© Любий Є.В. 2022

УДК 656.051
UDC 656.051

Любий Є.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ПЛАНІВ КООРДИНАЦІЇ СВІТЛОФОРНИХ ОБ'ЄКТІВ

На цей час вже опублікована велика кількість робіт в сфері координації роботи світлофорів, що відображає велику цікавість дослідників до цієї теми та описує результати величезної роботи, яка виконана в цьому напрямку. Значна та неспадаюча інтенсивність публікацій у цій сфері також демонструє, що інтерес дослідників до питань координації руху транспортних потоків спостерігається аж до сьогодення.

У роботі представлено результати аналізу методів розробки планів координації світлофорних об'єктів на ділянках вулично-дорожньої мережі. Встановлено, що для переважної більшості проаналізованих методів характерною рисою є відсутність уваги їх розробників до питань рівномірності руху пачки зеленої хвилі по координованих фрагментах міської вулично-дорожньої мережі, що також свідчить про не зовсім глибоке занурення дослідників у тему координації, яке викликане тим, що ще не до кінця вирішені її базові та головні питання: визначення раціональних параметрів циклів світлофорного регулювання та ефективних зсувів їх початку, з урахуванням додаткових транспортних засобів, які збираються перед стоп-лінією перехрестя за час сигналу світлофору, що забороняє рух по координованій міській магістралі.

Результати проведеного дослідження повинні стати основним підгрунтям для розробки нових методів отримання ефективних планів координації на ділянках вулично-дорожньої мережі міст, які б враховували основні проблемні питання їх формування, а саме: організація рівномірного руху транспортного потоку координованої ділянки вулично-дорожньої мережі; гармонізація швидкості руху пачки зеленої хвилі; взаємодія пачки зеленої хвилі з додатковими транспортними засобами, що накопичуються перед стоп-лінією чергового координованого перехрестя, а також залишками інших пачок зеленої хвилі, що не встигли подолати фрагмент міської магістралі за час дозвільного сигналу світлофора.

Ключові слова: дорожній рух, ефективність, зелена хвиля, план координації, транспортний потік.

ВСТУП

Проблема розподілу в часі конкуруючих потоків учасників дорожнього руху є дуже поширеною по всьому світу та досі не має свого до кінця обґрунтованого і зрозумілого рішення навіть якщо приймати до уваги лише транспортні потоки (ТП). Вона стає особливо актуальною в містах, для яких характерною є висока інтенсивність руху на багатьох ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ), а зробити всі перетини різних напрямів руху його учасників безперешкодними не можливо. На найбільш завантажених перетинах вулиць основним засобом організації дорожнього руху (ОДР) є світлофорне керування (СК), а якщо світлофори розташовані неподалік один від одного, то ефективною практикою стає координація роботи таких світлофорів з метою організації максимально безперешкодного проїзду транспортних засобів (ТЗ) в одному або декількох напрямах руху – «зелена хвиля» (ЗХ).

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Забезпечення швидкого та безпечного руху ТП у сучасних містах потребує запровадження комплексу заходів архітектурно-планувального та організаційного характеру. До перших можна віднести будівництво та реконструкцію вулиць, проїздів і магістралей, будівництво транспортних перетинів у різних рівнях, об'їзних доріг навколо міст для відведення транзитного трафіку тощо [1]. В свою чергу, організаційні заходи сприяють упорядкуванню руху на вже існуючій ВДМ, до яких можна віднести введення одностороннього та кругового руху на перехрестях, організацію пішохідних переходів та пішохідних зон та ін. Також слід розуміти, що при реалізації заходів з ОДР в містах особлива роль належить використанню технічних засобів: дорожніх знаків і розмітки, світлофорних об'єктів (СО), напрямних пристроїв та ін. При цьому світлофорне регулювання (СР) вважається одним із основних засобів забезпечення безпеки руху на перехрестях, а найбільш поширеним способом управління ТП в містах є координоване керування (КК) на окремих міських магістралях (ММ), введення якого дозволяє скоротити витрати часу на пересування транспортною мережею та зменшити кількість зупинок автомобілів [2].

Існує велика кількість досліджень у сфері СК, що мають тенденцію до постійного розширення [3], у цих дослідженнях можна виділити три основних підходи до вирішення поставлених задач: аналітичні методи, мікросимуляція об'єкту керування та моделі на основі обчислювального інтелекту.

Аналітичні підходи до вирішення питань організації СР міськими ТП в останні роки практично

повністю витиснені евристичними методами, що обумовлюється складністю даних питань внаслідок великої кількості взаємодій в об'єктах управління, якими на цей час в основному виступають фрагменти ВДМ або ділянки ММ.

Методологічною основою досліджень у даному напрямі в останні роки стали методи мікросимуляції та штучний інтелект, що обумовлюється бажанням дослідників отримати дієві інструменти керування ТП у містах з мінімальною участю людини в процесі прийняття рішень. Але вони не в змозі гарантувати загальність отриманих рішень та надати зрозуміле пояснення процесів, які відбуваються у транспортних системах.

Але слід зауважити, що все ж таки, необхідно продовжувати пошук аналітичних залежностей для вирішення питань, які виникають у процесах транспортного планування, оскільки лише аналітичні моделі надають можливості для повного розуміння процесів, які властиві будь-якому об'єкту дослідження.

До цього слід додати, що в останні часи також помітно зростає кількість досліджень, які стосуються використання автономних ТЗ і технологій, наприклад [4]. Такі дослідження вивчають виключно загальну сферу того, наскільки автономні ТЗ є безпечними, ефективними, екологічно чистими тощо. Однак не вдалося віднайти дослідження, результати яких підтверджували користь від автономних ТЗ для пов'язаних із ними технологій оптимізації роботи СО.

Існуючі дослідження з проблематики визначення параметрів СК не містять в собі відповіді на питання про найбільш ефективний напрям розвитку цих систем в містах. Більшість робіт присвячена налаштуванню адаптивних СО на забезпечення адекватної реакції світлофорів на динамічний характер ТП, у тому числі в мережах, де функціонує декілька СО. Але вважати доведеною більшу перспективність адаптивного СК в порівнянні з координованою роботою СО, навіть у жорсткому режимі регулювання, при цьому, не можна. Практичний досвід авторів цього дослідження свідчить про необхідність перевірки можливостей координації роботи світлофорів хоча би тому, що цей шлях є зрозумілим і доступним для можливостей більшості міських бюджетів в Україні. Про теж свідчать деякі джерела, наприклад звіт [5], де планом розвитку штату Каліфорнія передбачена 100-відсоткова координація для усіх видів ММ зі СК.

Для перевірки можливості покращення умов руху транспорту на фрагментах ВДМ міст за допомогою координації роботи декількох суміжних світлофорів, необхідно визначитися власне з методом координації. Першим кроком на цьому шляху є аналіз існуючих у світі методів побудови планів магістральної та мережевої координації світлофорів.

Почати огляд варто з патенту США №3 305 828 від 19 лютого 1967 року на прогресивну систему управління світлофорами (Progressive traffic signal control system) [6]. На його початку описані сформульовані вимоги до подачі цього винаходу та достатньо очевидні загальні правила створення координованої ділянки ММ, а саме, розрахунок загальної тривалості циклу для всіх перехресть координованої ділянки, вибір максимального з них як загального для всіх СО циклу та визначення відносних зсувів початку циклу на черговому перехресті, для яких, в свою чергу, існує три варіанти: час проїзду ділянки у зустрічних напрямах та їх середнє значення. Сам винахід присвячений розширенню переліку зсувів, у яких автори враховують зміну часу проїзду ділянки внаслідок коливань інтенсивності ТП та відноситься до уточнень базової методики, а не до її перетворення.

Все, як здається з опису в [6], дуже просто – розраховуєш тривалості циклів для всіх перехресть координованої ділянки, обираєш максимальну з них, визначаєш відносні зсуви моментів початку роботи циклів у залежності від довжини ділянки і ЗХ поїхала. Але нормативні документи сфери ОДР не надають таких однозначних та навіть чітких вказівок щодо побудови ЗХ.

У НСМ [7] стверджується, що у загальному випадку координація СО підвищує швидкість руху та рівень обслуговування ТЗ, але сама по собі не підвищує пропускну спроможність 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 в процесі координації в ньому відсутні. Також відсутні приклади координованого СК, хоча взагалі-то керівництво створено з використанням великої кількості прикладів за всіма іншими темами.

Канадське керівництво з ОДР [8] лише ділиться деякими міркуваннями відносно цього процесу на кшталт 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 плану координації (ПК). Тут же згадуються зупинки громадського транспорту та наводяться попередження, що операції з сигналом у

прямому напрямі впливають на перехрестя в зворотному напрямі та нарощують черги на них навіть до блокування фрагменту мережі [8].

Наступне американське керівництво, яке підготовлене в рамках національної кооперативної програми дослідження доріг та присвячене безпосередньо розрахунку параметрів роботи СО [9], містить у собі основну просторово-часову діаграму (ПЧД). ПЧД є головним інструментом відображення та ручного налаштування ПК не цей час, оскільки застосовувалась багато разів різними спеціалістами в різних країнах.

Автори також наполягають на особливій значущості ліній, які відображають межі пачки ТЗ, що рухаються в ЗХ, тобто на ширині смуги ЗХ, та пропонують використовувати для розрахунку зсувів максимально дозволену швидкість руху або її 85-й перцентиль. Потім у керівництві [9] наводяться вказівки щодо влаштування коридору для ЗХ, які можна вважати основною частиною інструкції з її побудови:

- пропускна спроможність залежить від обраної швидкості руху ЗХ;
- пропускна спроможність може бути різною для кожного напрямку руху;
- коли до ЗХ додаються перехрестя, то забезпечити її безперервний рух стає все важче та іноді краще розбити довгий коридор на менші сегменти у зручних місцях, особливо на великих ділянках 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 розрахункова пропускна спроможність 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.

Також автори [9] 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 забороняючого 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 напряму 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, а результат побудови для нього у загальному випадку, особливо коли довжини перегонів на ділянці координації не рівні між собою, буде практично завжди поганим.

Замість цього автори керівництва [9] пропонують використовувати для розрахунку тривалості циклів на перехрестях формулу Вебстера [10], хоча й 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 можна вважати достатнім і мабуть це призводить до того, що координована робота СО на ММ ще не стала загальноприйнятним правилом ОДР, що також відображається і на методах СК рухом ТП, які застосовуються у містах нашої країни.

Інше керівництво з ОДР [11] містить у собі перелік переваг координованого СК:

- скорочення часу в дорозі та затримок;
- зменшення кількості зупинок;
- покращену пропускну спроможність близько розташованих сигналізованих перехресть;
- зниження рівня шуму, забруднення повітря та споживання енергії (палива);
- збільшення пропускної спроможності ВДМ.

Автори [11] стверджують, що ці переваги є результатом координації, коли світлофори розташовуються на послідовних перехрестях, відстань між якими менше за кілометр. Для визначення тривалості циклів вони також пропонують користуватися формулою Вебстера [10] або її австралійськими похідними [12, 13], але на відміну від американських колег, вони пропонують 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 математично зсув не може виходити за межі інтервалу довжиною у тривалість циклу.

У керівництві приводиться ПЧД лінійної координації з ортогонально перетвореними осями. Стверджується, що кожний характерний період доби вимагає власного плану координації внаслідок різниці у ТП та вводять до ПК, окрім жорстких та напівадаптивних ПК, повністю адаптивну координацію. Параметри ПК рекомендується визначати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (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 в цих країнах. Тобто у них був обраний шлях першочергового розвитку адаптивних СО, для яких потім почали створюватися ПК, для чого, в свою чергу, використовуються інші програми SCOOT та SCAT. Також відзначається, що застосування цих програм може скорочувати до 30 % час проїзду через координовану ділянку та скорочувати кількість зупинок аж на 40 % від їх початкової кількості (без координації). Як перспективний напрям розвитку методів створення ПК австралійські спеціалісти рекомендують мультимодальну координацію [14]. Можна вважати, що з їх точки зору, всі принципові питання координації успішно вирішені та потрібно рухатися у напрямі поглибленого налаштування ПК, чому взагалі-то суперечать багаточисленні спроби удосконалення існуючих методів координації, які робляться у світі. Нажаль серед доступних на офіційному сайті агенції Austroads матеріалів не зустрічаються описи реально реалізованих ПК, які могли би підтвердити правоту австралійських спеціалістів та засвідчити досконаліть існуючого ПЗ з розробки ПК в містах.

Додатково до керівництв з ОДР, підготовлених на державному рівні, існує (в основному в США) багато керівництв, підготовлених місцевими органами влади, наприклад [15]. Але автором не представлено згадок про розвиток методів створення ПК або про їх успішне застосування.

Дисертація [16], присвячена врахуванню маршрутних автобусів у ПК та [17], де розроблено метод динамічної оптимізації ширини смуги ЗХ. В обох роботах результати порівнювались з базовим методом MAXBAND, який був створений у 1966 році [17], модифікувався потім багато разів [18-21] та навіть привів до появи програм-аналогів [22], залишаючи при цьому основні риси цього методу – пошук оптимальних зсувів початку циклів для досягнення максимальної ширини смуг ЗХ при двохфазних циклах на СО вздовж ММ. Ця програма є результатом спроб застосування математичних методів оптимізації для побудови планів світлофорної координації [23-25], які також породили програми SCOOT і TRANSYT [26] та менш розповсюджені SIGOP [27] та [28], наприклад. Обидві моделі TRANSYT і SCOOT засновані на концепції циклічних профілів потоку, які є мірою середнього потоку ТЗ у один бік повз будь-якої обраної точки на дорозі протягом кожної частини часу циклу наступного СО [29]. Основнім критерієм оптимізації у MAXBAND є ефективність хвилі (Progression Efficiency), тобто частка ширини смуги ЗХ у світлофорному циклі, що не може вважатися повністю обґрунтованим та прийнятним. SCOOT і TRANSYT мінімізують довжину черги та кількість зупинок, для чого використовують циклічні профілі потоку [30], але цей підхід також не є до кінця обґрунтованим та, можливо, саме це призводить до скромних результатів впровадження ПК, створених за допомогою TRANSYT [31, 32].

Характерне для авторів згаданих у попередньому абзаці робіт бажання отримати швидке аналітичне рішення питання не завжди здатне привести до виявлення дієвих інструментів покращення умов руху на координованих ділянках ММ, в цілому пояснює обмежене використання таких методів у світовій практиці та відсутність переконливих результатів їх застосування.

В іншій дисертації на здобуття ступеню магістра, підготовленій Zheng J. [33] базовий ПК вважається створеним за допомогою ПЧД. Робота присвячена налаштуванню напівадаптивної ЗХ на поточні параметри функціонування ММ, яке у даному дослідженні не розглядається.

Автор виконаної у Німеччині дисертації [34] пропонує перед початком створення ПК розбити ВДМ на сектори та стверджує, що такий шлях призводить до скорочення часу поїздки на 10 %, що було визначене за допомогою мікромоделювання у SUMO. Робота не містить у собі відповідей на основні питання формування ПК.

Дисертація на здобуття ступеню магістра [35] присвячена застосуванню теорії ігор для визначення зсувів, які зменшують дисперсію затримок ТЗ на координованій ділянці, що є черговою та не зовсім успішною спробою отримання швидкого результату за рахунок застосування вже відомого інструментарію для створення ПК.

Наступна дисертація інженера-електрика з США [36] 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 з підкріпленням вперше представлено з теоретичної точки зору автором дисертації [37]. За оцінкою автора вони можуть підвищити швидкість ТЗ та зменшити затримки порівняно з оптимізованим скоординованим СК, але отримані результати не довели цей метод до практичного застосування.

Необхідність покращення роботи багатьох СО у США підкреслюється в роботі [38], 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 на сьогодні.

Ще в одній дисертації [39] стверджується, що координація сигналів світлофора є стандартною практикою в інженерії дорожнього руху США, що свідчить на користь розвитку цього напряму ОДР в Україні. Сама робота присвячена випадковому характеру пачки ЗХ, що може бути корисним для продовження цього дослідження.

Робота [40] стала продовженням зусиль автора 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 продовженням процесу координації.

Науковий звіт [41] також присвячений ефективному використанню адаптивних контролерів у скоординованій системі контролю дорожнього руху для чого, за ствердженням авторів потрібний добрий план жорсткої координації, створений за допомогою ПЧД, що є прийнятною для умов України послідовністю. Його автори відзначають особливу важливість питання вибору тривалості циклу в ПК та стверджують, що координація є більш ефективним методом удосконалення роботи СО ніж їх адаптація, хоча не приводять кількісного обґрунтування для цього висновку та не оговорюють умов, де воно є вірним.

Ще дві роботи Н. Гартнера зі співавторами [42, 43] є черговими кроками у розвитку аналітичних методів створення ПК з використанням «ефективності хвилі» як критерію оптимізації. У [42] автори наводять порівняльну характеристику використання різних методів координації U-Band, MAXBAND, V-Band та MultiBAND, отриману за допомогою ПЗ NETSIM, яка для всіх варіантів не виглядає дуже доброю, так як кількість зупинок у всіх випадках перевищує 50 %. Ці дані можуть стати непоганою основою для порівняння з іншими випадками координації.

Наступна робота за тим же авторством [44] присвячена мережевій, а не магістральній координації за допомогою розробленого ПЗ, яка очікувано привела авторів до отримання позитивних результатів у зрівнянні з існуючим на той час ПЗ координації. Для максимізації ширини смуги ЗХ використовувалось змішане цілісне програмування, але автори не наводять кількісних характеристик альтернативних ПК.

У роботі [45] за рахунок інтеграції ПЗ Paramics із Synchro та TRANSYT-7F був створений інструмент для більш точного налаштування 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 [46] відзначає, що методи, які максимізують ширину ЗХ не обов'язково зменшують затримки ТЗ і 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 більш емпіричним та не створює методичну основу, необхідну для побудови ПК.

Чилійський вчений Fernandez [47] 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 СК стали СО з жорсткими циклами – 1410 з 1750 одиниць, що свідчить на користь першочергового розвитку світлофорної координації у країнах, що розвиваються.

Робота [48] є прикладом застосування відомого підходу до питання організації дорожнього руху. У даному випадку машинне навчання Q-learning застосовується за допомогою MAX-BAND до адаптивного та координованого світлофорного керування ділянкою ММ з трьома СО. Отримані авторами результати не можуть претендувати на широке застосування.

У статті [49] німецьких авторів представлено розподілений підхід до динамічної координації світлофорів, який ґрунтується на локально доступних даних про дорожній рух та комунікації між сусідніми перехрестями, який є евристичним шляхом для досягнення поставлених авторами цілей:

скорочення часу поїздки та кількості зупинок. Результати прогонів на штучних об'єктах не дозволяють вважати доцільним подальше використання запропонованого механізму СК.

В дослідженні [50] пропонується використовувати поточні дані про потік насічення, рівень навантаження та якість прогресії для оцінки стану координованої ділянки ММ та визначення необхідності корегування плану жорсткої світлофорної координації.

Структурно-генетичний алгоритм рішення задачі нелінійного програмування пропонується італійськими вченими для створення раціонального плану магістральної координації []. Основним досягненням авторів стало скорочення часу обчислення ПК, чого недостатньо для повторного використання цього методу.

Удосконаленню існуючого ПК за допомогою інформації з координаційної діаграми Пердью присвячені стаття [52] та звіт [53], де показано, що за рахунок більш тонкого вибору зсуву початку циклу можливо покращення. За рахунок зміни зсувів початку циклів у ЗХ, автори спроміглись скоротити час поїздки на 28 %. Нові зсуви були визначені емпірично, а такий результат свідчить про низьку ефективність базового ПК та широкі можливості проектувальників у їх створенні вручну. У подальших дослідженнях [54] автори з'ясували, що таке покращення умов руху не привело до перерозподілу ТП, але цей висновок не є кінцевим.

Науковий звіт [55] присвячений використанню мобільного зв'язку для відстеження ТП та створенню економічної системи вимірювання ефективності ММ. Стверджується, що створений в роботі ПК є надійним для широкого інтервалу інтенсивності ТП, що свідчить на користь жорстких ПК.

Китайські спеціалісти, враховуючи місцеві особливості, в роботі [56] доповнюють завдання ОДР на перехресті метою забезпечення безпеки взаємодії моторизованих та велосипедних потоків. Поставлене завдання вони вирішують за допомогою методів нелінійного програмування та пропонують поширити отриману модель на скоординовані перехрестя, не надаючи переконливих аргументів.

Автори звіту [57] 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 менше 20 %, координація – більше 50 %. У проміжному випадку необхідно застосувати інженерне рішення, щоб вирішити, чи потрібна координація. Ці висновки можуть бути корисними орієнтирами для практичних інженерів з ОДР в містах.

У математичній статті [58] 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 [59-62] є цілком корисними для кінцевого налаштування ПК.

Автори роботи [63] підійшли до питання координації ММ з чистого листа, та намагалися оцінити її потенційну ефективність. Результати виявилися більш ніж скромними, час поїздки скоротився на 12,7 % для ТП, що рухається по магістралі та 2,4 % – для всіх ТЗ в імітації, що не свідчить на користь ПК.

Ще один колектив авторів з Італії [64] вводить власні визначення координації та 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 можна координувати СО з різними циклами, наприклад. Автори вважають, що глобальна задача синхронізації немає стійких і унікальних рішень та вибір алгоритму і власні здатності дослідників можуть сильно вплинути на ефективність використовуваного підходу.

Практичним застосуванням роботи Zheng J. [33] став звіт [65], присвячений налаштуванню зсувів і зелених фаз на поточні ТП. Для точного налаштування зміщень сигналу пропонується та перевіряється практична процедура побудови ПЧД. Наводиться економія часу в 4 % після тонкого налаштування. Принципово нових результатів звіт [65] у собі не містить.

Схожим за результатами з попереднім, є звіт [66], присвячений використанню поточних даних, отриманих з системи SMART-SIGNAL та детекторів OASIS, що може стати в нагоді при адаптованому налаштування ПК.

У роботі [67] запропонована модель оптимізації координації артеріальних сигналів для руху трамваїв на основі асиметричного багатодіапазонного методу (AMBAND). Дослідження прикладу у VISSIM показують, що час у дорозі трамваїв зменшується з планом сигналу від BAM-TRAMBAND.

Застосований підхід є ще однією спробою застосування математичних методів до задачі координації СО.

Переконливі результати координації, які здатні поставити крапку в конкуренції між адаптацією та координацією наводяться в роботі [68], де затримки наскрізного ТП по міській магістралі 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, робота присвячена врахуванню DDI (Diverging diamond interchanges), нових схем планування перехресть, при побудові ПК. Не до кінця доведені переваги таких перехресть також знижують переконливість координації.

Прикладами сучасного рівня усвідомлення процесу світлофорної координації можуть вважатися роботи [69] з Індії та [70] з Бразилії, автори яких створили власні ПК. Тривалість циклів в роботі [69] визначалась за допомогою формули Вебстера [10], зсуви розраховували в одному напрямі, на основі середньої швидкості руху. Автори роботи [70] своїм основним досягненням вважають використання першого доданку з формули затримки Вебстера [10] як оцінки затримки при координації. Враховуючи, що мова джерел не є перешкодою для авторів цих статей, слід вважати їх підтвердженням недостатнього рівня розробок у сфері створення ПК на цей час.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної статті є проведення аналізу сучасних методів формування ПК СО на ММ. Результати проведеного аналізу повинні стати основним підґрунтям для розробки нових методів отримання ефективних ПК на ММ, які б враховували основні проблемні питання їх формування: врахування додаткових ТЗ, які з'являються з другорядних напрямків та накопичуються перед стоп-лінією координованого СО; взаємодія цих додаткових ТЗ з пачкою ТЗ ЗХ, гармонізація швидкості пачки ТЗ ЗХ та ін.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати проведеного аналізу свідчать, що на даний час в більшості існуючих методах формування ПК СО вже підіймаються питання врахування додаткових ТЗ на ділянках координованих магістралей, гармонізації швидкості пачки ЗХ та пропускної спроможності магістралі, а також оцінки часу необхідного для розгону автомобілів, що збираються перед стоп-лінією з прилеглих територій та другорядних напрямків. Але, нажаль, відповіді на них представлені лише в теорії та без надійного і ґрунтовного практичного підтвердження. Тому врахування всієї специфіки руху ТЗ на координованих та примикаючих до них ділянках магістралей є одним із основних завдань при розробці ефективних ПК.

Одним з основних оптимізаційній критеріїв при формуванні ПК є затримки ТЗ на СО, кількість зупинок ТЗ та час поїздки, методологічна основа визначення яких, на даний час, вже достатньо повно формалізована як з використанням аналітичних залежностей, так і з використанням імітаційних моделей. Але слід розуміти, що на величину затримок ТЗ, які рухаються координованою ділянкою магістралі, суттєвий вплив мають додаткові ТЗ, що виїжджають на ділянку магістралі перед світлофором з другорядних напрямків попереднього перехрестя або з прилеглих територій. Тому завдання їх врахування є необхідною та обов'язковою умовою при визначенні оптимальних параметрів роботи координованих СО на ММ.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Питання визначення раціональних значень цих параметрів є на цей час не до кінця вирішеними та наукова робота над розвитком нових методик СК ще активно продовжується із застосуванням різноманітних підходів. У цьому напрямі можна виділити два конкуруючих вектори розвитку систем СК на базі жорсткого регулювання: адаптивне та координоване керування.

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

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

значне скорочення часу очікування можливості подолання кожного чергового перехрестя та часу слідування взагалі.

Слід також відзначити, що результати проаналізованих досліджень не надають зрозумілих відповідей на ефективні напрями розвитку систем СК в містах, а більшість робіт присвячена налаштуванню адаптивних СО на забезпечення адекватної реакції світлофорів на динамічний характер ТП, у тому числі в мережах, де функціонує декілька СО. При цьому не можна вважати доведеним до кінцевого вирішення питання щодо більшої перспективності адаптивного СК по зрівнянню з координованою роботою світлофорів, навіть у жорсткому режимі регулювання.

ВИСНОВКИ

На цей час у світі опублікована велика кількість робіт в сфері координації роботи світлофорів у містах, що відображає значний інтерес транспортних дослідників до цієї теми та описує результати величезної роботи, яка виконана в цьому напрямку. Вона привела до створення декількох програмних засобів жорсткої та адаптивної координації, які використовуються в різних країнах світу в практичній діяльності органів влади, відповідальних за ОДР в містах. Але значна та неспадаюча інтенсивність публікацій у цій сфері також демонструє, що інтерес дослідників до питань координації руху ТП спостерігається аж до сьогодення. А це, разом з першочерговим розвитком в багатьох країнах значно більш коштовних адаптивних систем СК, свідчить про не дуже високу ефективність існуючих методів створення ПК та необхідність їх подальшого удосконалення.

Проаналізовані методичні керівництва з ОДР різних країн світу пропонують для створення ПК використовувати ПЧД лінійної координації, хоча при цьому визнають її занадто спрощений характер, не надають чітких рекомендацій стосовно особливостей її практичного використання, а також, при цьому, рекомендують використовувати не достатньо обґрунтовану в умовах групового руху ТЗ ММ формулу Вебстера або її похідних для розрахунку тривалості циклів СО. Іншим варіантом координації є використання існуючого на цей час ПЗ для жорсткої або адаптивної координації, які також використовують спрощені моделі для створення ПК.

Результати проаналізованих дисертаційних робіт направлені на отримання швидких рішень щодо формування ефективних ПК. В основному, в цих роботах проводиться пошук оптимальних зсувів початку циклів для досягнення максимальної ширини смуги ЗХ для чого використовуються ПЧД, положення теорії ігор, елементи нейронно-нечіткого навчання та інші підходи. Роботи направлені на вирішення локальних задач СК, не враховують умови створення та руху пачки ЗХ ММ і не завжди є доведеними до практичного застосування. Наукову цікавість щодо розвитку методів формування ефективних ПК в українських містах, в рамках аналізу дисертаційних робіт, викликають дослідження, де розглядається випадковий характер створення та руху пачки ЗХ.

Більшістю авторів наукових звітів і статей зроблено спроби щодо удосконалення існуючих підходів формування ПК за рахунок використання як стандартних (аналітичні моделі, лінійне програмування, діаграма Пердью та ін.), так і «екзотичних» (машинне навчання, структурно-генетичний алгоритм нелінійного програмування, метод стада планктону, метод рою та ін.) для вирішення таких завдань методів, але їх результати не отримали глибокого розповсюдження та використовувались лише для уточнення та коригування існуючих ПК. Роботи деяких авторів направлені на розробку власних ПК, для чого використовується існуюче та розробляється нове ПЗ, а також інформація про дорожній рух координованою ділянкою ММ, дані мобільного зв'язку за відстеженням руху ТП, дані зі смарт систем і детекторів. Велика кількість авторів схиляються до того, що перед адаптацією СО потрібен хороший (ефективний) план жорсткої координації, для створення якого доцільно використовувати ПЧД. В свою чергу, кількісної оцінки переваг жорсткої координації над адаптацією СО або навпаки, в роботах не представлено. Також серйозній критиці піддається існуюче ПЗ для формування ПК.

Результати аналізу методів формування ПК свідчать лише про деклараційний характер вирішення в них проблеми врахування додаткових ТЗ, які мають суттєвий вплив як на формування самої пачки ЗХ, так і на її швидкість, загальні затримки ТП, а також ПС ділянки координованої магістралі. До цього слід додати незначну увагу дослідників до питань рівномірності руху пачки ЗХ координованою ділянкою ММ. За основні оптимізаційні критерії, які, при цьому, найчастіше використовують часові затримки ТЗ на координованій ділянці магістралі, час поїздки та кількість зупинок.

Обмежене використання аналітичних моделей для координації руху в світовій практиці та відсутність переконливих результатів їх застосування не є перепоною для їхнього використання для опису взаємодії пачки ЗХ та додаткових ТЗ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Vukan R. Vuchic. Transportation for Livable Cities. – CUPR/Transaction, 1999. 376 p.

2. Горбачов П.Ф. Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць із трифазним циклом регулювання / П.Ф. Горбачов, О.В. Макарічев, В.В. Шевченко // Автомобільний транспорт. Збірник науков. праць. – Вип. 44. – Харків, 2019. – С. 30-39. https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30.

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. Garg, D., Chli, M., & Vogiatzis, G. Deep reinforcement learning for autonomous traffic light control. In 2018 3rd IEEE international conference on intelligent transportation engineering, ICITE 2018, pp. 214-218. https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492537.

5. Shaheen S., Young T., Sperling D., Jordan D., Horan T. Identification and Prioritization of Environmentally Beneficial Intelligent Transportation Technologies. Institute of Transportation Studies of University of California, Berkeley. Working Paper UCD-ITS-RR-98-01. 1998. 291 P.

6. USA Patent # 3 305 828A of 19 February 1967 "Progressive traffic signal control system".

7. Highway Capacity Manual. TRB, National Research Concil, Washington, D. C. 2010. 1475 P.

8. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Ottawa: Institute of Transportation Engineers, 2008. 232 p

9. Signal Timing Manual. TRB, NCHRP Report 812, Washington, D. C. 2015. 317 P.

10. Webster F.V. Traffic Signal Settings / Road Research Technical Paper No. 39, Department of Scientific and Industrial Research, London. 1958. 45 P.

11. Guide to Traffic Management Part 9: Transport Control Systems – Strategies and Operations. Austroads Publication No. AGTM09-20. 2020. 271 P.

12. 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.

13. Akçelik R. Traffic signals: capacity and timing analysis, ARR 123, Australian Road Research Board, Vermont South Vic. 1981. 123 P.

14. Best Practice Guidance to Meet the Changing Needs of Transport Network Operations: Strategic Review of Austroads Guide to Traffic Management. Austroads Publication No. AP-R657-21. 2021. 27 P.

15. Traffic Control Signal Design Manual. Connecticut Department of Transportation Bureau of Engineering and Construction Division of Traffic Engineering. 2009. 201 P.

16. Vasudevan M. Robust Optimization Model for Bus Priority Control under Arterial Progression : dis. … PhD : Civil Engineering, University of Maryland, Maryland, USA. 2005. 164 P.

17. Kim S. Dynamic Bandwidth Optimization for Coordinated Arterial : dis. … PhD : Civil Engineering, Raleigh, North Carolina, USA. 2014. 224 P.

18. Little J.D.C., Martin B.V. and Morgan J.T. Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth, Highway Research Record Issue Number: 118. 1966. pp. 21-47.

19. Little J.D.C., Kelson M.D. and Gartner N.H. MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks, Transportation Research Record. No. 795. 1981. pp. 40-46.

20. Stamatiadis C. and Gartner N.H. MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks, Transportation Research Record. No. 1554. 1996. pp. 9-17.

21. Shoufeng L., Ximin L., Shiqiang D. Revised MAXBAND Model for Bandwidth Optimization of Traffic Flow Dispersion, International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. 2008. pp. 85-89. DOI: 10.1109/CCCM.2008.251.

22. Wua X., Tian Z., Hu P. and Yuan Z. Evaluating reinforcement learning state representations for adaptive traffic signal control. Procedia - Social and Behavioral Sciences 43. 2012, pp. 232-244. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.096

23. Hillier J.A. Glasgow's Experiment in Area Traffic Control. Traffic Engineering and Control, 7(8 & 9), 1965 and 1966. pp. 502-509 & 569-571.

24. Gartner N.H. and Little J.D.C. The Generalized Combination Method for Area Traffic Control, Working Paper of Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. 1973. 16 P.

25. Gartner N.H., Little J.D.C. and Gabbay H. Simultaneous Optimization of Offsets, Splits, and Cycle Time, Transportation Research Record. No. 596. 1976. pp. 5-15.

26. Robertson D.I. TRANSYT: A Traffic Network study Tool. Gt. Brit. Road Research Laboratory, Rept. LR 253. 1969. pp. 22-41.

27. SIGOP: Traffic Signal Optimization Program – A computer program to calculate optimum coordination in a Grid network of synchronized traffic signals. Prepared for U.S. Dept. of Commerce. Bureau of Public Roads. Traffic Research Corp., New York. 1966. 202 P.

28. Messer C.J., Whitson R.H., Dudek C.L. and Romano E.J. A Variable-Sequence Multiphase Progression Optimization Program, Highway Research Record, Issue Number: 445. 1973. pp. 24-43.

29. Robertson D.I. Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination, ITE JOURNAL. 1986. pp. 36-40.

30. Capaldo F.S., Biggiero L. Some Surveys in Order to Static Traffic Light Coordination. In International Conference on Traffic and Transport Engineering proceedings, Belgrade, Serbia, 2012. pp. 766-771. https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795641.

31. Deakin E.A., Skabardonis A. and May A.D. Traffic Signal Timing as a Transportation System Management Measure: The California Experience, Transportation Research Record, No. 1081. 1986. pp. 59-65.

32. Arnold, Jr. E.D. Signal Timing Optimization. A Review of State Programs. Virginia Transportation Research Council. Report VTRC 88-R22, 1988. 35 P.

33. Zheng J. A Performance Visualization and Fine-tuning Tool for Arterial Traffic Signal Systems, In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. 2014. 55 P.

34. Ting Lu M.E. Dynamic Network-Wide Traffic Signal Optimization : dis. … Dr.-Ing. : Civil Engineering, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany. 2015. 170 P.

35. Han X. Online Adaptive Traffic Signal Coordination with a Game Theoretic Approach.In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. 2017. 40 P.

36. Abdelghaffar H.M. Developing and Testing a Novel De-centralized Cycle-free Game Theoretic Traffic Signal Controller: A Traffic Efficiency and Environmental Perspective : dis. … PhD : Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA. 2018. 143 P.

37. Xie Y. Development and Evaluation of an Arterial Adaptive Traffic Signal Control System Using Reinforcement Learning : dis. … PhD : Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, USA. 2007. 166 P.

38. Yue R. Determination of Progression Speeds for Traffic Signal Coordination : dis. … PhD : Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, USA. 2020. 88 P.

39. Farzaneh M. Modeling traffic dispersion : dis. … PhD : Civil Engineering, Blacksburg, Virginia, USA. 2005. 131 P.

40. Gartner N.H. OPAC: Strategy for Demand-responsive Decentralized Traffic Signal Control, IFAC Proceedings Volumes, Paris, France. 1990. pp. 499-503.

41. Chang E.C.P. and Koothrappally J. Coordination of actuated controllers on traffic control systems, Research Report 1255-1, Texas Transportation Institute of The Texas A&M, Texas, USA. 1994. 128 P.

42. 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.

43. 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.

44. Gartner N.H. and Stamatiadis C. Arterial-Based Control of Traffic Flow in Urban Grid Networks, Mathematical and Computer Modelling, Issue 35. 2002. pp. 657-671.

45. 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.

46. Adacher L.A global optimization approach to solve the traffic signal synchronization problem, 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation EWGT 2012 Proceedings, Paris, France. 2012. pp. 1270-1277.

47. 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.

48. Lu S., Liu X. and Dai S. Adaptive and Coordinated Traffic Signal Control Based on Q-Learning and MULTIBAND Model, IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Chengdu, China. 2008. pp. 2366-2371.

49. Tomforde S., Prothmann H., Rochner F., Branke J., Hähner J., Müller-Schloer C. and Schmeck H. Decentralised Progressive Signal Systems for Organic Traffic Control, Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO 2008, Venice, Italy. 2008. 10 P. DOI: 10.1109/SASO.2008.31.

50. Day C.M., Sturdevant J.R. and Bullock D.M. Outcome Oriented Performance Measures for Signalized Arterial Capacity Management, TRB 2010 Annual Meeting, Washington, D.C., USA. 2010. 31 P.

51. Gentile G. and Tiddi D. Synchronization of traffic signals through a heuristic-modified genetic algorithm with GLTM, Proceedings of the XIII Meeting of the Euro Working Group on Transportation, Padua, Italy. 2009. P. 1-9.

52. 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. 2010. pp. 37-49. https://doi.org/10.3141/2192-04.

53. 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. Final Report of Joint Transportation Research Program FHWA/IN/JTRP-2010/22, Purdue University. 2010. 67 P.

54. 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. 2010. 30 P. http://docs.lib.purdue.edu/civeng/8.

55. 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, Final Report for TO 6332, University of California and University of Florida, USA. 2010. 129 P.

56. Wang F., Tang K., Li K., Liu Z. and Zhu L. A Group-Based Signal Timing Optimization Model Considering Safety for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows. Journal of Advanced Transportation. 2019. 13 P. https://doi.org/10.1155/2019/2747569.

57. 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.

58. 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.

59. M Lighthill, M.J. & Whitham, G.B. On kinematic waves: a theory of traffic flow on long crowded roads. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 229, No. 1178 (May 10, 1955), pp. 317-345. https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089.

60. 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. 2002. pp. 683-706.

61. 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. 2009. pp. 562-574.

62. Pacey G.M. The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal. Research Note RN/2665/GMP, Road Research Laboraroty, Crowthorne, Berkshire, UK, 1956.

63. Fusco G., Bielli M., Cipriani E., Gori S., Nigro M. Signal Settings Synchronization and Dynamic Traffic Modelling. European Transport\Trasporti Europei, Issue 53, Paper n° 7, 2013, 25 P.

64. Cantarella G.E., R. Di Pace, S. Memoli and S. de Luca The Network Signal Setting Problem: The Coordination Approach vs. The Synchronisation Approach. Proceeding of 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim. 2013. 6 P. DOI: 10.1109/UKSim.2013.99

65. Liu H.X. and Zheng J. Automatic Generation of Traffic Signal Timing Plan, Research Report CTS Project # 2013041, Department of Civil, Environmental, and Geo-Engineering University of Minnesota, Minnesota, USA. 2014. 67 P.

66. Kim S., Hajbabaie A., Williams B.M. and Rouphail N.M. Development of Near Real Time Performance Measurements for Closed-Loop Signal Systems (CLS) Using Historical Traffic Data from Existing Loop Detectors and Signal Timing Data, Project NCDOT RP-2012-12, Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering of North Carolina State University, North Carolina, USA. 2014. 230 P.

67. Zhou Y., Jia S., Mao B., Ho T.K., and Wei W. An Arterial Signal Coordination Optimization Model for Trams Based on Modified AMBAND. Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2016. 10 P.

68. 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. 2016. pp. 33-43.

69. 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, Volume 6. Issue 4. 2016. pp. 112-116.

70. 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. World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. Transportation Research Procedia 25. 2017. pp. 1769-1780.

REFERENCES

1. Vuchic, V. R. (1999). Transportation for livable cities. Center for Urban Policy Research.

2. Horbachov, P., Makarichev, A., & Shevchenko, V. (2019). Estimation of delay on signalized intersections of urban streets with a three-phase signal. Automobile Transport, (44), 30-39. https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30.

3. Qadri S.S.S.M., Gökçe M.A. & Öner E. (2020). State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities European Transport Research Review, volume 12, Article number: 55. https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1.

4. Garg, D., Chli, M., & Vogiatzis, G. (2018). Deep reinforcement learning for autonomous traffic light control. In 2018 3rd IEEE international conference on intelligent transportation engineering, ICITE, 214-218. https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492537.

5. Shaheen, S., Young, T., Sperling, D., Jordan, D., Horan, T. (1998). Identification and Prioritization of Environmentally Beneficial IntelligentTransportation Technologies. Research Report UCD-ITS-RR-98-1, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

6. Auer, J. J. H., Huffman, J. P., & Brady, T. W. (1967). Progressive traffic signal control system (USA patent № US3305828A).

7. HCM 2010 : highway capacity manual. (2010). Washington, D.C.: Transportation Research Board.

8. Teply, S., Allingham, D., Richardson, D. & Stephenson, B. (2008). Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections – Third Edition. Ottawa: Institute of Transportation Engineers.

9. Urbanik, T., Tanaka, A., Lozner, B., Lindstrom, E., Lee, K., Quayle, S., Beaird, S., Tsoi, S., Ryus, P., Gettman, D., Sunkari, S., Balke, K., & Bullock, D. (2015). Signal Timing Manual - Second Edition. Transportation Research Board. https://doi.org/10.17226/22097.

10. Webster, F.V. (1958). Traffic Signal Setting. Department of Scientific and industrial Research, Road Research Technical Paper No. 39. London, England.

11. Green, D. & Lewis, K. (2020). Guide to Traffic Management Part 9: Transport Control Systems – Strategies and Operations – Edition 4.0. Australia Sydney, New South Wales: Austroads.

12. Miller, A. (1968). Australian road capacity guide: provisional introduction and signalized intersections. Australian Road Research Board, Bulletin No. 4. Vermont South Victoria, Australia.

13. Akçelik, R. (1981). Traffic signals: capacity and timing analysis. Australian Road Research Board, ARR 123, Vermont South Vic., Australia.

14. Latham, S., Fooks, W., Haverland, M., Benjamin, S., Law, A. & Kennedy, T. (2021). Best practice guidance to meet the changing needs of transport network operations: strategic review of Austroads Guide to Traffic Management. Austroads Publication No. AP-R657-21. Sydney, New South Wales, Australia.

15. Traffic Control Signal Design Manual. (2009). Connecticut Department of Transportation Bureau of Engineering and Construction Division of Traffic Engineering, USA.

16. Vasudevan, M. (2005). Robust Optimization Model for Bus Priority Control under Arterial Progression. (PhD dissertation of Civil Engineering). University of Maryland, Maryland, USA.

17. Kim, S. (2014). Dynamic Bandwidth Optimization for Coordinated Arterial. (Doctoral dissertation of Civil Engineering). Retrieved from North Carolina State University, Raleigh, North Carolina http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/9839.

18. Little, J.D.C., Martin, B.V. & Morgan, J.T. (1966). Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth. Highway Research Record, Issue Number 118, 21-47.

19. Little, J.D.C., Kelson, M.D. & Gartner, N.H. (1981). MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks. Transportation Research Record, No. 795, 40-46.

20. Stamatiadis, C. & Gartner, N.H. (1996). MULTIBAND-96: A Program for Variable-Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks. Transportation Research Record, No. 1554, 9-17.

21. Shoufeng, L., Ximin, L. & Shiqiang, D. (2008). Revised MAXBAND Model for Bandwidth Optimization of Traffic Flow Dispersion. International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management, 85-89. DOI: 10.1109/CCCM.2008.251.

22. Wua, X., Tian, Z., Hu, P. & Yuan, Z. (2012). Evaluating reinforcement learning state representations for adaptive traffic signal control. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 43, 232-244. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.096.

23. Hillier, J.A. (1965-1966). Glasgow's Experiment in Area Traffic Control. Traffic Engineering and Control, 7(8 & 9), 502-509 & 569-571.

24. Gartner, N.H. & Little, J.D.C. (1973). The Generalized Combination Method for Area Traffic Control. Working Paper of Massachusetts Institute of Technology, Operations Research Center, Cambridge, Massachusetts, USA. http://hdl.handle.net/1721.1/5330.

25. Gartner, N.H., Little. J.D.C. & Gabbay, H. (1976). Simultaneous Optimization of Offsets, Splits, and Cycle Time. Transportation Research Record, No. 596, 5-15.

26. Robertson, D.I. (1969). TRANSYT: A Traffic Network study Tool. Gt. Brit. Road Research Laboratory, Rept. LR 253, 22-41.

27. TRC (1966). SIGOP: Traffic Optimization Program – A Computer Program to Calculate Optimum Coordination in a Grid Network of Synchronized Traffic Signals. Traffic Research Corporation, New York, USA.

28. Messer, C.J., Whitson, R.H., Dudek, C.L. & Romano, E.J. (1973). A Variable-Sequence Multiphase Progression Optimization Program. Highway Research Record, Issue Number 445, 24-43.

29. Robertson, D.I. (1986). Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. ITE JOURNAL, 36-40.

30. Capaldo, F.S. & Biggiero, L. (2012). Some Surveys in Order to Static Traffic Light Coordination. In International Conference on Traffic and Transport Engineering proceedings, Belgrade, Serbia. 766-771. https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795641.

31. Deakin, E.A., Skabardonis, A. & May, A.D. (1986). Traffic Signal Timing as a Transportation System Management Measure: The California Experience. Transportation Research Record, No. 1081, 59-65.

32. Arnold, Jr. E.D. (1988). Signal Timing Optimization. A Review of State Programs. Report VTRC 88-R22. Transportation Research Council, Virginia, USA.

33. Zheng, J. (2014). A Performance visualization and fine-tuning tool for arterial traffic signal systems. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, https://hdl.handle.net/11299/163359.

34. Ting, Lu M.E. (2015). Dynamic Network-Wide Traffic Signal Optimization. (Doctor-Ingenieurin Dissertation of Civil Engineering). Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany. Retrieved from https://core.ac.uk/download/pdf/196657066.pdf.

35. Han, X. (2017). Online Adaptive Traffic Signal Coordination with a Game Theoretic Approach. Retrieved from the University at Buffalo, State University of New York, https://www.acsu.buffalo.edu/~qinghe/thesis/2017-01%20Han%20MS%20Signal%20Game.pdf.

36. Abdelghaffar, H.M. (2018). Developing and Testing a Novel Decentralized Cycle-free Game Theoretic Traffic Signal Controller: A Traffic Efficiency and Environmental Perspective. (Doctoral dissertation of Electrical Engineering). Retrieved from the Virginia Polytechnic Institute and State University, http://hdl.handle.net/10919/100681.

37. Xie, Y. (2007). Development and Evaluation of an Arterial Adaptive Traffic Signal Control System Using Reinforcement Learning. (Doctoral dissertation of Civil Engineering). Texas A&M University. Retrieved from the https://hdl.handle.net/1969.1/ETD-TAMU-2480.

38. Yue, R. (2020). Determination of Progression Speeds for Traffic Signal Coordination. (Doctoral dissertation of Civil and Environmental Engineering). University of Nevada, Reno. Retrieved from the https://scholarworks.unr.edu/handle/11714/7396.

39. Farzaneh, M. (2005). Modeling traffic dispersion. (Doctoral dissertation of Civil Engineering). Blacksburg, Virginia. Retrieved from the http://hdl.handle.net/10919/29757.

40. Gartner, N.H. (1990). OPAC: Strategy for Demand-responsive Decentralized Traffic Signal Control. IFAC Proceedings Volumes, 499-503.

41. Chang, E.C.P. & Koothrappally, J. (1994). Coordination of actuated controllers on traffic control systems. Research Report 1255-1, Texas Transportation Institute of The Texas A&M, Texas, USA.

42. Sropathi, H.K., Gartner, N.H. & Stamatiadis, C. (1995). Uniform and Variable Bandwidth Arterial Progression Schemes. Transportation Research Record, No. 1494, 135-145.

43. Gartner, N.H. & Stamatiadis, C. (1998). Concurrent Progression Schemes in Multiarterial Signal Networks Using Multiband. Proceeding of 68th Annual Meeting in Institute of Transportation Engineers, Toronto, Ontario, Canada.

44. Gartner, N.H. & Stamatiadis, C. Arterial-Based Control of Traffic Flow in Urban Grid Networks. Mathematical and Computer Modelling, Issue 35, 657-671.

45. Yin, Y., Liu, H.X., Laval, J.A., Lu, X.Y., Li, M., Pilachowski, J. & Zhang, W.B. (2007). An Offset Refiner for Coordinated Actuated Signal Control Systems. California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2007-2, University of California, California, USA.

46. Adacher, L. (2012). A global optimization approach to solve the traffic signal synchronization problem. 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation EWGT 2012 Proceedings, 1270-1277.

47. Fernandez, R. (2006). Evolution of the TRANSYT model in a developing country. Transport Research Part A Policy and Practice. 40, 386-398. https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.08.008.

48. Lu, S., Liu, X. & Dai S. (2008). Adaptive and Coordinated Traffic Signal Control Based on Q-Learning and MULTIBAND Model. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2366-2371.

49. Tomforde, S., Prothmann, H., Rochner, F., Branke, J., Hähner, J., Müller-Schloer, C. & Schmeck, H. (2008). Decentralised Progressive Signal Systems for Organic Traffic Control. Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO 2008. DOI: 10.1109/SASO.2008.31.

50. Day, C.M., Sturdevant, J.R. & Bullock, D.M. (2010). Outcome Oriented Performance Measures for Signalized Arterial Capacity Management. TRB 2010 Annual Meeting, Washington, D.C., USA.

51. Gentile, G. & Tiddi, D. (2009). Synchronization of traffic signals through a heuristic-modified genetic algorithm with GLTM. Proceedings of the XIII Meeting of the Euro Working Group on Transportation, 1-9.

52. Day, C.M., Haseman, R., Premachandra, H., Brennan, T.M., Jr., Wasson, J.S., Sturdevant, J.R. & Bullock, D.M. (2010). 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, 37-49. https://doi.org/10.3141/2192-04.

53. Day, C.M., Brennan, T.M., Jr., Premachandra, H., Hainen, A.M., Remias, S.M., Sturdevant, J.R., Richards, G., Wasson, J.S. & Bullock, D.M. (2010). Quantifying Benefits of Traffic Signal Retiming. Final Report of Joint Transportation Research Program FHWA/IN/JTRP-2010/22, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

54. Day, C.M., Brennan, T.M., Jr., Premachandra, H., Sturdevant, J.R., Richards, G., Wasson, J.S. & Bullock, D.M. (2010). Visualization and Assessment of Arterial Progression Quality Using High Resolution Signal Event Data and Measured Travel Time. Purdue University, West Lafayette, IN, USA. http://docs.lib.purdue.edu/civeng/8.

55. Li, M., Zhang, L., Song, M.K., Wu, G., Zhang, W.B., Zhang, L. & Yin, Y. (2010). Improving Performance of Coordinated Signal Control Systems Using Signal and Loop Data. Final Report for TO 6332, University of California and University of Florida, USA.

56. Wang, F., Tang, K., Li, K., Liu, Z. & Zhu, L. (2019). A Group-Based Signal Timing Optimization Model Considering Safety for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows. Journal of Advanced Transportation. https://doi.org/10.1155/2019/2747569.

57. Andalibian, R. & Tian, Z. (2012). Signal Timing and Coordination Strategies Under Varying Traffic Demands. Nevada Department of Transportation. NDOT Research Report No. 236-11-803.

58. Wei, M., Jin, W., & Shen, L. (2012). A Platoon Dispersion Model Based on a Truncated Normal Distribution of Speed. Journal of Applied Mathematics, vol. 2012, Article ID 727839. https://doi.org/10.1155/2012/727839.

59. Lighthill, M.J. & Whitham, G.B. (1955). On kinematic waves: a theory of traffic flow on long crowded roads. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 229, No. 1178, 317-345. https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089.

60. Wong, S.C. & Wong, G.C.K. (2002). An analytical shock-fitting algorithm for LWR kinematic wave model embedded with linear speed-density relationship. Transportation Research B, vol. 36, no. 8, 683-706.

61. Zhang, P., Wong, S.C. & Dai, S.Q. (2009). A conserved higher-order anisotropic traffic flow model: description of equilibrium and non-equilibrium flows. Transportation Research B, vol, 43, no. 5, 562-574.

62. Pacey, G.M. (1956). The progress of a bunch of vehicles released from a traffic signal. Research Note RN/2665/GMP, Road Research Laboraroty, Crowthorne, Berkshire, UK.

63. Fusco, G., Bielli, M., Cipriani, E., Gori, S. & Nigro, M. (2013). Signal Settings Synchronization and Dynamic Traffic Modelling. European Transport\Trasporti Europei, Issue 53, Paper no. 7.

64. Cantarella, G.E., Di Pace, R., Memoli, S. & de Luca S. (2013). The Network Signal Setting Problem: The Coordination Approach vs. The Synchronisation Approach. Proceeding of 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim. DOI: 10.1109/UKSim.2013.99.

65. Liu, H.X. & Zheng, J. (2014). Automatic Generation of Traffic Signal Timing Plan. Research Report CTS Project # 2013041. Department of Civil, Environmental and Geo-Engineering University of Minnesota, Minnesota, USA.

66. Kim, S., Hajbabaie, A., Williams, B.M. & Rouphail, N.M. (2014). Development of Near Real Time Performance Measurements for Closed-Loop Signal Systems (CLS) Using Historical Traffic Data from Existing Loop Detectors and Signal Timing Data. Project NCDOT RP-2012-12. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering of North Carolina State University, North Carolina, USA.

67. Zhou, Y., Jia, S., Mao, B., Ho, T.K. & Wei, W. (2016). An Arterial Signal Coordination Optimization Model for Trams Based on Modified AMBAND. Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2016.

68. Kim, S.R., Warchol, S., Schroeder, B.J. & Cunningham, C. (2016). Innovative Method for Remotely Fine-Tuning Offsets Along a Diverging Diamond Interchange Corridor. Transportation Research Record, No. 2557, 33-43.

69. Rane, V., Goliya, H.S., Sanwaliya, P. & Faraz, M.I. (2016). Synchronization of Signalized Intersection from Rasoma to High Court in Indore District. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 6, Issue 4, 112-116.

70. Leal, S.S., de Almeida, P.E.M. & Chung, E. (2017). Active control for traffic lights in regions and corridors: an approach based on evolutionary computation. World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. Transportation Research Procedia 25, 1769-1780.

***Ye. Liubyi* Analysis of methods for forming traffic signal coordinated timing plans**

Nowadays, many works have been published worldwide in the field of coordinating traffic lights in cities, reflecting the significant interest of transport researchers in this topic and describing the results of a massive amount of work done in this direction. It has led to creation several software tools for fixed-time and actuated coordination, which is used around the world in the practical activities of governments responsible for traffic management in cities. But the significant and inconsistent intensity of publications in this area also demonstrates that the interest of researchers in the issues of traffic flows coordination has been observed up to the present time.

The paper deals the results of the analysis of methods for forming traffic signal coordinated timing plans on arterials or its arteries. Almost all of the analysed methods of coordination are characterised by the lack of attention of their developers to the issues of uniform motion of the platoon progression along the coordinated segments of the road network. The mention of the uniform motion of the vehicle under the conditions of coordinated traffic signals operation is found only in isolated cases that have not ended in practically usable recommendations. In general, this indicates that researchers are not entirely focused on the topic of coordination due to the fact that its primary and main issues have not been fully solved yet – the determination of rational parameters of traffic light control cycles and effective offsets of their start, taking into account additional vehicles queued at the stop-line at the downstream intersections. The results of the conducted research should become the main basis for forming new traffic signal coordinated timing plan methods.

Key words: traffic management, efficiency, progression, coordinated timing plan, traffic flow.

ЛЮБИЙ Євген Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, докторант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: lion_khadi@ukr.net. https://orcid.org/0000-0003-0681-0920.

Yevhen LIUBYI, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: lion_khadi@ukr.net. https://orcid.org/0000-0003-0681-0920.

DOI 10.36910/automash.v2i19.909