою роботи є вибір найбільш ефективного напрямку розвитку міських систем СУ з жорстким циклами регулювання з двох альтернатив: адаптивного та координованого управління.

Для досягнення поставленої у нашій роботі мети, необхідно в першу чергу оцінити потенційну ефективність альтернативних методів СУ з точки зору їхньої результативності, оскільки вартість реалізації різних варіантів удосконалення роботи СО зазвичай залишається невідомою для читачів.

У першу чергу більшість сучасних робіт стосується питань створення стратегій СУ у режимі реального часу, з фактичними даними по великій мережі перехресть, що сприяє і без того високим обчислювальним вимогам для вирішення завдань розрахунку параметрів роботи СО. Тут автори роботи [1] відзначають, що через характер проблем з трафіком, важливим стає узгоджене керування СО на великій мережі перехресть, що ускладнює пошук раціонального рішення або навіть уявлення про нього.

Дуже поширеною в плануванні роботи СО стало застосування нечіткої логіки для налаштування їхньої роботи, наприклад у вигляді Q-навчання та нейронних мереж [2, 3], які привели авторів до отримання позитивних результатів в конкретних випадках. Але нажалі автори досліджень не наводять переконливих аргументів щодо доцільності поширеного використання розроблених підходів у загальній практиці ОДР.

Чжао та ін. [3], Ліп та ін. [2] розробили контролер світлофора на основі нечіткої логіки для ізолюваного транспортного перехрестя. На погляд авторів були отримані дуже обнадійливі результати з точки зору затворів, часу в дорозі тощо. Але згідно з [4, 5], контролери дорожнього руху на основі нечіткої логіки та машинного навчання не є економічно доцільними та вимагають великих інвестицій для їхнього налаштування та обслуговування.

Через конфлікт між різними цілями оптимізації параметрів СО, в деяких дослідженнях застосовувались багатоцільові моделі для вирішення цієї проблеми [3, 6, 7]. Серед них оптимізація пропускної спроможності (ПС) була загальною метою, крім цього популярними цілями були: мінімізація затримок ТЗ, часу зупинки та викидів шкідливих речовин транспортними засобами. Ю та ін. [6] використовували нечіткий компромісний підхід до програмування. У цьому підході різні вагові коефіцієнти були призначені для різних цілей оптимізації. Ці ваги можуть бути різними в залежності від стану коефіцієнта транспортного потоку. Після присвоєння ваг багатоцільова функція була перетворена в одну ціль, яка була вирішена. Отримані авторами цих робіт результати не претендують на загальність та поширене застосування, а виглядають як чергова спроба знайти прийнятне рішення завдяки застосуванню методів, які непогано зарекомендували себе в інших сферах знання. Проте підхід із застосуванням багатоцільової оптимізації є потенційно перспективним з точки зору узагальнення понять часу подорожі та кількості зупинок на шляху прямування ТЗ.

Моделі оптимізації на основі мікросимуляції у SimOpt, взагалі розглядаються як область, де методи оптимізації інтегруються з імітаційними моделями [4]. Мета полягає в тому, щоб знайти найкращі значення цільової змінної серед усіх можливостей без явної оцінки (моделювання) кожної з них [5]. Моделювання для параметрів СО дуже важливе, оскільки оцінку впливу незначних коливань у змінних рішення щодо параметрів СО без фактичної реалізації можна достатньо точно оцінити за допомогою мікросимуляції. Але, окрім разового характеру цих робіт, залишаються ще питання реальності використаної імітаційної моделі.

Однією із стратегій оптимізації трафіку в міських районах є використання інтелектуальних транспортних систем, які полегшують вирішення складних проблем за допомогою штучних нейронних мереж, які претендують на те, щоб бути наступником штучного інтелекту [8].

Додатково до описаних вище підходів, які мають спільні риси та можуть бути поєднані у деякі підгрупи, існує також низка індивідуальних досліджень, які ставлять за мету покращення роботи СО. Але проаналізовані у огляді [8] дослідження не надали відповіді на питання про найбільш ефективний напрям розвитку систем СУ у містах. Більшість проаналізованих робіт розглядають налаштування адаптивних СО на забезпечення адекватної реакції світлофорів на динамічний характер ТП, у тому числі на мережах, де функціонує декілька світлофорних об'єктів. Але вважати доведеною більшу перспективність адаптивного СУ порівняно з координованою роботою СО, у тому числі у жорсткому режимі регулювання, при цьому не можливо. Про потенційно високу перспективність координації

свідчать деякі джерела, наприклад – звіт [9], де планом розвитку штату Каліфорнія передбачена 100-відсоткова координація для усіх видів ММ з СУ. Для перевірки можливості покращення умов руху транспорту на фрагментах ВДМ міст за допомогою координації роботи декількох суміжних світлофорів, необхідно додатково проаналізувати існуючі у світі методи побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів та визначити їхню ефективність.

### Результати дослідження

Більше 50 років потому вчені вже намагалися дати відповідь на питання щодо ефективності конкуруючих векторів розвитку систем СУ та висловились на користь першочергового налаштування СО на координовану роботу. Так, досвід канадського міста Торонто [10] свідчить, що в умовах централізованої системи управління СО міста, найбільше скорочення часу поїздки досягається за рахунок жорсткої координації роботи світлофорів. Аналогічні дослідження, проведені у Глазго [11], показали, що координована схема управління зменшила середній час у дорозі на 12%. Але, на цей час згадані дослідження вже мало відомі та переважним вважається адаптивний шлях розвитку систем організації дорожнього руху (ОДР) у містах. При цьому очевидно, що перехід на адаптоване керування можливий і на скоординованих СО та потенційно може тут бути навіть більш ефективним, ніж у найпростішому локальному випадку, без координації.

Розвиток методів координованого СУ продовжувався весь цей час та була здійснена досить велика кількість спроб різних авторів створити ще невідомий до них та ефективний метод координації роботи СО. Вони відображені у всіх основних видах джерел наукової інформації: патентах; наукових звітах; наукових статтях; дисертаціях та нормативних документах – державних або регіональних методичних керівництвах з ОДР. Зважаючи на доведений до практичного застосування рівень методик у нормативних документах та наукову вагу дисертацій, вони аналізуються спочатку окремо від інших джерел.

Почати огляд варто з патенту США № 3 305 828 від 19 лютого 1967 року на координовану систему управління світлофорами (Progressive traffic signal control system) [12]. На його початку описані сформульовані до подачі цього винаходу та досить очевидні загальні правила створення координованої ділянки ММ: розрахунок загальної тривалості циклу для всіх перехресть координованої ділянки; вибір максимального з них як загального циклу для всіх СО та визначення відносних зсувів початку циклу на черговому перехресті, для яких існує три варіанти: час проїзду ділянки у прямому або зворотному напрямках та їхнє середнє значення. Сам винахід стосується розширення переліку зсувів, у яких автори враховують зміну часу проїзду ділянки внаслідок коливань інтенсивності ТП та є уточненням базової методики, а не її перетворенням.

Все, як здається з опису в [12], дуже просто – розраховуються тривалості циклів для всіх перехресть координованої ділянки, обирається максимальний з них, визначаються відносні зсуви моментів початку роботи циклів у залежності від довжини ділянки і зелена хвиля (ЗХ) працює. Але нормативні документи зі сфери ОДР не дають не лише таких однозначних, а навіть просто чітких вказівок щодо побудови ЗХ.

Автори НСМ [13] стверджують, що у загальному випадку координація СО підвищує швидкість руху та рівень обслуговування ТЗ, але сама по собі не підвищує ПС ММ. Керівництво містить багато згадок про координацію, як про фактор ОДР (практично всюди мається на увазі її лінійний варіант), але конкретні вказівки на послідовність дій у процесі координації в ньому відсутні. Також відсутні приклади координованого СУ, хоча взагалі керівництво створено з використанням великої кількості прикладів за всіма іншими темами.

Канадське керівництво з ОДР [14] лише ділиться деякими міркуваннями відносно цього процесу на зразок того, що довжина узгодженого циклу на координованій ділянці мережі може й перевищувати тривалість критичного циклу на її максимально завантаженому перехресті або, що виділена фаза для лівого повороту може полегшити створення ПК. Тут же згадуються зупинки громадського транспорту і наводяться попередження, що операції з сигналом у прямому напрямі впливають на перехрестя у зворотному напрямі та нарощують черги на них навіть до блокування фрагменту мережі [14].

Наступне американське керівництво, підготовлене в рамках національної кооперативної програми дослідження доріг та стосується безпосередньо розрахунку параметрів роботи СО [15], містить у собі основну просторово-часову діаграму (ПЧД), яка є головним інструментом відображення та ручного налаштування ПК на цей час, оскільки застосовувалась багато разів різними спеціалістами в різних країнах, рис. 1.

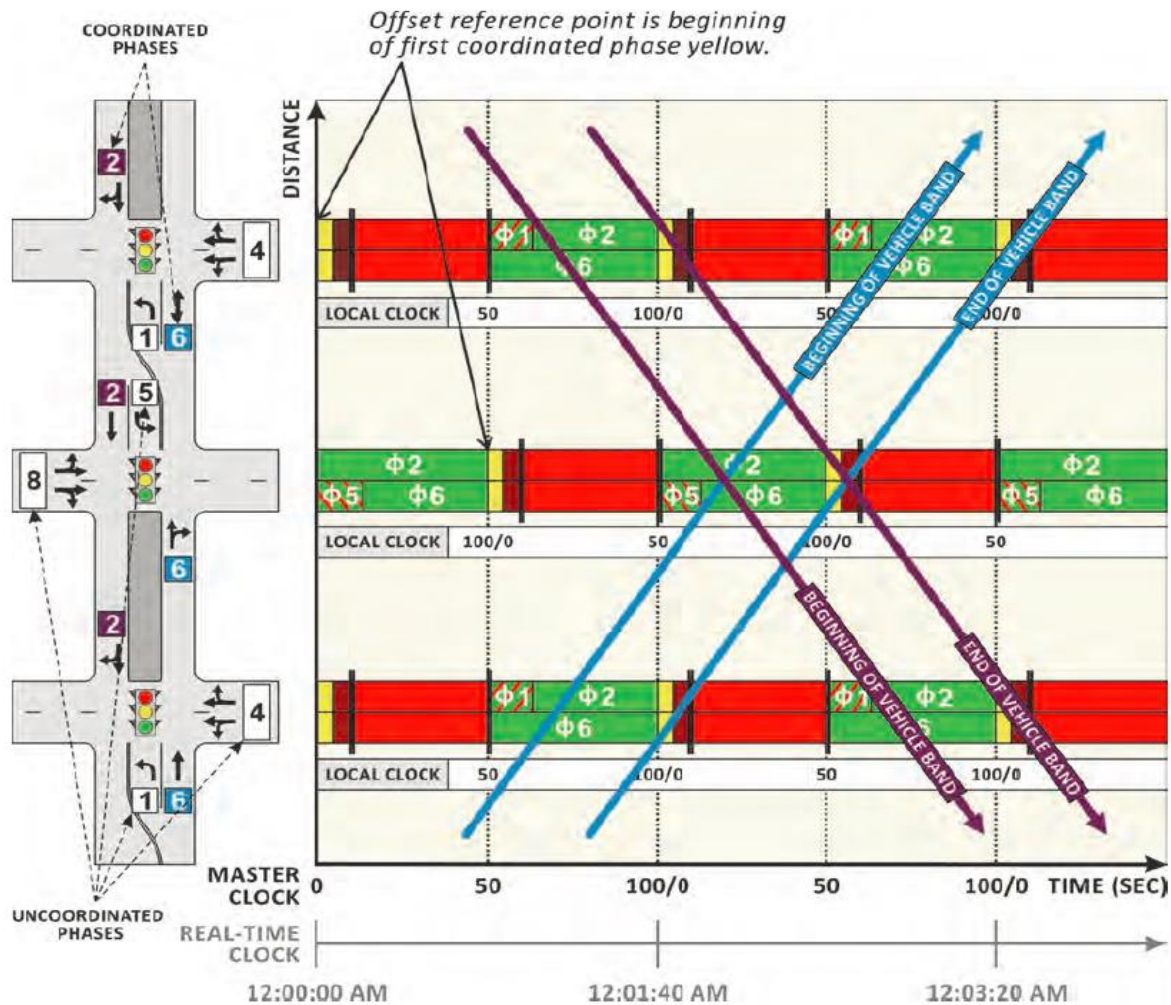


Рис. 1. Просторово-часова діаграма

Тут же штрихуванням показані виділені фази для виконання лівого повороту з ділянки ММ, що координується, а ще один рисунок з керівництва демонструє додаткові можливості для налаштування ЗХ, які надає лівий поворот, але не супроводжується вказівками щодо порядку використання цих можливостей.

Автори також наполягають на особливій значущості ліній, які відображають межі ТЗ, що рухаються у ЗХ, тобто на ширині смуги ЗХ, та пропонують використовувати для розрахунку зсувів максимально дозволена швидкість руху або її 85-й перцентиль. Потім у керівництві [15] наводяться вказівки щодо влаштування коридору для ЗХ, які можна вважати основною частиною інструкції з побудови ЗХ: ПС залежить від вибраної швидкості руху ЗХ; ПС може бути різною для кожного напрямку руху; коли до ЗХ додаються перетини, забезпечити її безперервний рух стає все важче та іноді краще розбити довгий коридор на менші сегменти у зручних місцях, особливо на великих перегонах між перехрестями. Потім сегменти можна об'єднати, вибравши взаємозв'язок зміщення між окремо оптимізованими сегментами, що, як правило, забезпечує хороший рух в одному напрямку. Такий підхід називається запрограмованою зупинкою; під час періодів перенавантаження розрахована ПС не буде забезпечуватися через вплив черг; залежно від обсягів трафіку, плани координації, які налаштовані на максимальну ширину смуги ЗХ, можуть збільшити затримки у мережі через збільшення затримки для некоординованих напрямів руху.

Автори [15] також відзначають, що смуга ЗХ є її ідеалізованим відображенням, оскільки в ній явно не враховуються: прискорення ТЗ від стоп-лінії; розсіювання ТЗ у процесі руху від одного перехрестя до наступного; ТЗ, які накопичуються на перехрестях протягом заборонного сигналу для ЗХ.

Однак вони не наводять вказівок на те, яким чином подолати ці складнощі та не відповідають на декілька важливих для побудови ЗХ питань: яким чином обрати ширину смуги ЗХ, які перехрестя слід включати до ЗХ, як обирати прямий та зворотний напрям руху ЗХ та що робити у випадках, коли ЗХ у зворотному напрямку не будується автоматично? Останнє питання є дуже важливим та мабуть основним у всій побудові, оскільки зсуви початку циклів на перехрестях ЗХ у прямому напрямі

автоматично задають моменти початку циклів у зворотному напрямі і результат побудови для нього у загальному випадку, особливо коли довжини перегонів на ділянці не рівні між собою, буде практично завжди невдалим.

Замість цього автори керівництва [15] пропонують використовувати для розрахунку тривалості циклів на перехрестях формулу Вебстера [16], хоча вона створена для умов випадкового прибуття ТЗ до перехрестя, що при розрахунку параметрів ЗХ з груповим рухом ТЗ по ММ не може вважатися прийнятним.

Такий рівень формалізації не є достатнім та мабуть саме це є причиною того, що координована робота СО на ММ ще не стала загальноприйнятним у світі правилом ОДР, що також відображається і на методах СК рухом ТП, які застосовуються у містах нашої країни.

Австралійське керівництво з ОДР [17] містить у собі перелік переваг координованого СК: скорочення часу в дорозі та затримок; зменшення кількості зупинок; покращену ПС близько розташованих сигналізованих перехресть; зниження рівня шуму, забруднення повітря та споживання енергії (палива); збільшення ПС ВДМ.

Автори [17] стверджують, що ці переваги є результатом координації, коли світлофори розташовуються на послідовних перехрестях, відстань між якими менша ніж один кілометр. Для визначення тривалості циклів вони також пропонують користуватися формулою Вебстера [16] або її австралійськими похідними [18, 19] але, на відміну від американських колег, вони вважають доцільним використовувати для неосновних перехресть цикли з половиною тривалості максимального значення. Автори також припускають наявність негативних зсувів та навіть ілюструють це рисунком, що викликає деяке здивування, внаслідок того, що з математичної точки зору зсув не може виходити за межі часового інтервалу довжиною у тривалість циклу.

У керівництві [17] приводиться ПЧД лінійної координації з ортогонально перетвореними осями та стверджується, що кожний характерний період доби вимагає власного ПК внаслідок різниці у ТП та вводиться до числа ПК, окрім жорстких та напіваадаптивних ПК, повністю адаптивна координація. Параметри ПК рекомендується визначати за допомогою спеціалізованого ПЗ TRANSYT або LinSig, але стверджується, що жорсткі ПК рідко використовуються в Австралії та Новій Зеландії, оскільки адаптивні системи контролю дорожнього руху були успішно розгорнуті у цих країнах. Тобто у цих країнах був обраний шлях першочергового розвитку адаптивних СО, для яких потім почали створюватися ПК, для чого використовується програми SCOOT та SCAT.

Додатково до керівництв з ОДР, підготовлених на державному рівні, існує багато керівництв (частіше всього у США), підготовлених місцевими органами влади, наприклад [20]. Але автору не вдалося знайти в них згадок про розвиток методів створення ПК або про їхнє успішне застосування, а тому наступним кроком пошуку стає перегляд останніх дисертацій на цю тему в хронологічному порядку.

Автор опублікованої в Німеччині дисертації [21] пропонує перед початком створення ПК розбити ВДМ на сектори та стверджує, що такий шлях приводить до скорочення часу поїздки на 10%, це було визначено за допомогою мікромоделювання у SUMO, що свідчить на користь першочергового застосування методів координації в міських системах СУ.

Наступна дисертація інженера-електрика з США [22] підтверджує постійний інтерес дослідників до теми створення ПК, але відноситься до суміжної сфери досліджень та не додає нових знань у процес побудови ПК.

Керування трафіком за допомогою методу нейронно-нечіткового навчання із підкріпленням вперше представлено з теоретичної точки зору автором дисертації [23]. За оцінкою автора вони можуть підвищити швидкість ТЗ та зменшити затримки порівняно з оптимізованим скоординованим СУ, але отримані результати не довели цей метод до практичного застосування.

Необхідність покращення роботи багатьох СО у США підкреслюється в роботі [24], де досліджується вплив швидкості ЗХ на результати її роботи. Автор пропонує оцінювати якість побудови ПК за допомогою загальноприйнятої ПЧД та у більшості випадків знаходить варіанти покращення діючих ПК, що свідчить про недостатню результативність цього процесу сьогодні.

Ще в одній дисертації [25] стверджується, що координація сигналів світлофора є стандартною практикою в інженерії дорожнього руху США, що свідчить на користь розвитку цього напрямку ОДР в Україні. Сама робота присвячена випадковому характеру ЗХ, що може бути корисним продовженням розвитку координованих систем СУ у містах.

Робота [26] стала продовженням зусиль Н. Гартнера з розвитку методів створення ПК, але замість аналітичних підходів, які він використовував раніше, зараз ним пропонується ПЗ, яке дозволяє

налаштувати функціонування ЗХ з елементами адаптації, що є цікавим напрямком розвитку методів координації.

У роботі [27] за рахунок інтеграції ПЗ Paramics із Synchro та TRANSYT-7F був створений інструмент для більш точної настройки зміщень сигналу, щоб підвищити плавність руху в односторонній або двосторонній координації. Уточнювач зсувів є простим у застосуванні, його можна запускати періодично або разом із системою моніторингу продуктивності. Наявність таких інструментів свідчить про недостатню ефективність початкових ПК.

Автор роботи [28] відзначає, що методи, які максимізують ширину ЗХ не обов'язково зменшують затримки ТЗ, та для їх зменшення пропонує використовувати сурогатний метод безперервної оптимізації на основі градієнта, одночасно оновлюючи фактичний стан системи. Це може бути доцільним при наявності систем спостереження за СО на ділянці ММ, що координується, але такий підхід є здебільшого емпіричним та не створює методичну основу, необхідну для побудови ПК.

Чилійський вчений Fernandez [29] ділиться досвідом використання програм TRANSYT та SCOOT у своїй країні. Вони потребували суттєвого налаштування на місцеві умови, що дозволило отримати за суб'єктивною оцінкою автора позитивні результати їх застосування. Основним засобом впровадження координованого СУ стали СО з жорсткими циклами – 1410 з 1750 одиниць, що свідчить на користь першочергового розвитку світлофорної координації у країнах, що розвиваються.

Удосконалення існуючого ПК за допомогою інформації з координаційної діаграми Пердю розглядається в статті [30] та звіті [31], де показано, що за рахунок більш тонкого вибору зсуву початку циклу можливо покращити ПК. За рахунок зміни зсувів початку циклів у ЗХ, автори спромоглись знизити час поїздки на 28 %. Нові зсуви були визначені емпірично, а такий результат достатньо переконливо свідчить про низьку ефективність базового ПК та широкі можливості проектувальників у створенні ПК вручну. У подальшому дослідженні [32] автори з'ясували, що таке покращення умов руху не привело до перерозподілу ТП, але цей висновок не є кінцевим.

Науковий звіт [33] про використання мобільного зв'язку для відстеження ТП та створення економічної системи вимірювання ефективності артерій. Стверджується, що створений у роботі ПК є надійним для широкого інтервалу інтенсивності ТП, що свідчить на користь застосування жорстких ПК.

Автори звіту [34] розробили вказівки щодо доцільності використання адаптації або координації в залежності від відсотка зупинок на ділянці ММ з локальними СО. На основі імітаційного експерименту в середовищі VISSIM вони стверджують, що адаптація є однозначно переважною, якщо початкова частка зупинок менша 20 %, координація – більша 50 %. У проміжному випадку необхідно застосувати інженерне рішення, щоб вирішити, чи потрібна координація. Ці висновки можуть бути корисними орієнтирами для інженерів-практиків, які вирішують питання ОДР у своїй щоденній діяльності.

У математичній статті [35] стверджується, що дисперсія пачки ЗХ є основою для координації роботи світлофорів у міській ВДМ, що може вважатися коректним за умови існування обґрунтованої методики координації та моделі оцінки часу очікування при груповому прибутті. Результати цього та попередніх досліджень [36–38] є достатньо корисними для кінцевого налаштування ПК.

Автори роботи [39] підійшли до питання координації ММ з чистого листа, та постарались оцінити її потенційну ефективність. Результати виявилися скромними, час поїздки скоротився на 12,7 % для ТП, що рухається по магістралі, та 2,4 % – для всіх ТЗ в імітації, що не зовсім свідчить на користь ПК, але й вважати цю роботу за кращу, яка відкриває всі потенційні можливості координації також не варто.

Ще один колектив авторів з Італії [40] вводить власні визначення координації і синхронізації СО. Координацією вони вважають визначення виключно зсувів для заздалегідь визначених циклів, синхронізацією – визначення зсувів сумісно з розрахунком циклів. Тут виникає багато питань як до цих визначень, так і до результатів їх застосування: як можливо координувати СО з різними циклами, наприклад. Автори вважають, що глобальна задача синхронізації не має стійких і унікальних рішень та вибір алгоритму і власні спроможності дослідників можуть сильно вплинути на ефективність використовуваного підходу.

У роботі [41] запропонована модель оптимізації координації артеріальних сигналів для руху трамваїв на основі асиметричного багато діапазонного методу (AMBAND). Дослідження прикладу у VISSIM показують, що час у дорозі трамваїв зменшується із планом сигналу від BAM-TRAMBAND. Застосований підхід є ще одною спробою застосування математичних методів до задачі координації СО.

Переконливі результати координації, які здатні поставити крапку у конкуренції між адаптацією та координацією наводяться у роботі [42], де затримки наскрізного ТП по ММ зменшилася на 52,8 % для ТЗ у прямій ЗХ та на 46,83 % для зустрічних ТЗ. Але вони стають скромнішими при розгляді всіх

напрямів руху – від 13,88 % при низькому, до 3,50 % при високому навантаженні. Крім того, в роботі враховано DDI (Diverging diamond interchanges), нові схеми планування перехресть при побудові ПК. Не до кінця доведені переваги таких перехресть також знижують переконливість отриманих результатів.

Прикладами сучасного рівня усвідомлення процесу світлофорної координації можуть вважатися роботи [43] з Індії та [44] з Бразилії, автори яких створили власні ПК. Тривалість циклів в роботі [43] визначалась за допомогою формули Вебстера [16], зсуви розраховували в одному напрямі, на основі середньої швидкості руху. Автори роботи [44] своїм основним досягненням вважають використання першого доданку з формули затримки Вебстера [16], як оцінки затримки при координації. Враховуючі, що мова першоджерел не є перешкодою для авторів цих статей, слід вважати їх появу підтвердженням недостатнього рівня методичних розробок у сфері створення планів координації на цей час.

Загальними рисами більшості відносно недавніх робіт, які потрапили до огляду, є бажання авторів покращити вже існуючі методи координації СУ та дуже скромні результати впровадження створених ПК або їх оцінок, отриманих за допомогою імітаційного моделювання.

Основною причиною такого стану виглядає недостатньо висока ефективність існуючих ПЗ з магістральної або мережевої координації, яка викликана спробами розробників цих методів створити загальнодоступний всім виконавцям інструмент розробки ПК за допомогою комп'ютеру, що було та залишається загальною тенденцією розвитку методів транспортного планування. При такому підході, на жаль, авторам не завжди доступне опанування тонкими особливостями задач, які вирішуються, що залишає значні резерви для отримання більш ефективних рішень та знижує ефективність машинних методів. У кінцевому результаті така практика призвела до не завжди переконливих результатів та обмеженого застосування методів координації роботи СО у світі, яка поширилась й на Україну. Хоча навіть така обмежена ефективність координації нічим не гірша за доведену на практиці ефективність адаптивних методів СУ, а тому може вважатися більш конкурентоспроможною, завдяки значно меншій вартості реалізації.

Але для остаточного вирішення питання першочерговості напрямів адаптивного чи координованого управління при розвитку систем локального СУ необхідна розробка та реалізація нового методу створення ПК, який відкриє потенційні можливості координованої роботи світлофорів та дозволить переконливо засвідчити на користь координації, як потенційно більш ефективного першого кроку на шляху від локальних СО до розумного міста.

### Висновки

Основним напрямом розвитку методів СУ дорожнім рухом у містах є застосування сучасних алгоритмів та механізмів прийняття рішень на основі обраної авторами евристики або переробки великих масивів даних. Виконані в цьому напрямі роботи демонструють зазвичай деяке покращення ОДР порівняно з його існуючим станом або базовими альтернативами. Але вважати ці покращення переконливим доказом ефективності цих методів не варто, бо вони досягаються у тому числі за рахунок багатьох внутрішніх налаштувань, які не носять загального характеру. Проаналізовані у цьому напрямі роботи до того ж є дуже складними, не прояснюють внутрішньої структури об'єкта керування та не можуть претендувати на поширене практичне застосування.

Більша частина робіт у сфері СУ стосується питань адаптивного керування окремими або декількома СО у містах та демонструє вкрай обмежену ефективність, яку автори намагаються не дуже висвітлювати, але знайти серед результатів скорочення часу поїздок, яке хоча б наближувалося до 10 %, вкрай важко. В той же час сумісне застосування методів координованого та адаптованого СУ може приводити до значно більш високих результатів, що може свідчити на користь координації як першочергового напрямку розвитку систем локального СУ.

У значній кількості робіт, які безпосередньо стосуються питань координації СО у містах, також робляться спроби застосування комп'ютерних методів прийняття рішень, які все ж таки не приводять до дуже високих результатів. Але велика кількість спроб покращити існуючі та доведені до практичного застосування методи звичайної або адаптованої координації, свідчить про їхню недосконалість, яка може бути причиною, що призвела до більшої затребуваності адаптивних методів СУ порівняно з координацією СО. Натомість порівняння ефективності локальних та координованих фрагментів ВДМ, де ці методи не використовувались та результати ручного налаштування ПК свідчать про високу потенційну ефективність координації, як інструменту підвищення ефективності роботи ізолюваних СО.

Але навіть така, обмежена ефективність координації не виглядає гірше доведеною на практиці, ніж ефективність адаптивних методів СУ, а тому може вважатися більш конкурентоспроможною, завдяки

потенційно меншій вартості реалізації на базі локальної мережі СО. Але для остаточного вирішення питання першочерговості напрямів адаптивного чи координованого управління при розвитку систем локального СУ, необхідна розробка та реалізація нового методу створення ПК, який дозволить переконливо засвідчити користь координації, як потенційно більш ефективного першого кроку на шляху від локальних СО до розумного міста.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Qadri S.S.S.M., “State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities”, *European Transport Research Review*, vol. 12, no. 55, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1>.
- [2] Jin, J., Ma, X., & Kosonen, I. “An intelligent control system for traffic lights with simulation-based evaluation”, *Control Engineering Practice*, no. 58, pp. 24-33, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.09.009>.
- [3] Zhao, H., Han, G., & Niu, X. “The signal control optimization of road intersections with slow traffic based on improved PSO”, *Mobile Networks and Applications*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01225-7>.
- [4] Deng, G. “Simulation-based optimization doctoral dissertation”. University of Wisconsin-Madison, 2007.
- [5] Carson, Y., & Maria, A. “Simulation optimization: Methods and applications”, in Proceedings of the 1997 winter simulation conference, S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Winters, & B. L. Nelson (Eds.), pp. 118-126, 1997.
- [6] Yu, D., Tian, X., Xing, X., & Gao, S. “Signal timing optimization based on fuzzy compromise programming for isolated signalized intersection”, *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1682394>.
- [7] Jia, H., Lin, Y., Luo, Q., et al. “Multi-objective optimization of urban road intersection signal timing based on particle swarm optimization algorithm”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, pp. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1177/1687814019842498>.
- [8] Venayagamoorthy, G. K. “A successful interdisciplinary course on computational intelligence”, *IEEE Computer Intelligence Magnet*, vol. 4, is. 1, pp. 14-23, 2009. <https://doi.org/10.1109/MCI.2008.930983>
- [9] Shaheen S., Young T., Sperling D., Jordan D., Horan T. Identification and Prioritization of Environmentally Beneficial Intelligent Transportation Technologies. Berkeley: Institute of Transportation Studies of University of California. Working Paper UCD-ITS-RR-98-01. 1998. 291 P.
- [10] Cass S. Signal Networks, “Through Traffic Engineering Proceedings” in Conference on Improved Street Utilization., Washington D.C., USA, pp. 127–143, 1967.
- [11] Hillier J.A. “Glasgow's Experiment in Area Traffic Control”, *Traffic Engineering and Control*, no. 7(8 & 9), pp. 502-509 & 569-571, 1965 & 1966.
- [12] USA Patent # 3 305 828 of 19 February 1967 "Progressive traffic signal control system".
- [13] Highway Capacity Manual. Washington, D. C.: TRB, National Research Council, 2000, 1207 p.
- [14] Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Ottawa: Institute of Transportation Engineers, 2008, 232 p.
- [15] Signal Timing Manual. Washington, D. C.: TRB, NCHRP Report 812, 2015, 317 p.
- [16] Webster F.V. Traffic Signal Settings / Road Research Technical Paper No. 39, Department of Scientific and Industrial Research, London, 1958, 45 p.
- [17] Guide to Traffic Management Part 9: Transport Control Systems – Strategies and Operations. Austroads Publication No. AGTM09-20, 2020, 271 p.
- [18] Miller A. J. “Australian road capacity guide: provisional introduction and signalized intersections”, bulletin no. 4, Australian Road Research Board, Vermont South Vic., 1968, 44 p.
- [19] Akçelik R. Traffic signals: capacity and timing analysis, ARR 123, Australian Road Research Board, Vermont South Vic., 1981, 123 p.
- [20] Traffic Control Signal Design Manual. Connecticut Department of Transportation Bureau of Engineering and Construction Division of Traffic Engineering, 2009, 201 p.
- [21] Ting Lu M.E. “Dynamic Network-Wide Traffic Signal Optimization” Civil Engineering, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany. 2015. 170 p.
- [22] Abdelghaffar H.M. “Developing and Testing a Novel De-centralized Cycle-free Game Theoretic Traffic Signal Controller: A Traffic Efficiency and Environmental Perspective” Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2018, 143 p.
- [23] Xie Y. “Development and Evaluation of an Arterial Adaptive Traffic Signal Control System Using Reinforcement Learning”, Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, 2007, 166 P.
- [24] Yue R. “Determination of Progression Speeds for Traffic Signal Coordination”, Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, USA. 2020. 88 P.
- [25] Farzaneh M. “Modeling traffic dispersion”, Civil Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2005, 131 p.
- [26] Gartner N.H. OPAC: Strategy for Demand-responsive Decentralized Traffic Signal Control. Paris, France, IFAC Proceedings Volumes, 1990. pp. 499-503.
- [27] 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.
- [28] Adacher L. “A global optimization approach to solve the traffic signal synchronization problem”, in 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation EWGT 2012 Proceedings, Paris, France, pp. 1270-1277, 2012.
- [29] Fernandez R. “Evolution of the TRANSYT model in a developing country”, *Transport Research Part A Policy and Practice*, no. 40, 2006. pp. 386-398. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.008>.
- [30] Day C. M., Haseman R., Premachandra H., Brennan T. M., Jr., Wasson J. S., Sturdevant J. R. and Bullock D. M. “Evaluation of Arterial Signal Coordination. Methodologies for Visualizing High-Resolution Event Data and Measuring Travel Time”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2192, pp. 37-49, 2010.
- [31] Day C. M., Brennan T. M., Jr., Premachandra H., Hainen A.M., Remias S.M., Sturdevant J.R., Richards G., Wasson J.S. and Bullock D.M. “Quantifying Benefits of Traffic Signal Retiming”, in Final Report of Joint Transportation Research Program FHWA/IN/JTRP-2010/22, Purdue University, 2010. 67 P.



- [32] Day C.M., Brennan T.M., Jr., Premachandra H., Sturdevant J.R., Richards G., Wasson J.S. and Bullock D.M. Visualization and Assessment of Arterial Progression Quality Using High Resolution Signal Event Data and Measured Travel Time. Purdue University: Purdue e-Pubs, 2010. 30 p. <http://docs.lib.purdue.edu/civeng/8>.
- [33] Li M., Zhang L., Song M.K., Wu G., Zhang W.B., Zhang L. and Yin Y. "Improving Performance of Coordinated Signal Control Systems Using Signal and Loop Data", in Final Report for TO 6332, University of California + University of Florida, USA, 2010. 129 p.
- [34] 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.
- [35] Wei M., Jin W., and Shen L. A Platoon Dispersion Model Based on a Truncated Normal Distribution of Speed. Journal of Applied Mathematics, 2012. 13 P. <https://doi.org/10.1155/2012/727839>
- [36] M. J. Lighthill and G. B. Whitham, "On kinematic waves: a theory of traffic flow on long crowded roads", in Proceedings of the Royal Society of London A, vol. 229, no. 1178, pp. 317-345, 1955.
- [37] Wong S.C. and Wong G.C.K. "An analytical shock-fitting algorithm for LWR kinematic wave model embedded with linear speed-density relationship", Transportation Research B, vol. 36, no. 8, pp. 683-706, 2002.
- [38] Zhang P., Wong S.C. and Dai S.Q. "A conserved higher-order anisotropic traffic flow model: description of equilibrium and non-equilibrium flows", Transportation Research B, vol. 43, no. 5, pp. 562-574, 2009.
- [39] Fusco G., Bielli M., Cipriani E., Gori S., Nigro M. "Signal Settings Synchronization and Dynamic Traffic Modelling", European Transport (Trasporti Europei), is. 53, no. 7, 25 p, 2013.
- [40] Cantarella G.E., R. Di Pace, S. Memoli and S. de Luca. "The Network Signal Setting Problem: The Coordination Approach vs. The Synchronisation Approach", in Proceeding of 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim, 2013, 6 p. DOI: 10.1109/UKSim.2013.99.
- [41] 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.
- [42] Kim S.R., Warchol S., Schroeder B.J. and Cunningham C. "Innovative Method for Remotely Fine-Tuning Offsets Along a Diverging Diamond Interchange Corridor", Transportation Research Record, no. 2557, pp. 33-43, 2016.
- [43] Rane V., Goliya H.S., Sanwaliya P. and Faraz M.I. "Synchronization of Signalized Intersection from Rasoma to High Court in Indore District", International Journal of Scientific and Research Publications, vol. 6, is. 4, pp. 112-116, 2016.
- [44] Leal S.S., de Almeida P.E.M., Chung E. "Active control for traffic lights in regions and corridors: an approach based on evolutionary computation", in World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. Transportation Research Proceeding, vol. 25, pp. 1769-1780, 2017.

**Шевченко Володимир Вадимович** – аспірант, кафедра транспортних систем і логістики, e-mail: [yvshevchenko.25@gmail.com](mailto:yvshevchenko.25@gmail.com)

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

## Justification of effective direction to develop control systems of traffic lights with fixed cycles

Kharkov National Automobile and Highway University

*The study aims to determine priorities in the development of networks of fixed time traffic lights, the presence of which is feature of most Ukraine cities. A large number of studies on the problem of traffic light control in cities rely on the use of modern decision-making mechanisms based on the heuristics chosen by the authors or the processing of large data sets using artificial intelligence. The methods created as a result of such studies usually demonstrate some improvement in the performance of traffic control compared to its existing state or basic alternatives, but cannot claim generality and widespread application, and look more like another attempt to find an acceptable solution in the control of road traffic through the application of methods that have proven themselves well in other areas of knowledge. The main part of the work in the field of traffic light control is devoted to the issues of adaptive management of isolated traffic lights or their groups in cities and demonstrates limited effectiveness, which does not exceed the performances of the methods of traffic light coordination. At the same time, the combined application of the methods of coordinated and adapted traffic light management leads to significantly higher results, which can testify in favor of coordination as a priority direction for the development of isolated traffic light systems.*

*The results of comparing the efficiency of isolated and coordinated fragments of the street-road network, where existing software tools for simple or adapted coordination were not used, as well as the results of manual adjustment of coordination plans, lead to the same preliminary conclusion. But for the final solution to the issue of the priority of adaptive or coordinated control directions in the development of isolated traffic light systems, it is necessary to create and implement a new method of coordination, which will allow convincing evidence in its favor as a more effective first step on the way from isolated traffic lights to a smart city.*

**Key words:** isolated traffic lights, coordination of traffic lights, actuated traffic light control, signalized intersection, city highway, street-road network, vehicle, traffic flows, traffic flow rate.

**Shevchenko Volodymyr** – Postgraduate Student, The Department of Transportation Systems and Logistics, e-mail: [yvshevchenko.25@gmail.com](mailto:yvshevchenko.25@gmail.com)