

**АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТЕЙ ПЕРЕХОДУ  
КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ «ЛЮДИНА – АВТОМОБІЛЬ –  
СЕРЕДОВИЩЕ РУХУ» З ФАКТИЧНОГО СТАНУ В ЗАДАНИЙ**

**ALGORITHM FOR CALCULATING THE PROBABILITIES OF THE  
TRANSITION OF THE COMPONENTS OF THE SYSTEM «MEN –  
CAR – ROAD ENVIRONMENT» FROM THE ACTUAL STATE TO THE  
SPECIFIED ONE**

**Ярещенко Н. В., к.т.н., доц. (Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет)**

**Yareshchenko N. V., Ph.D., Associate Professor, (Kharkiv National  
Automobile and Road University)**

*Пропонується алгоритм по довгостроковому прогнозуванню розрахункових характеристик транспортного потоку на автомобільних дорогах для розробки техніко - економічних розрахунків при проектуванні автомобільних доріг та транспортних коридорів України.*

*The article proposes an algorithm for long-term forecasting of the calculated characteristics of the traffic flow for the development of technical and economic calculations in the design of highways and transport corridors in Ukraine.*

*At the current stage, given the existing man-made loads on the road and the environment, the future development of the transport system is important. For this, it is necessary to introduce measures to renew the road infrastructure, introduce new technologies, use production waste, and reduce emissions of harmful substances into the environment. In the practice of substantiating the calculated characteristics of highways, the method of evolutionary-probabilistic modeling is used, which allows for taking into account the qualitative changes of the transport system in the period forecasted in tBased ons of empirical data, a dynamic series of changes in the calculated characteristics of the traffic flow is constructed.*

*The empirical series of the development of the calculated characteristics of the traffic flow is equalized by the method of moving average or by the method of least squares.*

*The analysis of the smoothed dynamic series is performed. At the same time, the following are established:*

- moments of the beginning and end of periods of the closed state of the system;*
- moments of the beginning and end of the periods of the open state of the system;*
- the term of closed and open state periods;*
- coefficients of growth of the calculated characteristics of the traffic flow in the periods of the closed and open state.*

*The data is compared with the tabular data and the stages to which the empirical dynamic series belongs are established.*

*The moment of the end of the period in which the last point of the dynamic series is located is set.*

*Using the data, the terms of the following periods, the moments of their beginning and end, as well as the initial and final calculation characteristics for each period are predicted.*

*Ключові слова: автомобільна дорога, розрахункові характеристики, математична модель, автомобіль, система.*

*Keywords: highway, calculated characteristics, mathematical model, automobile, system.*

На сучасному етапі, за існуючих техногенних навантажень на автомобільну дорогу та навколишнє середовище, є важливим в майбутньому розвиток транспортної системи. Для цього необхідно запроваджувати заходи щодо поновлення дорожньої інфраструктури, впровадження нових технологій, використання відходів виробництва, зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. [1]

В практиці обґрунтування розрахункових характеристик автомобільних доріг застосовується метод еволюційно-ймовірнісного моделювання, що дозволяє урахувувати якісні зміни транспортної системи в періоді, що прогнозується у часі. Пропонується алгоритм по довгостроковому прогнозуванню розрахункових характеристик транспортного потоку для розробки техніко - економічних розрахунків при проектуванні автомобільних доріг та транспортних коридорів України.

Алгоритм розрахунку ймовірностей переходу компонентів системи "Людина - автомобіль - середовище руху" з фактичного стану в заданий.

1. На основі емпіричних даних будується динамічний ряд зміни розрахункових характеристик транспортного потоку.
2. Емпіричний ряд розвитку розрахункових характеристик транспортного потоку вирівнюється за методом найменших квадратів.[2]
3. Виконується аналіз вирівняного динамічного ряду.[3]

При цьому встановлюються:

- моменти початку та закінчення періодів замкнутого стану системи ЛАСР;
  - моменти початку та закінчення періодів розімкнутого стану системи ЛАСР;
  - термін періодів замкнутого та розімкнутого стану (лаги станів);
  - коефіцієнти приросту розрахункових характеристик транспортного потоку в періоди замкнутого та розімкнутого стану.
4. Дані порівнюють з табличними та встановлюються етапи, до яких відноситься емпіричний динамічний ряд.
  5. Встановлюється момент закінчення періоду, в якому знаходиться остання крапка динамічного ряду.

6. Використовуючи дані прогноуються терміни наступних періодів, моменти їх початку та закінчення, а також початкові та кінцеві розрахункові характеристики для кожного періоду.

7. Розраховуються ймовірності переходу від початкової до кінцевої розрахункової характеристики транспортного потоку для кожного періоду, що прогнозується, замкненого стану системи ЛАСР по формулі

$$P_{\alpha} = M_0 C_0 e^{\lambda_1 t} + C_1 e^{\lambda_1 t} [M_1 \cos \beta t - M_2 \sin \beta t] + C_2 e^{\lambda_1 t} [M_2 \cos \beta t + M_1 \sin \beta t] - M_0 C_0 e^{\lambda_1 t_3} - C_1 e^{\lambda_1 t_3} [M_1 \cos \beta t_3 - M_2 \sin \beta t_3] - C_2 e^{\lambda_1 t_3} [M_2 \cos \beta t_3 + M_1 \sin \beta t_3] + 1, \quad (1)$$

де  $t_3$  - тренд стану,

$P_{\alpha}$  – ймовірність.

У процесі розрахунку ймовірностей використовуються параметри моделі розвитку системи ЛАСР.

8. Розраховуються значення розрахункових характеристик транспортного потоку для кожного періоду, що прогнозується, замкненого стану системи ЛАСР по формулі

$$V_{\kappa}(t) = V_{\kappa 0}(1 - P_{\alpha}) + V_{\kappa 3} P_{\alpha}, \quad (2)$$

де  $V_{\kappa 0}$  - початкова швидкість періоду замкненого стану;

$V_{\kappa 3}$  - кінцева швидкість періоду замкненого стану.

9. Розраховуються значення швидкостей руху для кожного періоду розімкненого стану, що прогнозується, системи ЛАСР по формулі:

$$V_{\kappa}(t) = V_{\kappa \Pi} + (V_{\kappa \text{К}} - V_{\kappa \Pi})t/T_p, \quad (3)$$

де  $V_{\kappa \Pi}$  - початкова швидкість періоду розімкненого стану;

$V_{\kappa \text{К}}$  - кінцева швидкість періоду розімкненого стану;

$T_p$  - термін періоду розімкненого стану (тренд стану);

$t$  - час (рік в даному періоді).

10. Ймовірність  $P_d$  розраховується по формулі [4]

$$P_d = N_0 C_0 e^{\lambda_1 t} + C_1 e^{\lambda_1 t} [-N_1 \cos \beta t - N_2 \sin \beta t] + C_2 e^{\lambda_1 t} [-N_2 \cos \beta t + N_1 \sin \beta t] - N_0 C_0 e^{\lambda_1 t_3} - C_1 e^{\lambda_1 t_3} [N_1 \cos \beta t_3 + N_2 \sin \beta t_3] - C_2 e^{\lambda_1 t_3} [-N_2 \cos \beta t_3 + N_1 \sin \beta t_3] + 1, \quad (4)$$

де  $t_3$  - тренд стану;

$P$  – ймовірність дії фактору;

$N_0$  - середньодобова інтенсивність руху за рік, яка визначається по даних ділянки руху;

11. Прогноз фактичних швидкостей руху розрахункового автомобіля може бути виконаний за формулою

$$V = V_{\text{пл}}(1-P_{\text{л}}) + V_{\text{пс}}P_{\text{л}}, \quad (5)$$

де  $P_{\text{л}}$  – ймовірність знаходження кожного з об'єктів поля сприйняття водія в небезпечному для руху стані [5].

Алгоритм розрахунку ймовірностей переходу компонентів системи "Людина - Автомобіль - Середа руху" з фактичного стану до заданого.

Алгоритм розрахунку ймовірностей  $P(t)$  включає наступні операції:

1. Вводяться вхідні дані, які включають:

- коефіцієнти ваги компонентів системи

$$K_a^{(1)} = 0,6666; K_d^{(1)} = 0,16666; K_c^{(1)} = 0,16666;$$

$$K_d^{(2)} = 0,16666; K_d^{(2)} = 0,6666; K_c^{(2)} = 0,16666;$$

$$K_d^{(3)} = 0,6666; K_a^{(3)} = 0,16666; K_c^{(3)} = 0,16666;$$

- лаги замкненого стану  $t_3$ ;

- початкові значення ймовірності  $P_{\text{л}0}, P_{\text{а}0}, P_{\text{д}0}$ .

2. Розраховуються коефіцієнти моделі розвитку системи за формулами:

$$m_0 = 1 + K_a^{(1)} K_d^{(2)} + K_d^{(1)} K_d^{(3)};$$

$$m_1 = 2K_a^{(1)} - K_d^{(1)} K_a^{(3)};$$

$$m_2 = 2K_d^{(1)} - K_d^{(2)} K_a^{(1)};$$

$$n_0 = m_0 + m_1 K_d^{(1)} + m_2 K_d^{(3)};$$

$$n_1 = m_0 K_a^{(1)} + m_1 - m_2 K_a^{(3)};$$

$$n_2 = m_0 K_d^{(1)} - m_1 K_d^{(2)} + m_2.$$

3. Розраховуються коефіцієнти неповного кубічного рівняння за формулами

$$p = -1/3[(n_1 K_d^{(1)} - n_2 K_a^{(1)}) / (K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)]^2 - (n_1 m_2 - n_2 m_1) / (K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1);$$

$$q = 2[-(n_1 K_d^{(1)} - n_2 K_a^{(1)})/3(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)]^3 - (n_1 K_d^{(1)} - n_2 K_a^{(1)}) (n_1 m_2 - n_2 m_1) / 3(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1) - [(n_1(m_2 - K_d^{(1)} m_0) + n_2(K_a^{(1)} m_0 - m_1)) / (K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1) - n_0].$$

4. Розраховується дискримінант неповного кубічного рівняння за формулою

$$D = (p/3)^3 + (q/2)^2.$$

5. Розраховується дійсний корінь кубічного рівняння за формулою

$$\lambda_1 = (A+B) + (n_1 K_d^{(1)} - n_2 K_a^{(1)})/3(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1),$$

$$\text{де } A = [-q/2 + (D)^{1/2}]^{1/3};$$

$$B = [-q/2 - (D)^{1/2}]^{1/3}.$$

6. Розраховується дійсна частина комплексно-пов'язаних коренів за формулою

$$\alpha = -(A + B)/2 + (n_1 K_d^{(1)} - n_2 K_a^{(1)})/3(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1).$$

7. Розраховується кругова частота коливань за формулою

$$\beta = (A - B)/2 * (3)^{1/2}.$$

8. Розраховуються коефіцієнти моделі розвитку за формулами

$$M_0 = [1/(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)][K_d^{(1)} \lambda_1^2 + m_2 \lambda_1 + (m_2 - K_d^{(1)} m_0)];$$

$$M_1 = [1/(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)][K_d^{(1)} (\alpha^2 - \beta^2) + m_2 \alpha + (m_2 - K_d^{(1)} m_0)];$$

$$M_2 = [1/(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)][2K_d^{(1)} \alpha \beta + m_2 \beta];$$

$$N_0 = [1/(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)][(K_a^{(1)} m_0 - m_1) - m_1 \lambda_1 - K_a^{(1)} \lambda_1^2];$$

$$N_1 = [1/(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)][(K_a^{(1)} m_0 - m_1) - m_1 \alpha - K_a^{(1)} (\alpha^2 - \beta^2)];$$

$$N_2 = [1/(K_a^{(1)} m_2 - K_d^{(1)} m_1)][2K_a^{(1)} \alpha \beta + m_1 \beta].$$

9. Розраховуються визначники моделі за формулою:

$$\Delta_0 = - (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [M_1 (1 - e^{\alpha t_3} \cos \beta t_3) + M_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] [N_2 (1 - e^{\alpha t_3} \cos \beta t_3) + N_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] - (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [N_1 (1 - e^{\alpha t_3} \cos \beta t_3) - N_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] [M_2 (1 - e^{\alpha t_3} \cos \beta t_3) - M_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] + (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [M_2 (1 - e^{\alpha t_3} \cos \beta t_3) - M_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3})$$

$$\begin{aligned}
 & + (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) [N_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + N_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] M_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) \\
 & - e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3 M_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [N_0 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - N_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & - e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3 N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [M_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + M_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3]; \\
 \Delta_1 = & (1 - P_{r0}) [M_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + M_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] [N_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + N_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & + (1 - P_{r0}) [N_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - N_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] [M_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - M_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & - (1 - P_{d0}) [M_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - M_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) \\
 & - (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) (1 - P_{a0}) [N_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + N_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & + e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3 (1 - P_{a0}) [N_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - N_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & - e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3 (1 - P_{d0}) [M_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + M_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3]; \\
 \Delta_2 = & (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) (1 - P_{a0}) [N_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + N_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & + (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) (1 - P_{d0}) [M_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - M_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & - (1 - P_{r0}) [M_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - M_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) \\
 & - (1 - P_{r0}) [N_2 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + N_1 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] M_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) \\
 & + e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3 M_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) (1 - P_{d0}) - e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3 N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) (1 - P_{a0}); \\
 \Delta_3 = & - (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [M_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + M_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] (1 - P_{a0}) \\
 & - (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [N_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - N_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] (1 - P_{a0}) \\
 & - (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) (1 - P_{a0}) N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) + (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) (1 - P_{a0}) M_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) \\
 & - (1 - P_{r0}) M_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [N_1 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) - N_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3] \\
 & + (1 - P_{r0}) N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t_3}) [M_0 (1 - e^{-\alpha t_3} \cos \beta t_3) + M_2 e^{\alpha t_3} \sin \beta t_3].
 \end{aligned}$$

10. Розраховуються довільні постійні моделі

$$C_0 = \Delta_1 / \Delta_0,$$

$$C_1 = \Delta_2 / \Delta_0,$$

$$C_2 = \Delta_3 / \Delta_0.$$

11. Розраховуються ймовірності переходу компонентів системи з фактичного стану в заданий за формулою

$$\begin{aligned}
 P_r = & P_{r0} + C_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_1 t_3}) + e^{\alpha t} [C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t] \\
 & - e^{\alpha t_3} [C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t] + (1 - P_{r0});
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_a = & P_{a0} + M_0 C_0 e^{-\lambda_1 t} + C_1 e^{\alpha t} [M_1 \cos \beta t - M_2 \sin \beta t] \\
 & + C_2 e^{\alpha t} [M_2 \cos \beta t + M_1 \sin \beta t] - M_0 C_0 e^{-\lambda_1 t_3} \\
 & - C_1 e^{\alpha t_3} [M_1 \cos \beta t_3 - M_2 \sin \beta t_3] - C_2 e^{\alpha t_3} [M_2 \cos \beta t_3 + M_1 \sin \beta t_3] + (1 - P_{a0});
 \end{aligned}$$

$$P_d = P_{d0} + N_0 C_0 e^{\lambda_1 t} + C_1 e^{\alpha t} [N_1 \cos \beta t + N_2 \sin \beta t] + C_2 e^{\alpha t} [-N_2 \cos \beta t + N_1 \sin \beta t] - N_0 C_0 e^{\lambda_1 t_3} - C_1 e^{\alpha t_3} [N_1 \cos \beta t_3 + N_2 \sin \beta t_3] - C_2 e^{\alpha t_3} [-N_2 \cos \beta t_3 + N_1 \sin \beta t_3] + (1 - P_{d0}).$$

Цей алгоритм може застосовуватися для всіх розрахункових характеристик транспортного потоку компонентів системи "Людина - автомобіль - середовище руху", таких як навантаження, інтенсивність та швидкість руху. За результатами досліджень доведено, що алгоритм по довгостроковому прогнозуванню розрахункових характеристик транспортного потоку може застосовуватися для розробки техніко - економічних розрахунків при проектуванні автомобільних доріг та транспортних коридорів України.

### References

1. Sobko V.M., Sidun U.V., Karasiova K.O., Proektuvania avtomobilnych dorog. Lvivska politechnica, 2019, - 228 s.
2. Filchakov P.F. Dovidnik z vischoy matematiki. Dumka. 1972. -3743 s.
3. Klepenko V.U., Golez V.L., Vischa matematika v prikladaj I zadachaj. Navchalniy posibnik. Vidavniztvo Zentr uchbovoy literature. 2021. 594 s.
4. Bidyuk P.I., Gogiy O.P. Imovirnio – statistichni metodi modeluvaniy I prognozuvaniy. CHDU. Mikolaiv. 2014. - 440 s.
5. Gavrilov E. V., Gridin A.M., Rypujin V.M. Sistemne proektuvania avtomobilnij dorog. Vid. ASB. 1998. -138 s.

### Література

1. Собко Ю.М., Сідун Ю.В., Карасьова Л.О. Проектування автомобільних доріг. – Львівська політехніка, 2019. - 228 с.
2. Фільчаков П.Ф. Довідник з вищої математики. Думка. 1972. - 3743 с.
3. Клепенко В.Ю., Голєць В.Л., Вища математика в прикладах і задачах. Навчальний посібник. Видавництво Центр учбової літератури. 2021. - 594 с.
4. Бідюк П.І., Гожий О.П. Ймовірно – статистичні методи моделювання і прогнозування. ЧДУ. Миколаїв. 2014 р., - 440 с.
5. Гаврилов Е.В., Грідін А.М., Ряпухін В.М. Системне проектування автомобільних доріг. Вид. АСБ, 1998 р., - 138 с.