

УДК 625.7/.8

Леонтьєв Ю.М., канд. техн. наук, Халай Т.О., канд. техн. наук

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ТРАНСПОРТУ В ЗОНІ РЕМОНТНИХ РОБІТ

**Анотація.** В статті наведена методика визначення вартості часових витрат транспорту при проходженні по одній смузі при змінних параметрах зони дорожньо-ремонтних робіт. Для отримання шуканих результатів використовувались методи планування експерименту при незалежних і змішаних кількісних змінних.

Методика дозволяє встановити кількісні залежності часу затримок автомобілів в зоні дорожньо-ремонтних робіт від довжини перекритої ділянки, а також визначати межі застосування методів регулювання руху автомобілів в зоні ремонту в залежності від її параметрів. Для методу примусового регулювання можливо встановлювати оптимальні цикли регулювання по критерію мінімуму транспортних витрат.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, теорія експерименту, факторний простір.

**Аннотация.** В статье приведена методика определения стоимости часовых потерь транспорта при прохождении по одной полосе проезжей части для интервала параметров зоны дорожно-ремонтных работ. Для получения искомых результатов использовались методы планирования эксперимента при независимых и смешанных количественных параметров.

Методика позволяет установить количественные зависимости времени задержек автомобилей в зоне дорожно-ремонтных работ от длины перекрываемого участка, а также определять границы применения методов регулирования движения автомобилей в зоне ремонта в зависимости от ее параметров. Для метода принудительного регулирования можно устанавливать

оптимальные циклы регулирования по критерию минимума транспортных расходов.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, теория эксперимента, факторное пространство

**Annotation.** The article describes a method of determining the value of time spent in transport passing through one lane in variables work zone. To get the desired results of experimental design techniques used for independent and mixed quantitative variables.

The technique allows to establish quantitative dependence of the delay of vehicles in the area of road repair work on the length of overlapping station and to determine the scope of application of methods of regulation of vehicles in the work zone depending on its parameters. For the method of enforcement of regulation may establish optimal cycle regulation on the criterion of minimum transportation costs.

**Keywords:** simulation, theory of experiment, factor space

### **Постановка проблеми**

Затримки автомобілів при проїзді в зоні дорожньо-ремонтних робіт призводять до суттєвих економічних втрат. В зв'язку з цим актуальним є дослідження втрат часу автомобілів в залежності від просторових параметрів зони ремонтних робіт і параметрів транспортного потоку. Обмежена можливість активного експерименту висуває задачу побудови математичних моделей, які б з певним ступенем адекватності описували процес затримки автомобілів в зоні ремонту дороги.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Оптимізації параметрів робочої зони ремонту за кордоном приділяється велика увага: досліджуються такі параметри [1,2]:

- мінімальна і максимальна довжина робочої зони;
- максимізація продуктивності дорожньо-ремонтних робіт;
- максимально терпимі затримки транспорту;
- оптимальний сезон виконання робіт;
- кількісна оцінка затримок в результаті зниження пропускнуої здатності в робочій зоні;

- вплив затримок на альтернативні проекти ремонту тощо.

З метою дослідження цих параметрів використовуються імітаційні моделі та автоматизовані інформаційні системи робочої зони [3]. Проте, ще у 1980-х роках в Україні була розроблена імітаційна модель, яка дозволяє дослідити наведені параметри робочої зони [4].

### **Постановка завдання**

Викласти основні результати досліджень затримок транспорту в зоні дорожньо-ремонтних робіт на двосмугових дорогах.

### **Викладення основного матеріалу**

З метою дослідження затримок транспорту в зоні дорожньо-ремонтних робіт без припинення руху була побудована імітаційна модель, яка працює в двох режимах: з примусовим регулюванням руху і без регулювання.

Для режиму без регулювання час затримки автомобілів досліджувався при наступних умовах: інтенсивність руху 10-200 авт./год. в кожному напрямку, довжина перекритої ділянки 50-500 м, допустима швидкість в зоні ремонту 20-40 км/год. У вказаному інтервалі інтенсивності руху час між прибуттям автомобілів у розглядувану систему розподіляється по експоненціальному закону [5]. Для отримання значимих оцінок середнього часу затримки результати визначались з урахуванням автокореляції даних (в зв'язку з використанням випадкових величин генератора псевдовипадкових чисел) за допомогою автокореляційної функції [6]. Була також підтверджена гіпотеза про нормальний розподіл шуканої величини при однакових умовах моделювання.

Для отримання шуканої залежності використовувались методи планування експерименту при незалежних і змішаних кількісних змінних. В якості незалежних змінних (факторів) прийняті:  $N_1$  і  $N_2$  – часові інтенсивності руху в прямому і протилежному напрямках,  $L$  – довжина перекритої ділянки,  $V$  – регламентована швидкість руху автомобіля в зоні ремонту. В якості змішаних змінних прийняті  $\varphi_{\text{л}}, \varphi_{\text{в}}, \varphi_{\text{а}}$  – відповідно частки легкових, вантажних автомобілів і автобусів в загальному потоці транспортних засобів –  $\varphi_{\text{л}} + \varphi_{\text{в}} + \varphi_{\text{а}} = 1$ . Відгуком є середня величина часу затримки одного автомобіля.

Як правило, при вивченні складних систем методом математичного планування експерименту застосовують поліноміальні моделі. Однак, при наявності одночасно і змішаних і незалежних змінних використання в якості

моделей звичайних поліномів внаслідок нормованості суми змішаних змінних неможливо. В подібних випадках застосовуються моделі і відповідні їм плани, отримані по методу прямих добутоків множини симплекс-решітчастих  $D_c$  і ортогональних факторних  $D_h$  планів [7]. План  $D_{ch}$  можна інтерпретувати як реалізацію планів  $D_h$  в кожній точці  $D_c$ . Оцінки коефіцієнтів моделі отримуються за відомими формулами для відповідного змішаного полінома [8], тільки замість відгуків в формули підставляються функції відгуків, отриманих по даним факторних планів  $D_h$ , реалізованих у відповідних точках  $D_c$ .

В якості ортогональних факторних планів  $D_h$  був використаний план повного факторного експерименту ПФЕ<sup>24</sup>. В кожній із вершин симплекса проводився експеримент по цьому плану з однорідним за складом транспортним потоком.

При реалізації факторних планів  $D_h$  з інтервалами варіювання, що охоплюють весь досліджуваний простір факторів, з'ясувалось, що в деяких точках плану отримуються різко визначені відгуки. Дільниця поверхні відгуку, на якому спостерігаються різкі відхилення досліджуваних даних (назвемо її «особливою» ділянкою), як правило, відповідає якісним змінам досліджуваного процесу і тому представляють суттєвий інтерес. Аналіз умов експерименту на «особливій» ділянці поверхні відгуку виявив наступну картину. При певних сполуках значень незалежних змінних (наприклад:  $N_1 = 200$  авт./год.,  $N_2 = 200$  авт./год.,  $L = 500$  м,  $V = 20$  км/год.) коефіцієнт пропускної здатності системи буде більше одиниці, тобто черга автомобілів перед зоною ремонту необмежено зростає з часом. Було прийнято рішення про розподіл досліджуваного факторного простору на чотири підпростори за незалежними змінними  $N_1$  та  $N_2$  і перевірці сумісності призначених рівнів варіювання решти незалежних змінних.

Після реалізації числового комп'ютерного експерименту отримані дані оброблялись методами регресійного аналізу для розрахунку значень коефіцієнтів при незалежних змінних в регресійній моделі. У всіх процедурах перевірок за критеріями задавався 5%-ий рівень значущості. Перевірка гіпотези про однорідність дисперсії відгуків за критерієм Кохрена показала, що дисперсії неоднорідні і підпорядковуються залежності:

$$\sqrt{\sigma \frac{z}{y}} = v \bar{y} \quad (1)$$

де  $\sigma \frac{z}{y}$  - дисперсія в експериментальній точці;

$V$  - коефіцієнт варіації;

$\bar{y}$  - середнє арифметичне значення відгуку в експериментальній точці.

Для забезпечення однорідності дисперсії застосовувалось перетворення відгуку у відповідності з процедурою, викладеною в [8], за формулою:

$$Y_n = \ln Y \quad (2)$$

де  $Y_n$  - перетворене значення відгуку;

$Y$  - відгук (результат досліду).

У відповідності з критерієм Стьюдента з регресійних моделей виключались статистично не значимі коефіцієнти регресії. Перевірка адекватності моделей, побудованих за планами ПФЕ2<sup>4</sup>, після виключення не значимих коефіцієнтів виконувалась за критерієм Фішера. З метою перевірки адекватності симплекс-решітчастих моделей з використанням критерію Стьюдента, додатково проводився експеримент в центрах симплексів для кожного з підпросторів за планом ПФЕ2<sup>4</sup> для складу руху: 1/3 легкових автомобілів, 1/3 вантажних автомобілів та 1/3 автобусів.

Отримані рівняння регресії мають вигляд:

$$Z = \varphi_z \cdot \exp \cdot \alpha_z + \varphi_r \cdot \exp \cdot \alpha_r + \varphi_A \cdot \exp \cdot \alpha_A \quad (3)$$

де  $Z$  - середній час затримки автомобіля, с;

$$\begin{aligned} \alpha_i = & B_0 + B_1 N_1 + B_2 N_2 + B_3 L + B_4 V + B_{12} N_1 N_2 + \\ & B_{13} N_1 L + B_{14} N_1 V + B_{23} N_2 L + B_{24} N_2 V + \\ & + B_{34} L V + B_{123} N_1 N_2 L + B_{124} N_1 N_2 V + B_{134} N_1 L V + B_{234} N_2 L V + B_{1234} N_1 N_2 L V \end{aligned} \quad (4)$$

де  $B_j$  - коефіцієнт рівняння регресії.

Вартість часових втрат  $C$ , викликаних затримками автомобілів, може бути визначена за формулою:

$$C = 3600^{-1} N (C_L \varphi_z \exp \cdot \alpha_z + C_r \varphi_r \exp \cdot \alpha_r + C_A \varphi_A \exp \cdot \alpha_A) \quad (5)$$

де  $N = N_1 + N_2$  - сумарна інтенсивність руху з двох сторін;

$C_L, C_T, C_A$  - середні витрати на одну годину затримки легкового, вантажного автомобіля та автобуса, грн. / год.

В результаті проведених досліджень отримані наступні коефіцієнти при незалежних змінних (табл.1 ).

**Таблиця 1** - Коефіцієнти при незалежних змінних для легкових автомобілів в режимі руху без регулювання

Інтервал інтенсивності, авт./год.	$N_1 N_2 V$	$N_1 L V$	$N_2 L V$	$N_1 N_2 L V$
10 - 100	$-5 \cdot 10^{-9}$	$64 \cdot 10^{-9}$	$84 \cdot 10^{-9}$	$-6 \cdot 10^{-9}$
10 - 140	$2 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-7}$	$-9 \cdot 10^{-9}$	$-4 \cdot 10^{-9}$
10 - 170	$1 \cdot 10^{-7}$	$-14 \cdot 10^{-8}$	$-8 \cdot 10^{-9}$	$-2 \cdot 10^{-9}$
10 - 200	$3 \cdot 10^{-7}$	$-8 \cdot 10^{-8}$	$-8 \cdot 10^{-8}$	$-17 \cdot 10^{-10}$

Отримані залежності дозволяють визначити транспортні втрати для всього діапазону інтенсивності руху в режимі без регулювання.

Так як в результаті досліджень було з'ясовано, що при інтенсивності руху до 100 авт./год. в одному напрямку, довжині перекритої ділянки до 500 м і швидкості руху в зоні ремонту від 20 до 40 км/год. пропуск руху можливий (при будь-яких сполученнях цих факторів) в режимі без регулювання, то в режимі з регулюванням досліджувалась інтенсивність руху від 100 до 350 авт./год. Верхня межа інтенсивності була обрана виходячи з того, що на двосмугових дорогах інтенсивності, що перевищують 350 авт./год. зустрічаються рідко. Значення решти параметрів відбирались в діапазонах аналогічних режиму без регулювання. Додавався тільки ще один параметр –  $T$  – цикл регулювання, котрий складається з часу зеленого, жовтого і червоного сигналів.

У вказаному інтервалі інтенсивності руху час між прибуттям автомобілів розподіляється за законом Пірсона III типу [5]:

$$P_{(x)} = \frac{\lambda}{\tilde{A}(k)} \cdot e^{-\lambda x} \cdot x^{k-1}. \quad (7)$$

Планування експерименту для режиму з регулюванням проводилось аналогічно режиму без регулювання, тільки в зв'язку з додатковим фактором – Т – проводився не ПФЕ2<sup>4</sup>, а ПФЕ2<sup>5</sup>.

Факторний простір  $N_1$  та  $N_2$  було розбито на два підпростори  $N = 100-200$  авт./год. та  $N = 100-350$  авт./год. Попередньо для кожного з двох підпросторів розраховується мінімально можливий цикл регулювання.

Вартість втрат часу для режиму з регулюванням розраховується аналогічно режиму без регулювання.

### Висновки

Важливу роль у створенні раціональної організації ремонтних робіт грає удосконалення методів обґрунтування параметрів робочої зони. Приймаючи до уваги складний, динамічний, стохастичний характер проїзду автомобілів в робочій зоні ремонту дороги, аналітичний опис цього процесу не представляється можливим. Розроблена імітаційна модель дорожнього руху в зоні ремонтних робіт дозволяє визначити втрати від затримки автомобілів при будь-яких значеннях просторових параметрів зони ремонту.

### Література

1. Khanta, Pothu Raju. Evaluation of Traffic Simulation Models for Work Zones in the New England Area (2008). [Електронний ресурс] / Pothu Raju Khanta // Masters Theses 1896 - February 2014. Paper 184. – Режим доступу: <http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1262&context=theses1>.
2. Astarita Vittorio Traffic delays estimation in two-lane highway reconstruction [Електронний ресурс] / Vittorio Astarita, Vincenzo Pasquale Giofrè, Giuseppe Guido a and Demetrio Carmine Festa // The 5th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2014). – P. 331-338. – Режим доступу: [http://ac.els-cdn.com/S1877050914006322/1-s2.0-S1877050914006322-main.pdf?\\_tid=71abde18-a687-11e4-b886-0000aacb35d&acdnat=1422406318\\_3be59227ca2e8ca0a0d599f2d5e90f5e](http://ac.els-cdn.com/S1877050914006322/1-s2.0-S1877050914006322-main.pdf?_tid=71abde18-a687-11e4-b886-0000aacb35d&acdnat=1422406318_3be59227ca2e8ca0a0d599f2d5e90f5e)
3. Chu Lianyu Evaluation of Traffic Delay Reduction from Automatic Workzone Information Systems Using Micro-simulation [Електронний ресурс] / Lianyu Chu, Henry X. Liu, Will Recker – Режим доступу: [http://www.its.uci.edu/its/publications/papers/JOURNALS/TRB\\_05-2751.pdf](http://www.its.uci.edu/its/publications/papers/JOURNALS/TRB_05-2751.pdf).
4. Леонтьев Ю.М. Оптимізація параметрів організації дорожньо-ремонтних робіт: дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата техн.наук: 05.23.14 / Леонтьев Ю.М. – К., 1987. – 160 с
5. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
6. Шенон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 410 с.
7. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. – 330 с.
8. Рузинов Л.Н., Слободчикова Р.И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. М.: Химия, 1980. – 280 с.