

УДК 656.051

DOI: 10.30977/VEIT.2022.22.0.2

Методика оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі

Горбачов П. Ф.¹, Любий Є. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

***Анотація.** В роботі проаналізовано основні методи формування планів координації на ділянках міської вулично-дорожньої мережі. Характерною особливістю проаналізованих методів формування планів координації є відсутність уваги їх розробників до питання та проблематики рівномірності руху пачки зеленої хвилі по координованим фрагментам міської вулично-дорожньої мережі. Проведено формалізацію процесу взаємодії пачки зеленої хвилі та додаткових автомобілів, які з'являються з другорядних напрямків і накопичуються перед стоп-лінією чергового перехрестя координованої ділянки міської вулично-дорожньої мережі. З використанням загальновідомих формул кінематики прямолінійного рівноприскореного руху точки розроблені аналітичні моделі, які надають можливість оцінювати мінімальний час випередження початку дозвільного сигналу світлофору через розрахункову швидкість руху та середнє прискорення одного додаткового автомобіля при старті від стоп-лінії перехрестя з урахуванням його динамічного габариту.*

***Ключові слова:** зелена хвиля; план координації; рівномірний рух; світлофорне керування; транспортні потоки; час випередження.*

Вступ

Методи організації координованого світлофорного керування (СК) розпочали свою історію з 60-х років минулого століття, але навіть зараз не можуть вважатися досконалими, оскільки не враховують всю специфіку руху транспортних засобів (ТЗ) навіть у найпростішому варіанті лінійної координації, тобто створення плану координації (ПК) для міської магістралі (ММ) або її фрагменту. Це твердження, в першу чергу, стосується такого, до кінця невирішеного питання, як поява на магістралі, що координується, додаткових ТЗ з другорядних напрямків, які накопичуються перед стоп-лінією чергового координованого перехрестя за час забороняючого руху зеленої хвилі (ЗХ) сигналу світлофору. Ці ТЗ є об'єктивною частиною трафіку на ММ, оскільки позбавитись них можливо лише через заборону виїзду на неї з другорядних вулиць на тих перехрестях, для яких,

власне, й формується лінійний ПК. Якщо така заборона десь й існує, то це дуже рідка практика, яка ніяк не може вважатися розповсюдженою, а тому наявність декількох ТЗ перед стоп-лінією координованого перехрестя в момент прибуття до нього пачки ЗХ є найбільш імовірною ситуацією в години звичайного завантаження вулично-дорожньої мережі (ВДМ) трафіком.

На відміну від ТЗ зі складу пачки ЗХ, які мають можливість прибувати до чергового координованого перехрестя на розрахунковій швидкості, додаткові ТЗ з другорядних напрямків зазвичай мають розпочинати свій рух з нульової швидкості та їм потрібний деякий час для досягнення швидкості руху пачки ЗХ. Визначення умов, необхідних для організації належної взаємодії цих двох груп ТЗ у випадку координації роботи суміжних світлофорів є актуальним питанням, вирішення якого дозволить полегшити процес створення ПК на ММ та підвищити їх результативність.

Аналіз публікацій

На цей час вже відома та накопичена достатньо велика кількість спроб різних авторів зі створення нових та ефективних методів координації роботи світлофорних об'єктів (СО). Основна увага дослідників у даній проблематиці, зазвичай, приділяється національним (державним і регіональним) методичним керівництвам з організації дорожнього руху (ОДР) [1-4].

Американське керівництво [1] містить багато згадок про координацію СО, причому 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. Врахування основних проблемних питань формування ПК в даному керівництві є формальним, оскільки не підкріплюються практичними прикладами.

В канадському керівництві з ОДР [2] представлені лише деякі міркуваннями відносно процесу формування ПК на кшталт того, що тривалість узгодженого циклу на координованій ділянці ММ може й перевищувати тривалість критичного циклу на її максимально завантаженому перехресті або, що виділена фаза для лівого повороту може полегшити створення ПК. Тут, як і в методичному керівництві [1], також слід відзначити відсутність прикладів врахування основних проблемних питань при формуванні ПК (взаємодія пачки ЗХ з додатковими ТЗ другорядних напрямків руху, рівномірність руху пачки ЗХ та ін.).

Ще одне американське керівництво [3] присвячене безпосередньо розрахунку параметрів роботи СО та містить у собі основну просторово-часову діаграму (ПЧД), а також наводяться вказівки щодо влаштування коридору для ЗХ, які можна вважати основною частиною інструкції з побудови ПК. Автори [3] нічого не зазначають про можливі заходи щодо організації рівномірного руху пачки ЗХ та рекомендують для визначення тривалості циклів на перехрестях використовувати формулу Вебстера [5], навіть за умови групового руху ТЗ по ММ, що не можна вважати достатньо обґрунтованим.

Авторами австралійського керівництва з ОДР [4] стверджується, що переваги впровадження координованого СК досягаються, коли світлофори розташовуються на послідовних перехрестях, відстань між якими менше ніж 1 км. Для визначення тривалості циклів вони також користуються формулою

Вебстера [5] або її австралійськими похідними [6], але на відміну від американських колег, вони пропонують використовувати для неосновних перехресть цикли з половиною тривалості максимального значення. Одним із перспективних напрямів розвитку методів створення ПК на думку австралійських спеціалістів вважається мультимодальна координація [7].

Додатково до керівництв з ОДР, розроблених на державному рівні, можна виділити керівництва, які підготовлені місцевими органами влади, наприклад [8], але тут також відсутні згадки про розвиток методів створення ПК або про їх успішне застосування.

Результати аналізу основних керівництв з ОДР свідчать про декларативний характер врахування в представлених у них методиках формування ПК всіх особливостей взаємодії пачки ЗХ та додаткових ТЗ на координованих ділянках ММ. Відсутність практичних прикладів застосування розроблених ПК, які б враховували необхідність розгону додаткових ТЗ з другорядних напрямків, що збираються перед координованими перехрестями, свідчить про доцільність та актуальність вирішення проблеми розробки ефективних ПК на ММ або їх окремих ділянках.

До того ж слід розуміти, що 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 [9]. Але значна та неспадаюча інтенсивність публікацій у цій сфері також демонструє, що інтерес дослідників до питань координації руху ТП спостерігається аж до сьогодні. 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.

Для проаналізованих методів координації характерною є відсутність уваги їх розробників до питань рівномірності руху пачки ЗХ по координованим фрагментам ВДМ. Це трапляється незважаючи на те, що рівномірним рух пачки вважається за замовчуванням, а ефективність ПК оцінюється показниками,

тісно пов'язаними з рівномірністю руху: часом поїздки та кількістю зупинок на шляху. Нехтування питаннями рівномірності руху свідчить про не зовсім глибоке занурення дослідників у тему координації, яке викликано не тим, що ще не до кінця вирішені її базові та головні питання – визначення раціональних значень для параметрів циклів світлофорного регулювання (СР) та величини відносних зсувів їх початку. Саме питання рівномірності руху в умовах координованої роботи СО згадувалося дослідниками достатньо давно [10], з посиланням на ще більш ранні матеріали [11]. Для забезпечення рівномірного руху пачки ЗХ, у тому числі шляхом зменшення середньої швидкості руху ТЗ, автори книги [10], пропонують використання «передсигналів» – світлофорів, які встановлюються на деякій відстані перед основним СО на перехресті, сумісно зі змінними вказівниками швидкості.

У ПК передсигнали повинні дозволяти рух таким чином, щоб пачка ЗХ наздоганяла б додаткові ТЗ до основного світлофора або безпосередньо на ньому. Після цього додаткові ТЗ стають частиною пачки ЗХ, проїжджають наступні перехрестя в її складі та не вимагають виділення часу на розгін у СЦ перехрестя на магістралі, що координується. Нажаль автори книги [10] не супроводили свої рекомендації кількісними параметрами, необхідними для їх реалізації та, у кінці кінців, вони не отримали подальшого помітного розвитку в питаннях координації роботи СО на міській ВДМ. Виключенням є лише робота [12], де передсигнали розглядаються не лише як засіб вирівнювання швидкості, а ще й як засіб ущільнення пачки ЗХ при русі по координованій ММ. Там же наводяться рекомендації з їх встановлення на відстані 80 метрів перед основним світлофором.

Також слід розуміти, що більшість авторів нових методів координації роботи СО намагається удосконалити вже існуючі методики створення ПК за рахунок застосування нових технологій прийняття рішень або нових інструментів моделювання трафіку, що не завжди приводить до переконливих результатів. В той же час ручне або інше додаткове налаштування базових ПК, створених за допомогою існуючих програмних засобів координації, дозволяє отримати достатньо переконливі показники покращення стану руху ТЗ на координованих фрагментах ВДМ. Але такі приклади носять поодинокий характер, не

мають належної методичної реалізації та не можуть претендувати на поширене застосування.

На наш погляд така ситуація обумовлена тими спрощеннями у постановці задачі координації, які були зроблені авторами базових методів побудови ПК, таких як ПЧД, TRANSIT або MAXBAND, які являються основою для розвитку нових методів координації. При цьому залишаються невирішеними базові питання координації, до числа яких, у першу чергу, відносяться визначення раціональної тривалості циклу в ПК та взаємодія пачки ЗХ з додатковими ТЗ, що збираються перед стоп-лінією світлофору за час сигналу, який забороняє рух по координованій магістралі.

Мета та постановка задачі

Метою даного дослідження є отримання оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі за умов її взаємодії з додатковими ТЗ, які з'являються з другорядних напрямків та накопичуються перед стоп-лініями перехрестя на цій ділянці.

Для досягнення зазначеної вище мети необхідно вирішити наступні основні задачі:

- формалізувати процес взаємодії пачки ЗХ з додатковими ТЗ;
- розробити аналітичні моделі оцінки часу випередження включення зеленого сигналу на СО по відношенню до розрахункового часу прибуття першого координованого автомобіля без урахування динамічного габариту ТЗ та з його урахуванням;
- здійснити оцінку мінімального часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки ЗХ.

Опис об'єкту дослідження

Загальноприйнятним уявленням про рух ТЗ на координованих ділянках ММ є рух з постійною швидкістю, що добре ілюструється ПЧД [3].

Ця постійна швидкість є основою розрахунку зсуву початку світлофорного циклу (СЦ) на кожному координованому СО відносно часу його початку на першому координованому світлофорі. Слід розуміти, що на практиці рух ТЗ не є таким ідеальним, як він відображається на ПЧД, оскільки на нього впливають особливості водіння учасників

руху, які мають власне індивідуальний характер, але цей факт не слід вважати за проблему. Рівномірний рух ТЗ координованою ділянкою ВДМ можна вважати цілком прийнятним для визначення зсувів, оскільки основним завданням ПК є лише створення умов для максимально безперешкодного подолання цієї ділянки.

Слід розуміти, що для забезпечення рівномірного руху для пачки ЗХ заздалегідь необхідно включати дозвільний сигнал за напрямом її руху (ще до її прибуття на координоване перехрестя) для того, щоб надати можливість додатковим ТЗ розігнатися з нульової швидкості до швидкості руху пачки ЗХ. Цей період називається «часом випередження» включення зеленого сигналу на СО по відношенню до розрахункового часу прибуття першого ТЗ з пачки ЗХ [1].

Накопичення ТЗ перед стоп-лінією чергового координованого перехрестя за час забороняючого руху ЗХ сигналу СО є об'єктивною реальністю функціонування координованої ділянки ММ. Основним джерелом появи додаткових ТЗ на ММ, що координується, є транспортні потоки (ТП) з другорядних підходів до ММ відповідних напрямів. Окрім цього, додаткові ТЗ можуть з'являтися з прилеглих до ММ територій та паркувань. До додаткових також можна відносити ТЗ, які здійснили розворот на попередньому перехресті при русі координованою ділянкою в зустрічному напрямі та залишки пачки ЗХ з числа ТЗ, які не встигли подолати ділянку за виділений у СЦ дозвільний сигнал [13].

Всі перелічені джерела генерують протягом СЦ випадкову кількість додаткових ТЗ, тож і результат їхнього накладання є випадковим. Відповідно, випадковим буде й час випередження, необхідний для забезпечення рівномірного руху ТП координованою ділянкою ММ. Додатковий елемент випадковості в цей параметр вносить індивідуальний характер водіння учасників руху, поведінка яких у значному ступені залежить від поведінки інших водіїв, якщо вони знаходяться в щільному ТП. Також слід враховувати різні технічні характеристики додаткових ТЗ, що в підсумку приводить до їхнього різного прискорення, а прискорення останнього з таких ТЗ залежить навіть від порядку розташування різних водіїв у черзі.

Повна оцінка часу випередження передбачає визначення виду та параметрів закону розподілу [14]. Але слід розуміти, що в рамках даного дослідження автори роблять лише

спробу отримати загальне уявлення про процес взаємодії пачки ЗХ та додаткових ТЗ, тому така повна оцінка виглядає дещо надлишковою.

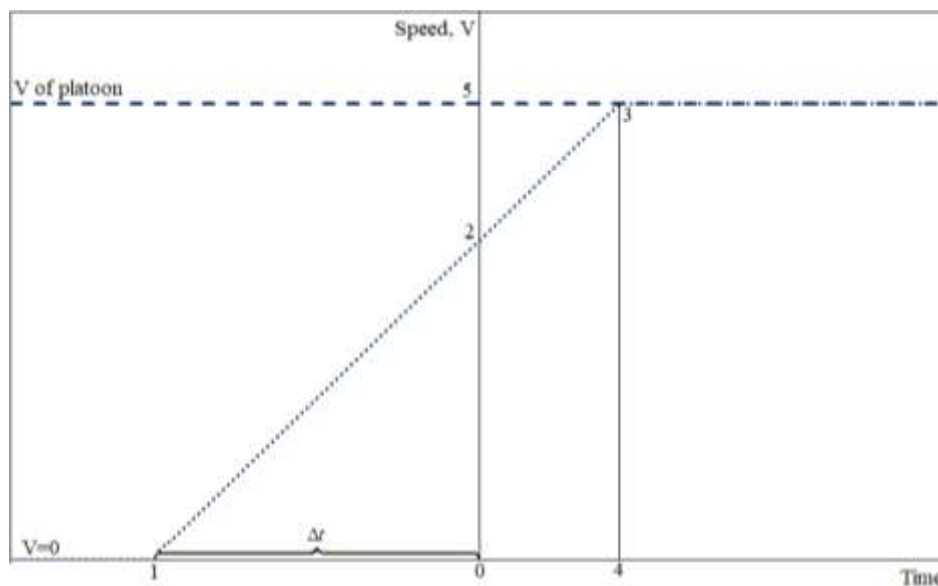
Слід також розуміти, що чим більша кількість додаткових ТЗ накопичується перед стоп-лінією СО, тим більше потрібно часу для їх розгону до швидкості руху пачки ЗХ. Враховуючи цю властивість часу випередження, виникає можливість значного спрощення як самого процесу отримання шуканого параметру, так і його розуміння, якщо задатись метою отримання його нижньої оцінки, тобто для одного додаткового ТЗ, що знаходиться першим у черзі. Обрана оцінка в більшому ступені позбавляється впливу індивідуальної складової в часі випередження, оскільки у водія першого додаткового ТЗ в черзі відсутня залежність від поведінки інших водіїв. Також при обґрунтуванні обраної межі оцінки шуканої величини автором [13] зазначається, що: «залишкова частина індивідуальної складової автоматично усереднюється завдяки циклічному характеру світлофорного регулювання (СР) та великій кількості реалізацій у процесі розгону першого ТЗ з числа додаткових протягом доби або, навіть однієї години. Тому нижня оцінка часу випередження на основі середнього прискорення одного додаткового ТЗ в умовах вільного руху має високу інформативність, є повністю зрозумілою та здатна привести до отримання нового уявлення про процеси руху ТП в умовах скоординованої роботи СО».

Розробка моделі оцінки часу випередження включення зеленого сигналу на СО по відношенню до розрахункового часу прибуття першого координованого автомобіля без урахування динамічного габариту

Розпочати пошук нижньої оцінки часу випередження доцільно з графічного представлення процесу взаємодії пачки ЗХ з додатковим ТЗ перед перехрестям, яке дозволить наочно уявити умови, за якими цей час утворюється. Основною характеристикою руху координованого ТП в даному випадку є його розрахункова швидкість, для додаткових ТЗ необхідно враховувати ще їх прискорення зі старту, а для відображення у просторі точки злиття пачки ЗХ із додатковим ТЗ, необхідно мати уявлення про відстань від перехрестя, на якій знаходяться ТЗ. Звичайний вибір осей на графіку «час – відстань» [3, 10], який відображає рух пачки ЗХ, з представленням по

осі ординат відстані, що проходять ТЗ за деякий час, який відкладається по осі абсцис, не забезпечує наявного відображення відстані, швидкості та прискорення, необхідних для визначення шуканого часу. Тому ілюстрацію ситуації зі взаємодією пачки ЗХ з додатковими ТЗ на перехресті доцільно пред-

ставити на графіку «час – швидкість», на якому швидкість відображається безпосередньо, середнє прискорення ТЗ добре представлене кутом нахилу прямої швидкості, а пройдена дистанція – площею фігури під лінією швидкості, рис. 1.



— — — швидкість руху пачки ЗХ; – швидкість руху додаткового ТЗ; 0 – момент прибуття пачки ЗХ до перехрестя, тобто розрахунковий час включення дозвільного сигналу; 1 – момент завчасного включення дозвільного сигналу для забезпечення рівномірного руху для пачки ЗХ; 3 – момент злиття пачки ЗХ з додатковим ТЗ; 2, 4, 5 – позначення характерних точок геометричних фігур; Δt – час випередження включення дозволяючого сигналу світлофору

Рис. 1. Швидкість руху пачки ЗХ та додаткового ТЗ за умови завчасного включення дозвільного сигналу світлофору

На цьому графіку автомобіль представлений точкою, хоча в реальності він має не нульову довжину та момент злиття пачки ЗХ з додатковим ТЗ настає тоді, коли переднє ТЗ з пачки наблизиться до його задньої точки на безпечну дистанцію, яка сумісно з довжиною ТЗ утворює його динамічний габарит. Але цей габарит достатньо просто врахувати на останніх етапах розрахунків, коли зрозуміло стане основна частина часу випередження, для чого й призначена дана абстракція, яка дозволяє звести оцінку Δt до легко зрозумілої геометричної задачі.

Час випередження представлений на рис. 1 відрізком 1-0, позначеним як Δt . З рисунку добре видно, що саме він є непродуктивним періодом у циклі СР, коли на перехресті не знаходиться жодний ТЗ, а час проходження динамічного габариту, власне кажучи, до нього не відноситься, оскільки перехрестя в цей час зайняте додатковим ТЗ.

Простий перехрестя відбувається тому, що більша частина розгону, для близьких до стоп-лінії додаткових ТЗ, припадає на ділянку магістралі, розташовану за ним. Тому частину періоду розгону, перехрестя може бути порожнім, поки до нього не прибуде пачка ЗХ в момент часу 0. Такі непродуктивні втрати часу циклу являються дуже дорогою ціною за комфорт руху пачки ЗХ в умовах інтенсивного руху ТЗ, оскільки зумовлюють зростання навантаження на перехрестя та підвищують втрати часу ТЗ на конкурентних до ЗХ напрямках.

Задля отримання аналітичної залежності часу випередження необхідно чітко визначити умови, які цей час має забезпечувати. Виходячи із загальної мети СР, яке має забезпечувати ефективний розподіл часу між конкуруючими потоками учасників руху, під часом випередження слід розуміти мінімальний проміжок часу, який дозволяє пачці ЗХ, рухаючись з розрахунковою швидкістю, наздо-

гнати додатковий ТЗ. Без врахування динамічного габариту додаткового ТЗ цей момент настає при одночасному виконанні двох умов:

$$\begin{cases} V_a = V \\ S_p = S_a \end{cases} \quad (1)$$

де V_a – швидкість руху додаткового ТЗ, м/с; V – швидкість руху пачки ЗХ, м/с; S_p – дистанція, пройдена пачкою ЗХ від стоп-лінії перехрестя, м; S_a – дистанція, пройдена додатковим ТЗ від стоп-лінії, м.

Тепер необхідно описати складові умови (1) з використанням загальновідомих з кінематики залежностей для швидкості та відстані від часу руху, при прямолінійному рівноприскореному русі точки. Для швидкості вона виглядає так:

$$V(t) = V_0 + at, \quad (2)$$

де $V(t)$ – швидкість руху ТЗ в момент часу t , м/с; t – проміжок часу, що минув з моменту 0 розрахункового часу включення дозволяючого сигналу світлофору для ЗХ, с; V_0 – швидкість руху ТЗ у початковий момент часу, м/с; a – середнє прискорення ТЗ, м/с².

Довжина шляху, пройденого ТЗ з постійним прискоренням за час t , дорівнює:

$$S(t) = V_0 \cdot t + \frac{at^2}{2}. \quad (3)$$

При відомій (заданій) розрахунковій швидкості ТП V , і старті ТЗ з місця, $V_0 = 0$ м/с, час розгону ТЗ до V , t_v , виходячи з (2), дорівнюватиме:

$$t_v = \frac{V}{a}, \text{ с.} \quad (4)$$

Тоді, проміжок часу між розрахунковим часом включення дозволяючого сигналу світлофору для ЗХ (момент 0) та моментом 3, коли додатковий ТЗ досягає швидкості пачки, дорівнює:

$$t = \frac{V}{a} - \Delta t, \quad (5)$$

де Δt – час випередження включення дозволяючого сигналу світлофору, с.

За наявності додаткового ТЗ, формула (5)

є вірною для всіх ділянок координованої магістралі, оскільки додаткові ТЗ практично завжди змушені стартувати з місця.

Виходячи з умови, що перший ТЗ в пачці ЗХ прибуває до стоп-лінії світлофору в момент часу 0, рухаючись при цьому зі швидкістю V , дистанція, яку він долає починаючи зі стоп-лінії світлофору, описується рівнянням:

$$S_p = V \cdot t. \quad (6)$$

Зелений сигнал світлофору для додаткового ТЗ загоряється в момент 1, на Δt секунд раніше ніж 0 і його рівняння руху в рівноприскореному режимі матиме такий вигляд:

$$S_a = \frac{a \cdot t_v^2}{2}. \quad (7)$$

Тоді, виходячи з рівнянь (6) та (7) друга складова умови (1) записується як:

$$V \cdot t = \frac{a \cdot t_v^2}{2}. \quad (8)$$

Щоб знайти з цього рівняння значення Δt , потрібно підставити до цього рівняння вирази для проміжків часу t (5) і t_v (4):

$$V \cdot \left(\frac{V}{a} - \Delta t \right) = \frac{a \left(\frac{V}{a} \right)^2}{2} \quad (9)$$

та, після очевидних алгебраїчних перетворень:

$$\left(\frac{V}{a} \right)^2 - \frac{V}{a} \Delta t = \frac{\left(\frac{V}{a} \right)^2}{2} \Rightarrow \frac{\left(\frac{V}{a} \right)^2}{2} = \frac{V}{a} \Delta t,$$

отримати шукане значення, яке складає:

$$\Delta t = \frac{V}{2a}. \quad (10)$$

Тобто час випередження для ТЗ у вигляді точки дорівнює половині часу розгону додаткового ТЗ до розрахункової швидкості.

Отримана залежність добре ілюструється новим графіком, якщо на ньому відобразити Δt відповідно до отриманого в (10) значення, рис. 2.

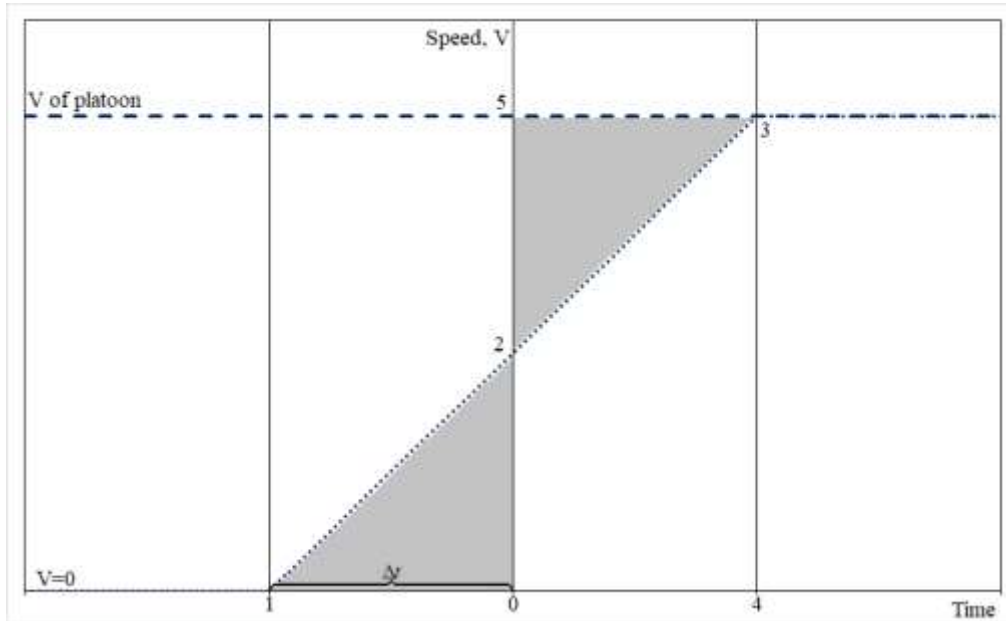


Рис. 2. Швидкість руху пачки ЗХ та додаткового ТЗ у вигляді точки, за умови забезпечення рівномірного руху ТП в ПК

Обидві умови з системи (1) тут виконуються. Рівність швидкостей пачки ЗХ та додаткового ТЗ досягається в точці 3, а друга умова рівності їх шляхів $S_p = S_a$ на графіку виконується, коли площа прямокутника 0-5-3-4 дорівнюватиме площі трикутника 1-3-4. Очевидно, що для цього необхідно, щоб дорівнювали площі трикутників 1-2-0 і 2-5-3. Так як ці трикутники є подібними, для рівності їх площини достатньо, щоб хоча б одна зі сторін одного трикутника дорівнювала відповідній стороні іншого трикутника. Тобто довжина відрізка 1-0 має дорівнювати довжині відрізка 5-3. З цього витікає, що мають бути рівними відрізки 1-0 та 0-4, а довжина відрізка 1-0 дорівнює половині довжині відрізка 1-4. Оскільки відрізок 1-4 відображає $\frac{V}{a}$ – тривалість розгону додаткового ТЗ до розрахункової швидкості пачки ЗХ, то $\Delta t = \frac{V}{2a}$, що й було отримане раніше в (10).

Розробка моделі оцінки часу випередження включення зеленого сигналу на СО по відношенню до розрахункового часу прибуття першого координованого автомобіля з урахуванням динамічного габариту

Отриманий вираз є добре зрозумілим, але він характеризує час випередження за умови відсутності у ТЗ динамічного габариту. Для його врахування необхідно ввести відповідні

зміни до системи (1), тобто переписати другу умову зустрічі пачки ЗХ та додаткового ТЗ. Для цього необхідно обрати місце розташування на ТЗ точки, якою він був представлений на графіках, рис. 1 і 2. Природним вибором тут є передній край ТЗ, тоді увесь його динамічний габарит розташований позаду цієї точки та час випередження має визначатися за умови:

$$\begin{cases} V_a = V \\ S_p = S_a + D \end{cases} \quad (11)$$

де D – динамічний габарит додаткового ТЗ, м.

З його врахуванням рівняння (8) прийме наступний вигляд:

$$V \cdot t = \frac{a \cdot t^2}{2} + D. \quad (12)$$

Після аналогічних точковому випадку підстановок (9) та перетворень, оновлене значення часу випередження складатиме:

$$\Delta t_d = \frac{V}{2a} + \frac{D}{V}, \quad (13)$$

де Δt_d – час випередження включення дозволяючого сигналу світлофору з врахуванням динамічного габариту додаткового ТЗ, с.

Динамічний габарит додаткового ТЗ скла-

дається з довжини його корпусу та дистанції безпеки між ним та наступним за ним ТЗ:

$$D = L + d(V), \quad (14)$$

де L – середня довжина додаткового ТЗ, м; $d(V)$ – безпечна дистанція між ТЗ на швидкості V , м/с.

Якщо довжина ТЗ не залежить від швидкості, безпечна дистанція є функцією від його швидкості та її використання в чисельнику дробу зі швидкістю, як знаменника, є некоректним. Ця функція має індивідуальний характер, обумовлений ставленням водіїв до безпеки руху, технічними характеристиками ТЗ, дорожніми умовами, тощо. Тому доцільно представити обумовлену нею частину безпосередньо часовим інтервалом безпеки, для якого існують загальноприйняті орієнтири, після чого вираз для часу випередження (13) прийме наступний вигляд:

$$\Delta t_d = \frac{V}{2a} + \frac{L}{V} + T_s, \quad (15)$$

де T_s – часовий інтервал безпеки руху, тобто проміжок часу, необхідний для подолання дистанції безпеки на поточній швидкості, с.

Отриманий вираз відображає мінімальне значення часу випередження, яке дозволяє забезпечити рівномірний рух пачки ЗХ за умови наявності перед стоп-лінією перехрестя одного додаткового ТЗ.

Практичний приклад визначення часу випередження

Маючи залежність (15) стає можливим на простому прикладі оцінити час, який необхідно резервувати в циклі для забезпечення рівномірного руху пачки ТЗ у ЗХ. Нехай швидкість руху пачки ЗХ відповідає обмеженню на її максимальне значення в містах згідно Правил дорожнього руху України [15], $V=50$ км/год або $V \approx 14$ м/с, а середнє прискорення ТЗ при старті з місця в звичайних умовах руху становить $a = 1,0$ м/с² [1, 16-18] і тоді, без урахування динамічного габариту $\Delta t = 7$ с.

Урахування динамічного габариту додаткового ТЗ складається з часу проїзду статичного габариту ТЗ, який для легкового ТЗ можна прийняти рівним 5 м і тоді шуканий час складе $\frac{5}{14} = 0,36$ та часового інтервалу безпеки між ТЗ. Останній визначається кожним водієм індивідуально, але цю дистанцію мо-

жна приблизно оцінити за відомим правилом 3-х секунд, необхідних для екстреного гальмування: 1-а секунда на реакцію, 2-а – на натискання гальма і 3-я – на проміжок до переднього ТЗ після зупинки. Тоді загальний час, мінімально необхідний для забезпечення рівномірного руху ТЗ у пачці складе:

$$\Delta t_d = 7 + 0,36 + 3 = 10,36 \text{ с.}$$

Цей час перевищує сумарну тривалість проміжних сигналів і становить 8,6 % від рекомендованої максимальної тривалості циклу СР у 120 с., тобто для багатьох циклів вона буде перевищувати 10 %. Це дуже багато та тут необхідно згадати, що це лише мінімальне значення часу випередження, за умов наявності лише одного додаткового ТЗ. Бажання домогтися рівномірного руху пачки при більшій кількості додаткових ТЗ призведе до значно більших втрат часу на перехресті та значного зниження ПС регульованого перехрестя, швидкого зростання навантаження на неосновних напрямках руху і, як наслідок, до ще різкішого збільшення часу очікування можливості проїзду на них. Такі наслідки є занадто високою платою за зручність руху магістраллю, координоване керування на якій має призводити до економії часу руху всіх його учасників. Тому, при наявності додаткових ТЗ на координованій магістралі, виконувати умову рівномірності руху пачки ЗХ без застосування спеціальних методів організації руху ТЗ на магістралі можна тільки при низьких інтенсивностях ТП на другорядних напрямках.

Отримане значення часу випередження підтверджує необхідність використання інших методів визначення тривалості СЦ у ПК, ніж формула Вебстера [5], задля врахування особливостей координованого потоку ТЗ. Воно також свідчить про бажаність більш уважного ставлення до засобів вирівнювання швидкості руху, ніж це прийнято в практиці ОДР на цей час, про що свідчить відсутність передсигналів у ПК, проаналізованих в огляді літератури, та у всіх інших, відомих авторам планах. За допомогою формули (7) можна розрахувати мінімальну відстань від передсигналу до основного світлофору, коли пачка ЗХ наздоганяє додатковий ТЗ на стоп-лінії перехрестя. При прийнятих значеннях розрахункової швидкості та прискорення, воно складе:

$$S_a = \frac{14^2}{2} \approx 100,$$

що відрізняється в більший бік від існуючих на цей час рекомендацій [12], незважаючи на те, що отримане значення є мінімальною оцінкою відстані між передсигналом та основним світлофором, для одного додаткового ТЗ.

Отримані результати в цілому свідчать про наявність істотних резервів у процесах створення та реалізації ПК, так як для реальних швидкостей руху та прискорень ТЗ при старті, вимога про незмінність швидкості руху пачки ЗХ зазвичай не враховується в реалізованих на практиці ПК. Коливання швидкості ТЗ у пачці ЗХ в такому випадку є невід'ємною частиною процесу функціонування існуючих ПК. Вони мають бути досліджені на предмет ставлення водіїв ТЗ до необхідності здійснювати прискорення та уповільнення різної інтенсивності при русі по зеленому коридору, задля визначення зони комфорту в коливаннях швидкості. Це надасть цінну інформацію розробникам ПК та відповідного програмного забезпечення, стосовно їх можливостей при визначенні зсувів початку циклів з метою підвищення ефективності функціонування координованих ММ.

Висновки

Практично для всіх проаналізованих методів координації характерною є відсутність уваги їх розробників до питань рівномірності руху пачки ЗХ по координованих фрагментах ВДМ. Згадування рівномірності руху ТЗ в умовах координованої роботи СО зустрічається лише в поодиноких випадках, які не закінчилися практично придатними до використання рекомендаціями. Підтвердженням цьому є відсутність практики використання в планах координації «передсигналів», які є дієвим засобом забезпечення рівномірності руху пачки ЗХ без втрати ПС координованих перехресть. Загалом це свідчить про не зовсім глибоке занурення дослідників у тему координації, яке викликано тим, що ще не до кінця вирішені її базові та головні питання – визначення раціональних параметрів циклів СР та ефективних зсувів їх початку, з урахуванням додаткових ТЗ, які збираються перед стоп-лінією світлофору за час сигналу, що забороняє рух по координованій магістралі.

Повна оцінка часу випередження, необхі-

дного для забезпечення рівномірного руху ТП ММ, який формується як результат взаємодії великої множини випадкових чинників, полягає у визначенні виду закону та параметрів розподілу часу. Для отримання першого, загального уявлення про процес взаємодії пачки ЗХ та додаткових ТЗ, така оцінка є дещо надлишковою. Тому за базову оцінку часу випередження прийнято його нижню межу – час випередження включення зеленого сигналу світлофора за умови наявності в черзі лише одного додаткового ТЗ. Умови руху для нього при старті зі стоп-лінії перехрестя є вільними, що дозволяє кардинально скоротити кількість випадкових чинників та отримати бажану оцінку на основі середнього прискорення ТЗ при старті зі стоп-лінії світлофору.

Створені, з використанням загальновідомих формул кінематики прямолінійного рівноприскореного руху точки, аналітичні моделі надають змогу оцінювати мінімальний час випередження початку дозвольного сигналу світлофору через розрахункову швидкість руху та середнє прискорення одного додаткового ТЗ при старті зі стоп-лінії перехрестя. За умови руху пачки ЗХ зі швидкістю 50 км/год та середньому прискоренні 1 м/с², він перевищує 10 секунд.

Результати оцінювання мінімального часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки ЗХ дозволяють стверджувати, що для реальних швидкостей руху та прискорень ТЗ при старті від стоп-лінії перехрестя, вимога про сталість швидкості руху пачки ЗХ є занадто жорсткою, особливо, якщо врахувати, що час випередження буде значно зростати зі збільшенням кількості додаткових ТЗ в черзі. У сучасних методах розрахунку тривалості світлофорних циклів для ПК час випередження взагалі ніяк не враховується. Тобто в створених на цей час та працюючих у містах планах магістральної координації не виконується вимога, щодо забезпечення для ТЗ можливості подолання координованої ділянки ММ з постійною розрахунковою швидкістю, а водії зі складу пачки ЗХ вимушені підлаштовуватися під коливання швидкості, які виникають навколо чергового перехрестя.

Намагання розробників ПК забезпечити водіям зі складу пачки ЗХ можливість подолання координованої ділянки ММ з постійною розрахунковою швидкістю, без застосування додаткових засобів ОДР буде призво-

дити до зниження ПС координованих перехресть. При постійній інтенсивності ТП це означає підвищення рівня навантаження на них та зростання затримок ТЗ на другорядних напрямках, яке при середніх і високих інтенсивностях трафіку може призвести до загального негативного результату від впровадження ПК. Ефективним заходом подолання цієї проблеми може бути встановлення на ділянці перед координованими світлофорами передсигналів, але реалізація цього заходу зараз можлива лише емпіричним шляхом, внаслідок відсутності методик визначення параметрів роботи та практичного досвіду застосування додаткових світлофорів у ПК.

Загалом, отримані результати свідчать про актуальність поглибленого вивчення процесів функціонування магістральних ПК задля оцінки ставлення водіїв до необхідності змінювання швидкості руху в складі пачки ЗХ, визначення закономірностей накопичення додаткових ТЗ перед перехрестями та можливостей їх врахування в жорстких або адаптивних ПК, створення методик розрахунку раціональних параметрів функціонування передсигналів та розробки методів розрахунку тривалості світлофорного циклу з врахуванням групового характеру прибуття ТЗ з пачки ЗХ до координованих перехресть.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. HCM 2010: highway capacity manual. (2010). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
2. Teply, S., Allingham, D., Richardson, D. & Stephenson, B. (2008). Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections – Third Edition. Ottawa: Institute of Transportation Engineers.
3. 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>.
4. 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.
5. Webster, F.V. (1958). Traffic Signal Setting. Department of Scientific and industrial Research, Road Research Technical Paper No. 39. London, England.
6. Akçelik, R. (1981). Traffic signals: capacity and timing analysis, ARR 123, Australian Road Research Board, Vermont South Vic., Australia. (Fourth Reprint 1989).
7. 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.
8. Traffic Control Signal Design Manual. (2009). Connecticut Department of Transportation Bureau of Engineering and Construction Division of Traffic Engineering.
9. Горбачов, П.Ф., Свічинський, С.В., Шевченко, В.В. (2020). Визначення граничного рівня завантаження другорядних підходів до міської магістралі з координованим керуванням. Вісник ХНАДУ. №90. 144–154. Horbachov, P.F., Svichynskyi, S.V. & Shevchenko, V.V. (2020). Vyznachennia hranychnoho ravnia zavantazhennia druhoriadnykh pidkhodiv do miskoi mahistrali z koordynovanim keruvanniam. [Determining the maximum threshold of saturation level for minor approaches to the arterial street with coordinated control]. Visnyk KhNADU. №90. 144–154. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.144>
10. Inose, H. & Hamada, T. (1975). Road traffic control. Tokyo: University of Tokyo Press.
11. Von Stein, W. (1961). Traffic flow math pre-signals and the signal funnel. Theory of traffic flow: proceeding of the 1st International Symposium on the Theory of Traffic Flow. Amsterdam: Elsevier. 28-56.
12. Капский Д.В., Навой Д.В. (2010). Методика определения экономических потерь при координированном регулировании движения транспортных и пешеходных потоков. Вестник БНТУ. № 4. 60-70. Kapskiy D.V. & Navoy D.V. (2010). Metodika opredeleniya ekonomicheskikh poter pri koordinirovannom regulirovanii dvizheniya transportnykh i peshehodnykh potokov. [Methodology of determining economic losses in the coordinated traffic control of transport and pedestrian flows]. Vestnik BNTU. № 4. 60-70. [in Russian].
13. Любий Є.В. (2022). Постановка задачі оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки «зеленої хвилі». Discovering New Horizons in Science and Prospects for Implementation of Innovations: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference. Dnipro. 117-119. Liubiy Ye.V. (2022). Postanovka zadachi otsinky chasu, neobkhdnoho dlia zabezpechennia rivnomirnoho rukhu pachky «zelenoi khvyli». [Setting the problem of estimation of the time required to ensure the uniform motion of vehicle platoon progression]. Discovering New Horizons

- in Science and Prospects for Implementation of Innovations: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference. Dnipro. 117-119. [in Ukrainian].
14. Nachlas, J.A. (2017). Reliability Engineering: Probabilistic Models and Maintenance Methods (2nd Edition). Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781315307596>.
 15. Правила дорожнього руху України. Pravyła dorozhnoho rukhu Ukrainy. [Traffic rules of Ukraine]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
 16. Liang, X., Du, X., Member, S., & Wang, G. (2019). A deep reinforcement learning network for traffic light cycle control. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 68. 1243-1253. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2890726>.
 17. Bogdanović, V., Rušić, N., Papić, Z. & Simeunović, M. (2013). The Research of Vehicle Acceleration at Signalized Intersections. Promet – Traffic&Transportation. Vol. 25. No. 1. 33-42 <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i1.1245>.
 18. Long, G. (2000). Acceleration Characteristics of Starting Vehicles. Transportation Research Record. 1737(1). 58-70. <https://doi:10.3141/1737-08>.

Горбачов Петро Федорович¹, д.т.н., проф., зав. каф. транспортних систем і логістики, тел. +38050-303-2622, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072

Любий Євген Володимирович¹, к.т.н., доц., каф. транспортних систем і логістики, докторант, тел. +38050-166-1808, e-mail: lion_khadi@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0681-0920

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Method of estimating the time required to ensure the uniform motion of vehicle platoon progression on the coordinated section of the city arterial road

Abstract. Problem. The problem of distributing competing flows of road users in time is prevalent worldwide, and there is no fully justified and intelligible solution, even if only traffic flows can be considered. At the busiest street intersections, the primary means of traffic management is traffic signal

control. If the traffic lights are close to each other, then it is a good practice to coordinate the operation of such traffic lights to organise the most unhampered movement of vehicles in one or several directions; that is the progression. **Goal.** The goal is estimation of the time required to ensure the uniform motion of vehicle platoon progression on the coordinated artery of the city arterial. **Methodology.** The developed approach is based on the use of analytical research methods and allows to formalize the interaction of the platoon progression with additional vehicles. **Results.** The results of the estimation of the minimum time required to ensure the uniform motion of the platoon progression allow us to state that for actual speeds and vehicle accelerations when starting from the stop-line of the intersection, the requirement for the uniform motion of the platoon progression is too strict, especially if we take into account that advance time will increase significantly as the number of additional vehicles in the queue increases. **Originality.** Analytical models created using formulas of the kinematics of rectilinear uniform accelerated motion of a point make it possible to estimate the minimum advance time of the start of the traffic light signal due to the deliberate speed of traffic and the average acceleration of one additional vehicle when starting from the stop-line of the intersection. **Practical value.** The developed models reflect the minimum value of the advance time, which ensures uniform motion of the platoon progression, provided that there is one additional vehicle at the stop-line of the intersection.

Key words: progression; coordinated timing plan; uniform motion; traffic signal control, traffic flows; advance time.

Horbachov Peter¹, D.Sc, Professor, Head of the Department of Transportation Systems and Logistics, tel. +380503032622, gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072

Liubiy Yevhen¹, PhD. of Engineering, Associate Professor of the Department of Transportation Systems and Logistics, tel. +380501661808, e-mail: lion_khadi@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0681-0920

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.