

УДК 656.051

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.168

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСКОРЕНОГО РУХУ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ ПІД ЧАС КООРДИНОВАНОГО РУХУ

Горбачов П. Ф., Абрамова Л. С., Литвиненко І. В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Координоване управління дорожнім рухом є прогресивним методом управління на магістралях міст, тому що сприяє підвищенню пропускної спроможності елементів транспортної мережі, безпеці дорожнього руху та зменшенню часу пересування транспортного потоку завдяки організації безупинного руху на ділянках координації. Розроблення планів координованої роботи суміжних світлофорів на міських вулицях вимагає узгодження параметрів управління з умовами руху на вибраному для координації фрагменті вулично-дорожньої мережі. Одним з таких параметрів, необхідних для координації, є раціональна величина зсуву фаз циклу світлофорного регулювання, яка визначається на основі часу проїзду автомобілями перегону між регульованими перехрестями. Нині для цього зазвичай використовується час, отриманий діленням довжини перегону на розраховану швидкість руху зеленої хвилі. Але в умовах високого трафіка, для яких побудова плану координації є найбільш актуальним питанням, з перехрестя першими відправляються автомобілі, які прибули до нього з другорядних напрямків. Вони стартують з місця, і відповідні моделі аналізу часу проїзду перегону мають засновуватися як на рівномірному, так і на прискореному русі. Визначити останні набагато складніше, і для вирішення цього питання створений новий метод розрахунку параметрів лінійної моделі спадального прискорення, який дозволяє оцінювати їх в конкретних умовах руху на основі двох величин: довжини перегону та випадкового часу його безперешкодного проїзду. Цей метод був перевірений на експериментальних даних і підтвердив свою працездатність. Були визначені параметри лінійної моделі спадального прискорення та швидкість рівномірного руху, які подібні до загальновідомих моделей прискореного руху.

Ключові слова: організація дорожнього руху, план координації, зсув фаз світлофорного регулювання, прискорення автомобіля, рівномірний рух, транспортний потік, випадкова величина, статистична залежність.

Вступ

Кількість робіт, де досліджуються час зсуву фаз світлофорного регулювання в планах координації (ПК) та закономірності руху автомобілів під час старту з місця, є досить обмеженою, що контрастує зі значною кількістю матеріалів щодо методів створення ПК загалом. Проте питання розрахунку часу зсуву фаз регулювання в ПК у таких роботах майже не розглядається. У методичних матеріалах і наукових працях відсутні формули, за якими можна розрахувати раціональний зсув фаз регулювання для відомої довжини перегону між суміжними світлофорами ділянки координації. Дослідження цього питання в будь-якій роботі завжди обмежується вербальним аналізом поглядів авторів щодо того, на що потрібно звернути увагу, розраховуючи зсув фаз у процесі координації. Автори не досліджують очевидну умову такого розрахунку за високого трафіка, тобто старт автомобілів з місця на перехрестях ділянки координації з другорядних напрямків, на їхню думку, достатньо лише визначити час

проїзду перегону, якщо визначені розрахункова швидкість руху пачки автомобілів і довжина ділянки.

Реальною причиною цього є те, що майже не досліджується координований рух автомобілів. З огляду на це маємо низький рівень вимог до параметрів планів, на якому точність визначення раціональних значень зсуву фаз циклів не є актуальною. Поверхнева позиція розробників під час розрахунків зсувів у реальному транспортному процесі компенсується наявними природними коливаннями швидкості координованої пачки автомобілів, які є невід'ємною частиною процесу її руху.

Для підвищення ефективності ПК необхідно враховувати той факт, що в завантажених умовах функціонування «зеленої хвилі» перед стоп-лінією чергового координованого перехрестя майже завжди утворюється черга автомобілів, які з'являються з другорядних напрямків і прямують на ділянки координованої магістралі з попереднього перехрестя й інших джерел. Варто зазначити, що ці автомобілі доповнюють скоординовану пачку

спереду і час зсуву має розраховуватися на основі параметрів саме їхнього руху. Тому необхідно створити відповідний апарат моделювання прискореного руху автомобілів під час старту з місця на перехрестях.

Аналіз публікацій

Основним джерелом інформації про моделювання прискореного руху автомобілів під час старту з місця є наукове дослідження Лонга [1], що містить аналіз досягнень щодо цього питання на початок XXI століття і є елементом аналізу джерел інших робіт. У ній наведено критичний аналіз нормативних документів і на основі фактичних даних обґрунтовано доцільність використання лінійної моделі спадального прискорення. Пошук фактичних даних щодо параметрів розгону автомобілів здійснювався за допомогою спеціально облаштованих автомобілів або через фіксацію швидкості на поперечних перерізах дороги. Ці два способи є досить складними і не дозволяють здійснювати обстеження за реалізації кожного ПК, крім того, перший спосіб не є об'єктивним щодо результатів. Але модель отримана завдяки аналізу значного обсягу фактичної інформації і є загальноприйнятною та найбільш розповсюдженою моделлю прискорення автомобілів з місця у звичайних умовах руху.

Автор наступної за часом роботи [2] не враховує результатів Лонга [1] і пропонує використовувати подвійну модель постійного прискорення задля врахування тенденції щодо зниження прискорення автомобіля протягом часу. Це підтверджує справедливість використання моделі спадального прискорення, але занадто спрощує її.

У роботі [3] проаналізовано дані, отримані під час польових випробувань інтелектуального круїз-контролю, що проводили 1996 року в Мічигані. Метою випробувань було визначення впливу поведінки водія в процесі уповільнень і прискорень на сільських перехрестях, облаштованих знаками «стоп», коли водієві не перешкоджає автомобіль, що прямує попереду. Результатами аналізу є наявність випадкової складової у швидкості прискорення, що була ініційована водіями, що демонструє стохастичний тип поведінки водія в процесі прискорення, який варто враховувати, визначаючи параметр зсуву фаз у ПК.

Типовим є підхід до моделювання прискорення автомобілів з використанням його

технічних характеристик як факторів прискорення [4]. Як і в попередніх роботах, автори [4] отримали складну статистичну модель, яка підтверджує загальну тенденцію прискорення до зниження під час розгону, але не враховує випадкової поведінки водіїв, оскільки вона визначена в моделі через завдання постійного значення цільової швидкості руху. Тобто спроби врахувати динамічні властивості автомобілів, незважаючи на значне ускладнення моделей, не наближають їх до можливості використання під час побудови ПК.

Питання моделювання швидкості прискорення й уповільнення на складній двосмуговій сільській дорозі на основі експерименту під час руху в нічний час досліджено в роботі [5]. Результати демонструють суттєву залежність поведінки водіїв від геометричних параметрів дороги, зокрема від напрямку кривої, її радіуса, довжини горизонтальної кривої та індексу вертикальної кривої, що свідчить про необхідність врахування умов руху на конкретних ділянках мережі під час визначення раціонального часу зсуву фаз у ПК.

Результати відеообстеження прискореного руху автомобілів на 10-ти регульованих перехрестях сербського міста Новий Сад наведені в роботі [6]. Автори підтвердили спадальний тип прискорення, вплив водіїв на вибір режиму руху, але не надали рекомендацій щодо способів налаштування моделі прискореного руху для місцевих умов.

Результати спостережень за прискоренням автомобілів на магістральних рампах в Америці [7] свідчать про наявність початкового періоду збільшення прискорення під час старту з місця. Але цей період є досить нетривалим, як порівняти з основним періодом спадального прискорення, і може бути легко нівельований налаштуванням параметрів моделі.

В останніх дослідженнях прискореного руху автомобілів під час старту з місця [8, 9] аналізуються окремі його аспекти для різних типів транспортних засобів, але в них не вирішено питання визначення зсувів фаз циклів у ПК.

Мета та постановка завдання

Завантажені умови руху, побудова ПК для яких є найбільш актуальним завданням, визначають однозначні умови для розрахунку зсуву фаз світлофорних циклів, який має враховувати час розгону автомобіля до зада-

ної швидкості руху пачки. Тобто в процесі розрахунку зсуву фаз необхідно враховувати як швидкість руху пачки, так і прискорення першого автомобіля в ній. Варто зазначити, що саме перший автомобіль у більшості випадків визначає час прибуття до наступного перехрестя в координаті. Для створення коректного ПК необхідно записати рівняння, за яким розраховуватиметься час проїзду перегону перед черговим перехрестям автомобілем, який стартує з початку перегону.

Однак отримання лише рівняння часу зсуву фаз для широкого використання в ПК недостатньо через особливості психофізичного стану та поведінки учасників руху в різних містах, різноманітний склад транспортного потоку, різні умови руху на конкретних ділянках мережі й інші індивідуальні характеристики об'єкта координаті. Значний розкид можливих характеристик розгону аналізується в [1], де зазначено доцільність створення індивідуальних моделей руху автомобілів у конкретних випадках. Тому, крім рівняння часу зсуву фаз, необхідно створити відповідний метод визначення параметрів моделі руху автомобілів з місця вздовж координованої ділянки міської магістралі, яка дозволить досягти зазначеної мети на основі простих спостережень за реальним транспортним потоком на об'єкті координаті.

Така необхідність виникає внаслідок відсутності на сьогодні методів, що дозволяють статистично оцінювати параметри моделей прискореного руху автомобілів на основі лише двох відомих параметрів: часу руху та пройденої відстані, які можна легко отримати за допомогою натурних обстежень. Всі результати пошуку рівняння руху транспортних засобів з місця належать до робіт, в яких, крім часу та відстані, фіксувалася ще й швидкість руху автомобіля в процесі розгону на заданих розрізах дороги [1]. А такі обстеження вимагають використання спеціального обладнання – радарів швидкості, що ускладнює цей процес. Саме ця складність є основною причиною обмеженої кількості робіт з динаміки розгону автомобілів у транспортному потоці.

Під час такого обстеження аналіз швидкості руху автомобілів у процесі розгону дозволяє розрахувати середні значення прискорення між контрольними точками, а потім використати стандартні методи математичної статистики для визначення залежності прискорення від швидкості руху автомобіля. Таке поєднання залежної та незалежної ознак у

моделі розгону є логічним та загальноприйнятним, що підтверджено результатами попередніх досліджень, в яких прискорення знижувалося зі збільшенням швидкості. Логіка цього процесу є зрозумілою, оскільки зі збільшенням швидкості опір руху автомобіля збільшується, а обертальний момент на колесах знижується, що зменшує технічні можливості автомобіля під час його розгону. Тому незважаючи на індивідуальний тип поведінки учасників руху отримуємо загальну закономірність зниження прискорення.

Спочатку необхідно вибрати вид моделі та визначити її параметри за допомогою методу найменших квадратів. На сьогодні в транспортній сфері поширена модель, яка зв'язує прискорення $a(t)$ і швидкість $v(t)$ – лінійно спадальна модель прискорення [1]:

$$a(t) = A + b \cdot v(t), \quad (1)$$

де $a(t) \equiv a$ – прискорення автомобіля в момент часу t , m/c^2 ; A – вільний член моделі розгону автомобіля, m/c^2 ; b – коефіцієнт моделі розгону автомобіля, $b < 0$, c^{-1} .

Її параметри визначені для багатьох видів транспортних засобів та різних типів поведінки водія в різних місцях [1]. Наприклад, для легкових автомобілів та водіїв з помірним стилем водіння для застосування під час транспортного планування рекомендовані значення $A = 2$ і $b = -0,12$ [1]. Такі значення через вищезазначені причини можуть не відповідати умовам, для яких створюється ПК, що потребує додаткових досліджень і визначення локальних значень коефіцієнтів A та b . Створювати під час розроблення ПК щоразу нову модель розгону автомобіля вищезазначеним методом з фіксацією швидкості досить складно, а відмова від налаштування моделі на місцеві умови може призвести до помітного погіршення ПК.

Однак скоротити вимоги до обстеження у випадку розгону може допомогти наявність відомих з кінематики функціональних зв'язків між часом руху, прискоренням, швидкістю та пройденою відстанню. Вони дозволяють перейти до іншої послідовності дій щодо вибору виду та визначення параметрів моделі, що поєднує прискорення та швидкість руху автомобіля. Для цього спочатку необхідно задати загальний вид функції $a = f(v)$, а потім на її основі розв'язати аналітичні рівняння часу, відстані та швидкості руху автомобіля через їх функціональні залежності. Після цього за допомогою отриманої ана-

літичної залежності між часом і пройденою відстанню, в якій містяться невідомі параметри A і b , можна знайти їхні значення, що визначають результати спостережень за об'єктом координаті. Вони також забезпечують отримання конкретного виду функції $a = f(v)$, яка визначає залежність прискорення швидкості для реального транспортного потоку в місцевих умовах.

Такий набір даних, що складається з часу руху і пройденої автомобілем за цей час відстані, можна отримати за допомогою безпосередніх вимірів або в процесі оброблення відповідного відеореєстру. Такий відеореєстр можна отримати з камер відеоспостереження на досліджуваній ділянці магістралі або за допомогою звичайної відеозйомки досліджуваного перегону магістралі, що координується. Найпростіший спосіб для отримання потрібних даних полягає у фіксації моменту старту автомобіля зі стоп-лінії світлофора на початку перегону та перетинання ним стоп-лінії світлофора наприкінці перегону, відстань між якими за допомогою картографічних сервісів визначити зовсім не складно.

Ця методика дозволяє суттєво спростити обстеження, знизити витрати на проведення, зробити їх загальнодоступними та отримати необхідну кількість спостережень для надійного статистичного аналізу параметрів моделі руху в будь-якому місці нашої планети. А такі властивості дають досить вагому перевагу для розробленого методу аналізу параметрів рівняння руху, оскільки загальною рисою статистичних залежностей є їхній локальний тип, тобто конкретний набір експериментальних даних, які можуть суттєво відрізнятися в різних місцях.

Водночас відсутність серед фактичних даних швидкості руху все ж таки створює певні складнощі під час пошуку коефіцієнтів функції прискорення за вибраним методом. Незнання швидкості позбавляє дослідника можливості точно визначити точку закінчення розгону та переходу до рівномірного руху на вибраній водієм швидкості. А ці відрізки шляху визначені різними залежностями. Тому не можна застосовувати формули прискореного руху до всього шляху, пройденого автомобілем за певний час. Їх можна використовувати лише на ділянці розгону, який складно виокремити серед отриманих експериментальних даних через відсутність у них швидкості руху.

Це можна зробити за допомогою випадкового типу швидкості руху, яка індивідуально вибирається кожним водієм. Ця випадковість не лише ускладнює процес визначення тривалості розгону, але також вимагає її усереднення, як і параметри прискорення під час розгону. Тому аналіз середньої швидкості руху може стати частиною процесу налаштування моделі на експериментальні дані, тобто ще одним параметром коефіцієнтів моделі прискорення. Для цього потрібно записати залежність часу руху на ділянці від її довжини з урахуванням розгону та рівномірного руху, межа між якими визначається через невідому швидкість, а також знайти коефіцієнти моделі розгону та середню швидкість руху автомобілів за допомогою методу найменших квадратів.

Метод аналізу параметрів лінійної моделі спадального прискорення

Нехай автомобіль, який стоїть перед стоп-лінією світлофора, починає прискорений рух (розгін) з місця, тобто

$$t_0 = 0; \quad v_0 = 0 \quad \text{и} \quad S_0 = 0, \quad (2)$$

де t – час руху автомобіля, а t_0 – час початку руху автомобіля з місця, с.;

$v \equiv v(t)$ – швидкість руху автомобіля в момент часу t ; v_0 – початкова швидкість руху автомобіля на старті з місця, м/с.;

S – довжина шляху, пройденого автомобілем за час t , S_0 – довжина шляху на початку руху, м.

Нехай прискорення його розгону підпорядковується закону (1), який є диференціальним рівнянням з відокремленими змінними, оскільки прискорення є похідною швидкості за часом:

$$\frac{dv}{dt} = A + b \cdot v \Rightarrow \frac{dv}{A + b \cdot v} = dt. \quad (3)$$

Для розв'язання цього рівняння його потрібно проінтегрувати:

$$\int \frac{dv}{A + b \cdot v} = \int dt \Rightarrow \frac{\ln(A + b \cdot v)}{b} = t + C' \Rightarrow \\ \Rightarrow \ln(A + b \cdot v) = bt + \ln(C')$$

де C' – константа інтегрування, яку можна записати так:

$$e^{\ln(A+b \cdot v)} = e^{(bt + \ln(C))} \Rightarrow A + b \cdot v = e^{bt} e^{\ln(C)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v = \frac{C e^{bt} - A}{b},$$

де $C = e^{\ln(C)}$ – кінцева форма константи інтегрування.

Для початкових умов (2) константа інтегрування C дорівнює

$$v_0 = 0 = \frac{C - A}{b} \Rightarrow C = A,$$

а рівняння швидкості можна записати так:

$$v = \frac{A}{b} (e^{bt} - 1). \quad (4)$$

Отже, можна отримати рівняння часу залежно від швидкості:

$$e^{bt} = \frac{bv}{A} + 1,$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{bv}{A} + 1\right)}{b}. \quad (5)$$

Оскільки швидкість є похідною шляху часу, з (4) можна отримати рівняння шляху, пройденого автомобілем за час t :

$$S = \frac{A}{b} \int (e^{bt} - 1) dt \Rightarrow S = \frac{A}{b^2} e^{bt} - \frac{A}{b} t + C''.$$

Для початкових умов (2) константа інтегрування C'' з цього виразу дорівнює

$$0 = \frac{A}{b^2} e^{b \cdot 0} - \frac{A}{b} \cdot 0 + C'' \Rightarrow C'' = -\frac{A}{b^2},$$

Отже, отримуємо рівняння шляху:

$$S = \frac{A}{b^2} (e^{bt} - 1) - \frac{A}{b} t. \quad (6)$$

Згідно з визначенням завдання дослідження, з цієї формули необхідно отримати її зворотній варіант, тобто залежність виду $t = f(S)$, щоб потім використовувати її для аналізу значень коефіцієнтів методом мінімізації суми квадратів різниці між фактичними та

розрахунковими значеннями часу подолання ділянки, довжиною S :

$$\sum_{i=1}^N (t_{ei} - t_{ai})^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

де t_{ei} , t_{ai} – експериментальне (фактичне) та розрахункове значення часу подолання ділянки, довжиною S_{ei} , для i -го спостереження з набору експериментальних даних, s^2 ; N – загальна кількість спостережень у наборі експериментальних даних, од.

Але зробити необхідне перетворення в аналітичному виді неможливо внаслідок занадто складного типу (6). Тобто функцію лінійно спадального прискорення (1) неможливо використати для запропонованого методу мінімізації критерію (7). Але це не означає, що її неможливо використати в запропонованому методі, оскільки коефіцієнти можна отримати зі «зворотної» суми квадратів різниці, якщо як різницю використовувати не час, а довжину поїздки за час t :

$$\sum_{i=1}^N (S_{ei} - S_{ai})^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

де S_{ei} , S_{ai} – фактичне та розрахункове значення довжини ділянки, яка долається за час t_{ei} , для i -го спостереження з набору експериментальних даних, м.

Перехід від критерію (7) до (8) означає деяке погіршення точності результатів аналізу, оскільки кінцевою метою отримання коефіцієнтів моделі розгону є визначення саме часу зсуву початку циклів, а не довжини перегонів, а випадковий тип експериментальних даних призведе до різних значень A і b у разі використання різних критеріїв точності (7) і (8).

Однак точність результатів моделювання часу завжди може бути оцінена за наявності цих коефіцієнтів через залежності (5) та (4). Цього буде достатньо для досягнення основної мети моделювання: прийняття рішення щодо можливості використання отриманої за допомогою (8) моделі розгону для визначення часу зсуву початку циклів та порівняння її якості з іншими альтернативними моделями. Тоді з огляду на (6), критерій пошуку значень коефіцієнтів A і b (2.8) можна записати так:

$$\sum_{i=1}^N \left(S_i^e - \frac{A}{b^2} (e^{bt_{ei}} - 1) + \frac{A}{b} t_{ei} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Нормальні рівняння для цих двох параметрів є трансцендентними з кількістю доданків, яка в декілька разів більше, ніж кількість спостережень в експерименті, завдяки тому, що експериментальні дані неможливо винести за дужки. Тому шукати аналітичне рішення умови (9) щодо A і b непотрібно через складність системи нормальних рівнянь, а також тому, що в цьому пошуку має бути задіяна швидкість рівномірного руху автомобіля як додатковий параметр моделі, який також визначається з експериментальних даних.

Задля цього залежність (6) необхідно записати так, щоб була врахована можливість подолання автомобілем частини досліджуваної ділянки на постійній швидкості. Це можна зробити за допомогою залежності часу від швидкості (5), до якої підставляється середня швидкість рівномірного руху автомобіля:

$$S_{ai} = \begin{cases} \frac{A}{b^2} (e^{bt_{ei}} - 1) - \frac{A}{b} t_{ei}; \\ \text{при } 0 \leq t_{ei} \leq \frac{\ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b} \\ v_a \left[\frac{b - A \ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b^2} + t_{ei} - \frac{\ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b} \right]; \\ \text{при } t_{ei} > \frac{\ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b} \end{cases}, (10)$$

де v_a – середня швидкість рівномірного руху автомобіля в разі подолання ділянки за час t_{ei} , м/с.

Саме для отриманого з (10) розрахункового значення довжини необхідно знайти мінімум суми квадратів різниць за критерієм (8). Отже, його кінцевий варіант можна записати так:

$$\sum_{i=1}^N S_{ei} - \begin{cases} \frac{A}{b^2} (e^{bt_{ei}} - 1) - \frac{A}{b} t_{ei}; \\ \text{при } 0 \leq t_{ei} \leq \frac{\ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b} \\ \frac{v_a}{b} - \frac{A \ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b^2} + \\ + v_a \cdot \left[t_{ei} - \frac{\ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b} \right]; \\ \text{при } t_{ei} > \frac{\ln\left(\frac{bv_a + 1}{A}\right)}{b} \end{cases} \rightarrow \min, (11)$$

З огляду на досвід отримання системи нормальних рівнянь для більш простого випадку без швидкості шукати мінімум цієї функції аналітичним шляхом не варто. Врахування в критерії (11) невідомої швидкості руху означає появу точки розриву в безперервній функції довжини шляху, що робить неможливими позитивні очікування від диференціювання (11), яке необхідне для аналітичного визначення A , b і v_a . Отже, для їхнього аналізу необхідно використовувати математичні алгоритми пошуку екстремальних значень функції.

У цьому випадку варто визначити можливість застосування таких алгоритмів задля того, щоб у задіяному алгоритмі в процесі пошуку не було б ситуацій, які неможливо вирішити, зокрема таких, які виникають, коли якась змінна в розрахунку впливає із діапазону її можливих значень. Це насамперед стосується значень коефіцієнтів функції розгону A і b та швидкості рівномірного руху v_a , які необхідно знайти. Відповідно до фізичного змісту цих величин і до змісту залежності (2), можна записати такі діапазони варіювання значень цих змінних:

$$A > 0; \quad b < 0; \quad 0 \leq v_a \leq -\frac{A}{b}.$$

Діапазони значень для коефіцієнтів A і b є дуже вільними, що може завадити алгоритму пошуку екстремальних значень через можливу наявність у функції (11) декількох екстремумів. А це достатньо імовірна подія через складний тип (11), тому на етапі обро-

блення даних в експериментальних дослідженнях варто обмежити ці діапазони більш реальними межами на основі результатів спостережень за поїздками автомобілів. Щодо швидкості, то варто визначити тенденцію поведінки часу поїздки в разі її наближення до правої межі діапазону, оскільки підставлення $\left(-\frac{A}{b}\right)$ до рівняння часу (4) призводить до невизначеного виразу $\ln(0)$. Для цього необхідно знайти межу функції t з огляду на негативне значення b :

$$\lim_{v_a \rightarrow -\frac{A}{b}} \frac{\ln\left(\frac{bv}{A} + 1\right)}{b} = \frac{-\infty}{b} = +\infty.$$

Тобто в разі наближення швидкості автомобіля до її правої межі за умови лінійно спадального прискорення, час поїздки прагне нескінченності. Під час експериментального пошуку значень A , b і v_a необхідно визначити максимальне значення швидкості, воно має бути менше, ніж $\left(-\frac{A}{b}\right)$. Відстань, на яку варто віддаляти максимум v_a від цього значення, може бути визначена безпосередньо в процесі пошуку мінімуму суми квадратів. Усе це дозволяє обробити експериментальні дані та знайти невідомі значення функції розгону за умови лінійно спадального прискорення через мінімізацію функції (10).

Визначення параметрів моделі за фактичними даними

З метою перевірки можливостей розробленого методу аналізу параметрів лінійної моделі спадального прискорення було отримано 36 значень часу подолання семи різних перегонів між регульованими перехрестями у м. Харків і м. Вінниця як результат оброблення відеореєстру. Час проїзду фіксувався лише для автомобілів, які були розташовані першими перед стоп-лінією початкового перехрестя перегону під час заборонного сигналу, без перешкод подолали шлях до кінцевого перехрестя і перетнули його стоп-лінію під час дозвольного сигналу.

Отримані в такий спосіб дані відображають лише вподобання водіїв щодо вибору режиму руху на конкретних ділянках, що й потрібно для побудови моделі прискорення для визначення раціональних зсувів фаз цик-

лів у ПК. Для пошуку параметрів моделі був використаний вбудований у Microsoft Excel еволюційний метод пошуку рішення з обмеженнями на коефіцієнти моделі $1,5 \leq A \leq 2,5$ і $-0,2 \leq b \leq -0,1$ та на максимальну швидкість на рівні $0,95 \cdot \left(-\frac{A}{b}\right)$. Пошук рішення призвів до отримання таких результатів мінімізації критерію (11):

$$A = 1,80 \text{ м/с}^2; \quad b = -0,11 \text{ с}^{-1}; \quad v_a = 14,76 \text{ м/с},$$

і кінцевий варіант лінійної моделі спадального прискорення можна записати так:

$$a = 1,8 - 0,11 \cdot v. \quad (12)$$

Отримана модель є принципово подібною до моделей Лонга [1], що свідчить про користь застосування розробленого методу з метою налаштування моделі на параметри конкретних ділянок у ПК.

Однак коефіцієнт кореляції отриманої моделі складає 50 %, а це означає, що модель описує лише 25 % зв'язку між довжиною ділянки та часом її подолання. Це є цілком зрозумілим результатом, адже основною причиною коливань часу проїзду ділянки є індивідуальна манера водіння автомобілістів. Але актуальним є питання ефективності використання методу найменших квадратів для пошуку коефіцієнтів моделі, оскільки його можна використовувати лише за умови, якщо незалежні фактори моделі впливають на результуючий фактор. В іншому випадку в математичній статистиці модель не використовується, а в цій ситуації маємо низький ступінь зв'язку між моделлю та результатом. Тому у подальших дослідженнях варто приділити увагу пошуку альтернативних критеріїв розрахунку раціональних параметрів лінійної моделі спадального прискорення з огляду на мету дослідження – визначення раціональних зсувів фаз світлофорних циклів у ПК.

Висновки

Найбільш розповсюдженою та загальноприйнятою моделлю прискореного руху автомобілів під час старту з місця є лінійна модель спадального прискорення, для якої необхідно розробити метод визначення параметрів моделі з огляду на випадковий тип поведінки водія та його значний вплив на режим руху в місцевих дорожніх умовах.

Зробити налаштування моделі прискореного руху автомобілів доступним у процесі створення ПК можна завдяки відомим з кінематики функціональним зв'язкам між часом руху, прискоренням, швидкістю та пройденою відстанню. Вони дозволяють створити метод визначення параметрів моделі руху лише на основі довжини перегону та випадкового часу його подолання.

Заснований на пошуку мінімуму квадрата відхилень фактичних і розрахункових значень довжини перегону метод аналізу параметрів моделі прискореного руху автомобілів під час старту з місця на основі результатів спостережень у м. Харкові та м. Винниці призвів до отримання коефіцієнтів, подібних до коефіцієнтів наявних моделей. Середня швидкість рівномірного руху в цьому випадку визначена як 53,14 км/год. Але слабкий зв'язок між довжиною ділянки та часом її подолання вимагає альтернативних критеріїв пошуку раціональних параметрів лінійної моделі спадального прискорення в подальших дослідженнях з огляду на мету дослідження – визначення раціональних зсувів фаз циклу світлофорного регулювання в ПК.

Література (References)

1. Long G. 2000. Acceleration Characteristics of Starting Vehicles. Transportation Research Record 1737. TRB. National Research Council. Washington, D.C. Pp. 58–70. DOI: <https://doi.org/10.3141/1737-08>
2. Bham G. H., Benekohal R. F. 2001. Acceleration behavior of drivers in a platoon. PROCEEDINGS of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment. Training and Vehicle Design. Pp. 280–285. DOI: https://www.academia.edu/3167198/Acceleration_Behavior_of_Drivers_in_a_Platoon
3. Use of Intelligent Transportation System Data to Determine Driver Deceleration and Acceleration Behavior / Haas R., Inman V., Dixson A., Warren D. 2004. Transportation Research Record 1899. TRB. National Research Council. Washington, D. C. Pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.3141/1899-01>
4. Fadhloun K., Rakha Y., Abdelkefi A.. 2005. A Vehicle Dynamics Model for Estimating Typical Vehicle Accelerations. Transportation Research Record 2491. TRB. National Research Council. Washington, D. C. Pp. 61–71. DOI: <https://doi.org/10.3141/2491-07>
5. Hua W., Donnell E. T., 2010. Models of acceleration and deceleration rates on a complex two-lane rural highway: results from a nighttime driving experiment. Transportation Research Part F 13. Pp. 397–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2010.06.005>
6. The Research of Vehicle Acceleration at Signalized Intersections. Promet – Traffic & Transportation / Bogdanović V., Ruškić N., Papić Z., Simeunović M. 2013. Vol. 25. № 1. Pp. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i1.1245>.
7. Acceleration Characteristics at Metered On-Ramps / Yang G., Xu H., Tian Z., Zhao Y. 2015. Transportation Research Record 1899. TRB. National Research Council, Washington. D. C. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3141/2484-01>.
8. Bokare P. S., Maurya A. K., 2017. Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types. Transportation Research Procedia 25. Pp. 4733–4749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.486>
9. Determination of freeway acceleration lane length for smooth and safe truck merging / Qu Y., Zhao Q., Liu Sh., Qu W. J. 2018. Final Report of Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education. 2018. Project 13. 49 p. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/61500/dot_61500_DS1.pdf.

Горбачов Петро Федорович, д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, gorbachov.pf@gmail.com, тел. +38 050-303-26-22,

Абрамова Людмила Сергійівна, д.т.н., доцент, професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху, abramova_ls@ukr.net, тел. +38 099-787-53-23,

Литвиненко Іван Володимирович, аспірант, кафедри транспортних систем і логістики, ivl.khadi@gmail.com, тел. +38 097-773-36-71, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Modelling the parameters of accelerated movement of passenger cars in coordinated traffic

Abstract. Problem. In order to fine-tune the coordination plan to the specific traffic conditions on the road network segment selected for coordination, it is necessary to determine the time for vehicles to travel between synchronized traffic lights. Such models should be based on accelerated rather than uniform moving, and a parameter estimation method should be developed to form them. **Goal.** Development of a new method for estimating the parameters of a linear model of decreasing acceleration, which allows estimating them in specific driving conditions based on knowledge of two quantities: the length of the link and the random time of its overcoming in free driving conditions. **Methodology.** Using the functional relationships between travel time, acceleration, speed, and distance, known from kinematics, we have moved to a new sequence of actions to select the type and estimate the parameters of the model that relates the acceleration and speed of a car. For this purpose,

using the obtained analytical dependence between time and distance travelled, which contains unknown model parameters, it is possible to find the values of these coefficients by minimising the sum of squares of the difference between the calculated and actual lengths of the link. **Results.** Based on the search for the minimum square of deviations between the actual and calculated values of the link length, the method of estimating the parameters of the model of accelerated movement of cars at a start from a standstill, based on the results of observations in Kharkiv and Vinnitsa, led to coefficients similar to existing models. The average steady-state speed is estimated at 53.14 km/h. **Originality.** The presented methodology contains the new transition method from actual times of link passing to parameters of linearly decreasing acceleration model. **Practical value.** The developed method allows fine-tuning the offsets of the traffic light cycles in the coordination plan to the specific traffic conditions on the road network segment

selected for coordination based on actual times of link passing.

Key words: traffic control, coordination plan, offsets, vehicle acceleration, uniform motion, traffic flow, random variable, statistical modelling.

Horbachov Peter, DSc, Professor, Head of the Department of Transportation Systems and Logistics, tel.: +38 050-303-26-22gorbachov.pf@gmail.com,

Abramova Liudmyla, DSc, Associate Professor, professor of the Department of Traffic Management and Safety, abramova_ls@ukr.net, tel.: +38 099-787-53-23,

Lytvynenko Ivan, PhD student of the Department of Transportation Systems and Logistics, ivl.khadi@gmail.com, tel.: +38 097-773-36-71, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo St, 25, Kharkiv, 61002, Ukraine.
