

Лямзін А.О.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Ніколаєнко І.В.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЮ МЕРЕЖУ ПРОМИСЛОВОГО МІСТА

У статті досліджуються підходи до вирішення завдання короткострокового прогнозування транспортних потоків у міському середовищі. Як вихідні дані використовуються граф вулично-дорожньої мережі та дані про якісний і кількісний стан транспортних кластерів. Введено поняття «оклюзивність транспортного кластера» як основної характеристики транспортного потоку в середовищі вулично-дорожньої мережі. Короткострокова оцінка параметрів транспортного потоку виконується з урахуванням методу найменших квадратів.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа, промислове місто, транспортний потік, оклюзивність транспортного кластера, короткострокове прогнозування, метод найменших квадратів.

Постановка проблеми. Ефективне управління транспортними потоками в міському середовищі здійснюється через застосування комплексу інтегрованих рішень на основі високих технологій, інтелектуальних методів моделювання руху транспортних засобів, програмного забезпечення, оброблення інформації про транспортні процеси в реальному режимі часу [1]. Якість роботи транспортної системи промислового міста забезпечується своєчасною реакцією системи на зміну характеристик дорожнього руху. Отже, реалізація стратегії управління поточним станом транспортного потоку в середовищі вулично-дорожньої мережі (далі – ВДМ) завдяки використанню методів короткострокового прогнозу є актуальною задачею для міст із великим обсягом промислових вантажопотоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі короткострокового прогнозування транспортних потоків приділено багато уваги в науково-практичних роботах. Детальні огляди і докладні класифікації можна знайти в оглядових публікаціях [2, с. 15; 3, с. 7; 4, с. 144]. На підставі результатів аналізу наукових робіт можна виділити низку базових підходів до вирішення завдання: регресійні моделі [5, с. 115; 6, с. 101]; моделі часових рядів [7; 8; 9; 10]; моделі нейронних мереж [11; 12; 13; 14, с. 67]; метод опорних векторів [15, с. 1023; 16, с. 16].

Незважаючи на великий обсяг наукових праць в області, що досліджується, сучасні методи вирішення є недостатньо повними і мають спектр недоліків, що не дозволяє використовувати їх безпосередньо в середовищі промислових зон сучасних міст. Дамо коротку характеристику методів.

По-перше, низка наукових робіт розкриває питання прогнозування параметрів транспортних потоків на лінійних і вузлових елементах вулично-дорожньої мережі за статистичними даними на обмеженому географічному просторі [17, с. 152; 18, с. 63]. Такий підхід недостатньо враховує інформацію про стан ВДМ загалом, що робить рішення малоефективним. Метод, заснований на сегментарній оцінці ефективності вулично-дорожньої мережі, ускладнює вирішення досліджуваної проблеми для транспортної системи промислових міст через складність обчислювальних і технологічних операцій, спрямованих на отримання підсумкового рішення.

По-друге, метод застосування датчиків руху (traffic detectors) як механізмів, що синтезують блок вхідної інформації. Основний принцип роботи датчиків заснований на отриманні візуальної інформації про особливості транспортних потоків на конкретному сегменті вулично-дорожньої мережі. Такий підхід до вирішення пов'язаний із необхідністю значних фінансових

витрат для збору і формування базису необхідної інформації.

Значним недоліком, на нашу думку, у наявних моделях і алгоритмах є просторово-часова надмірність даних в інформаційній базі. Пряме підтвердження припущення про просторово-часову надмірність відображено в роботі [19, с. 183], де зауважено, що обсяг базової інформації про просторовий розподіл транспортних потоків становить не більше 10% від обсягу загальних даних у ВДМ. Непрямим підтвердженням цього ж факту є використання обчислювальних механізмів розподілу транспортних потоків у статичних і динамічних мережах на підставі матриці кореспонденції істотно меншого розміру, ніж кількість лінійних і вузлових сегментів вулично-дорожньої мережі [20, с. 290; 21, с. 20].

Постановка завдання. Метою статті є розроблення методу короткострокового прогнозування параметрів транспортних потоків у межах вулично-дорожньої мережі з урахуванням особливостей промислового міста.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час натурних досліджень транспортних потоків у середовищі вулично-дорожньої мережі промислових міст, окрім визначення обсягу руху на лінійних і вузлових елементах, враховані структурні особливості досліджуваного транспортного потоку, що характеризується шістьма категоріями транспортних засобів (табл. 1).

Таблиця 1

Структурне формування транспортного потоку міста

Типи транспортних засобів, що формують кластер	Відсоткове співвідношення	
	ранкова година пік (08.30÷09.30)	вечірня година пік (18.00÷19.00)
Легкові автомобілі	75,6	75,7
Вантажні автомобілі	14,3	16,5
Великовантажні автомобілі	4,2	6,1
Пасажирський транспорт	2,3	0,8
Муніципальний транспорт	3,5	0,8
Рекреаційний транспорт	0,1	0,1

Структура транспортних потоків вранці та ввечері має досить незначні відмінності, але варто зазначити, що ввечері частка вантажного і великовантажного транспорту на досліджуваних ділянках ВДМ збільшується.

Транспортний кластер – це базова структура транспортного потоку в межах ВДМ. Транспортні потоки промислових міст складаються з великої кількості транспортних кластерів із різними, досить часто суперечливими інтересами. У контексті міської логістики термін «транспортний кластер» треба розуміти як групу транспортних засобів, які мають близькі функціональні та цільові характеристики, і рухаються в заданому напрямку протягом деякого часу.

Вивчення якісних і кількісних показників транспортних кластерів у середовищі вулично-дорожньої мережі промислових міст дозволило висунути гіпотезу про окклюзивність їхньої природи як у часовій, так і в географічній площинах (рис. 1).

Є безліч визначень окклюзивності (occlusivity) для медицини, хімії, метрології, комп'ютерної графіки тощо. З погляду міської логістики, цікавими є праці, присвячені поняттю окклюзивності як одному з показників міської морфології [22, с. 67].

Відсутність робіт у цьому напрямі на транспорті стримує широке використання методів короткострокового прогнозування і, як наслідок, якісної оцінки транспортних потоків міст із різноманітними промисловими об'єктами, які, у свою чергу, впливають на функціонування вулично-дорожньої мережі.

Саме тому сформульовано поняття «окклюзивність транспортного кластера». Окклюзивність транспортного кластера визначається ступенем збігу завдань і цілей, що поставлені перед водіями транспортних засобів як у часовому, так і в географічному просторі.

Окклюзивність можна охарактеризувати показником щільності, а точка окклюзивності – це максимальний рівень концентрації одиниць рухомого складу в досліджуваному транспортному кластері (рис. 1).

Математична модель вулично-дорожньої мережі промислового міста може бути представлена графом Ейлера (рис. 2), дуги $w \in W$ якого відповідають лінійним елементам – дорогам, а вершини являють собою вузли-перехрестя доріг, що розподіляють транспортний потік.

Напрямок дуги визначає напрямок руху транспортного засобу на відповідній ділянці мережі, а параметр транспортного кластера на конкретній ділянці мережі визначається як функція $v: W \times T \rightarrow R$, яка в конкретний момент часу $t \in T$ для конкретної дуги $w \in W$ визначає його значення $v(w, t)$.

За параметри транспортного процесу в середовищі вулично-дорожньої мережі промислових міст приймаються: щільність транспортного потоку; транзитний потенціал міської транспортної мережі; ступінь екологічної безпеки транспортних потоків.

У подальшому викладі параметром транспортного кластеру буде називатися будь-яка із зазначених величин, а в експериментах, представлених на заключному етапі оцінювання, використовується середній час проходження транспортним засобом відповідного сегмента ВДМ.

Географічне розташування сегмента ВДМ $w \in W$ представлено двозначною функцією виду $\bar{x}^w(\tau)$ ($\tau \in [0,1]$). Координати $(x_0^w(0), x_1^w(0))$ та $(x_0^w(1), x_1^w(1))$ визначають фізичне розташування точок початку і кінця лінійного або вузлового елемента вулично-дорожньої мережі, а геометричну позицію інших точок можна отримати, спроектвавши параметр в інтервалі $t \in (0,1)$

У середовищі промислового міста формуються стійкі маршрути руху транспортних кластерів, тобто є впорядкована послідовність вузлів і лінійних елементів графа Ейлера (рис. 2). Позначивши через Ω безліч умовних номерів маршрутів, величиною W_m надалі будемо позначати конкретний маршрут із номером $m \in \Omega$ у графі, тобто таку послідовність із Z_m ребер, що:

$$w_0^m, w_1^m, \dots, w_{Z_m-1}^m. \quad (1)$$

Вихідними даними для оцінок параметрів транспортних кластерів є поточна інформація про транспортні засоби. Ця інформація надходить із прив'язкою до конкретної просторово-часової координати рухомого складу і зводиться до єдиної бази статистичних вимірювань. Формально

вихідні дані можуть бути представлені як послідовність пар фізичних координат такого вигляду:

$$\left(p_0^i(t_j), p_1^i(t_j) \right)_{\substack{m \in \Omega, \\ j \in N}} \quad (2)$$

де i – порядковий номер транспортного кластера, що досліджується в межах промислового міста; j – номер поточного прогнозу про стан транспортного кластера; t_j – період часу, у межах якого виконується дослідження; N – число сформованих прогнозів.

Додатково для маршрутних карт вважаються відомими один або два номери відповідних транспортних кластерів на досліджуваному маршруті, що позначаються далі $m_0(t)$, $m_1(t)$. На практиці альтернативні маршрути транспортного кластера зазвичай розрізняються лише напрямком руху. Коли рух транспортного кластера виконується тільки в одному напрямку, для нього вважаємо відомим єдиний номер маршруту $m_1(t)$. Для кластерів, які розташовані на стоянках, що не введені до транспортної мережі міста (наприклад, дворові території і стоянки), номер маршруту вважається невизначеним або незадалим.

Суттєвим моментом у даних (2) є те, що вхідні дані про координати є недостовірними, що викликано похибками під час формування інформаційної бази даних. Тобто координати можна інтерпретувати у вигляді:

$$p_0^i(t_j) = P_0^i(t_j) + \delta_0, \quad (3)$$

$$p_{01}^i(t_j) = P_1^i(t_j) + \delta_1,$$

де пара $p_0^i(t_j) = P_0^i(t_j)$ визначає справжнє положення транспортного кластера; (δ_0, δ_1) – вектор спотворення інформації.

У зв'язку із цим практично для всіх вхідних даних (тобто пар i, j) таке твердження виявляється неправильним:

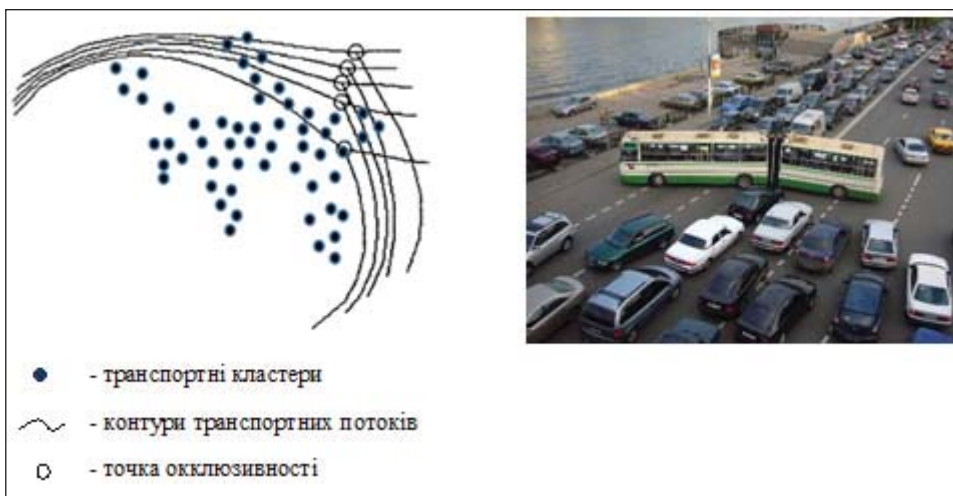


Рис. 1. Географічні контури кластерів

$$\exists_{w,\tau}: (p_0^i(t_j), p_1^i(t_j)) = (x_0^w(\tau), x_1^w(\tau)). \quad (4)$$

У деяких випадках, коли співвідношення (3) все ж таки виявляється правильним, реальне розташування транспортного кластера може не збігатися з отриманим. Тобто така імплікація може бути неправильною:

$$\begin{aligned} (p_0^i(t_j), p_1^i(t_j)) &= (x_0^w(\tau), x_1^w(\tau)) \wedge \\ (P_0^i(t_j), P_1^i(t_j)) &= \\ &= (x_0^{\tilde{w}}(\tilde{\tau}), x_1^{\tilde{w}}(\tilde{\tau})) \Rightarrow w = \tilde{w} \wedge \tau = \tilde{\tau} \end{aligned} \quad (5)$$

Зазначені недоліки даних в інформаційній системі спричиняють необхідність додаткового оброблення даних для отримання більш точних оцінок реального місця розташування транспортного кластера, що досліджується в умовах ВМД.

З огляду на введені позначення, формальна постановка задачі отримання короткострокового прогнозу для транспортного кластера в середовищі промислових районів міста зроблена так. Маючи заданий граф ВМД із безліччю ребер $\{W_m\}_{m \in \Omega}$ і безліччю маршрутів та актуальні данні (з урахуванням ретроспективних досліджень) про положення транспортного кластера у вигляді (2), спрогнозувати транспортний потік $v(w,t)$ для всіх $w \in W$ у $t = t^* + n\Delta$ ($n = \overline{1, N}$).

У наведеному формулюванні N – число сформованих прогнозів, розташованих регулярно із часовим інтервалом Δ , величина t^* – поточний момент часу. У такому разі прогнозний горизонт визначається величиною $N\Delta$, яка для короткострокового прогнозу має порядок однієї години.

Отже, розроблення методу короткострокового прогнозування параметрів транспортних потоків для ВМД промислового міста полягає:

- у визначенні математичної залежності, яка задає вид перетворення вищезазначених даних (2) на значення прогнозних величин;
- у визначенні алгоритму ідентифікації параметрів зазначеної вище математичної залежності (2) за даними реальних спостережень.

Необхідним попереднім етапом запропонованого методу є перетворення виду вихідних даних для зручного оброблення. Мета такого перетворення – перехід від набору даних (1, 2), що побічно характеризують параметри транспортного кластера в мережі в конкретні моменти минулого, до власне значень параметрів транспортного кластера в поточні моменти часу:

$$v(w, t), w \in W, t = t^* - n\Delta (n = 0, 1, \dots) \quad (6)$$

Найбільш прийнятним математичним механізмом для короткострокового прогнозу транспорт-

них кластерів, які формують транспортний потік промислового міста, є алгоритм малопараметричного подання положення транспортних кластерів у різні моменти часу. Він заснований на визначенні положення точок окклюзивності транспортних кластерів, які формують транспортний потік міста.

Для визначення параметрів транспортних кластерів пропонується три методи.

У першому разі застосовується класичний метод, шляхом мінімізації суми квадратів відхилень, що задаються співвідношеннями:

$$\sum_{j=1}^f [x(t_j) - x_j]^2 = \min, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^f [x(t_j) - x_j]^2 = \min,$$

де f – кількість різнорідних транспортних кластерів, що формують транспортний потік промислового міста; x та y – координати точок скупчення транспортних кластерів, які конфліктують у просторі вулично-дорожньої мережі.

Другий метод ґрунтується на мінімізації як суми вже зазначених відхилень, так і суми квадратів швидкостей руху «окклюзивних» точок транспортних кластерів:

$$\sum_{j=1}^f [x(t_j) - [x_j]^2 + p \sum_{j=1}^f \left[\left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=t_j} \right]^2 = \min \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^f [x(t_j) - [x_j]^2 + p \sum_{j=1}^f \left[\left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=t_j} \right]^2 = \min$$



Рис. 2. Приклад графа Ейлера для вулично-дорожньої мережі промислового міста

де p – коефіцієнт транзитного потенціалу міської транспортної мережі [16, с. 15].

Другий підхід заснований на реалізації методу найменших квадратів у класі апроксимаційних поліномів заданого ступеня.

Третій варіант – це методика, що заснована на двох підходах:

– мінімізації як суми квадратів відхилення координат апроксимаційного полінома від табличних даних;

– суми квадратів значень кривизни траєкторії руху «окклюзивних» точок з урахуванням її параметричного значення:

$$\sum_{j=1}^f [x(t_j) - x_j]^2 + \sum_{j=1}^f [y(t_j) - y_j]^2 + p \sum_{j=1}^f [K(t_j)]^2 = \min, \quad (9)$$

де $K(t_j)$ – кривизна контуру транспортного кластера в середовищі ВДМ.

$$K(t_j) = \frac{\left[\frac{dx(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} \Big|_{t=t_j} - \frac{dy(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} \Big|_{t=t_j} \right]}{\left[\left(\frac{dx(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \Big|_{t=t_j} \right)^2 \right]^{3/2}}. \quad (10)$$

На завершальному етапі визначення коефіцієнтів апроксимаційних поліномів зводиться до вирішення системи нелінійних рівнянь.

Висновки. У роботі виконано аналіз просторово-часової структури транспортних потоків промислових міст і запропонована характеристика «окклюзивність транспортного кластера» для оцінки впливу на вулично-дорожню мережу в короткостроковій перспективі. Оцінка параметрів транспортних потоків промислового міста реалізована трьома способами за допомогою методу найменших квадратів. Подальша реалізація цього підходу може бути використана для моделювання нейронної мережі для управління міською транспортною системою.

Список літератури:

1. Vlahogianni E., Karlaftis M., Golias J. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Collection of Transport Studies*. 2014. Vol. 43. Part 1. P. 3–19.
2. Bolshinsky E., Freidman R. Traffic Flow Forecast Survey. Technical Report Israel Institute of Technology. 2012. P. 15.
3. Faouzi N. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges. A survey, *Information Fusion*. 2011. Vol. 12. Issue 1. P. 4–10.
4. Sun H., Liu H., Xiao H., He R., Ran B. Short term traffic forecasting using the local linear regression model. *Journal of Transportation Research Board*. 2003. Vol. 1836. P. 143–150.
5. Oswald R., Scherer T., Smith B. Traffic flow forecasting using approximate nearest, neighbor nonparametric regression. The National ITS Implementation Research Center U.S. DOT University Transportation Center. 2001. P. 115.
6. Box G., Jenkins G., Reinsel G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Irish Transport Research Network. 2008. P. 184.
7. Mai T., Ghosh B., Wilson S. Short-term traffic flow forecasting using dynamic linear models. Irish Transport Research Network. 2011. P. 79.
8. Stathopoulos A., Karlaftis M. A multivariate state space approach for urban traffic flow modeling and prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2003. Vol. 11. Issue 2. P. 121–135.
9. Lin S., Huang H., Zhu D., Wang T. The application of space-time ARIMA model on traffic flow forecasting. *Machine Learning and Cybernetics*. 2009. Vol. 6. P. 48–53.
10. Min W., Wynter L. Real-time road traffic prediction with spatiotemporal correlations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2011. Issue 4. P. 606–616.
11. Zheng W., Lee D., Shi Q. Short-term freeway traffic flow prediction: bayesian combined neural network approach. *Journal of Transportation Engineering*. 2006. Vol. 132. P. 114–121.
12. Zhang X., He G. Forecasting Approach for Short-term Traffic Flow based on Principal Component Analysis and Combined Neural. Network Systems Engineering: Theory & Practice. 2007. Vol. 27 (8). P. 167–171.
13. Guorong G., Yanping L. Traffic Flow Forecasting based on PCA and Wavelet Neural Network. *Information Science and Management Engineering (ISME)*. 2010. Vol. 1. P. 158–161.
14. Lyamzin A., Nikolaienko I. City transport system ecological state forecasting with the use of neural networks. *Proceedings of the National Aviation University*. 2017. № 3 (72). P. 65–70.
15. Jin X., Jin, Zhang Y., Yao D. Simultaneously Prediction of Network Traffic Flow Based on PCA-SVR. *Lecture Notes in Computer Science*. 2007. Vol. 92. P. 22–31.
16. Лямзин А., Украинский Е., Украинская Т. Механизм оценки транзитного потенциала узлов транспортной сети промышленного района. *Topical Problems of Modern Science: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Warsaw, Poland, 18 November. 2017. Vol. № 1. P. 12–17.
17. Губенко В., Лямзин А., Хара М., Романенко Е. Эффективность маршрутной сети промышленных районов в условиях городской логистики. *Transport problems 2013: V International Scientific Conference*. Katowice, Poland. 24–28 June 2013. Katowice: The Silesian University of Technology, 2013. № 1. P. 150–156.

18. Lakhina A., Papagiannaki K., Crovella M., Diot C., Kolaczyk E., Taft N. Structural analysis of network traffic flows. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. 2004. Vol. 32. P. 61–72.
19. Hall R. Handbook of transportation science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2003. P. 73.
20. Hoogendoorn S., Bovy P. State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. Journal of Systems and Control Engineering. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 2001. Vol. 215 (4). P. 283–303.
21. Papagiannaki K. A Summary of Vehicle Detections and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportations Systems. The Vehicle Detector Clearinghouse. 2007. P. 85.
22. Edussuriya A., Chan A., Malvin A. Urban morphology and air quality in dense residential environments: correlations between morphological parameters and air pollution at street-level. Journal of Engineering Science and Technology. 2014. Vol. 9. P. 64–80.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНУЮ СЕТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

В статье исследуются подходы к решению задачи краткосрочного прогнозирования транспортных потоков в городской среде. В качестве исходных данных используются граф улично-дорожной сети, а также данные о качественном и количественном состоянии транспортных кластеров. Введено понятие «окклюзивность транспортного кластера» как основной характеристики транспортного потока в среде улично-дорожной сети. Краткосрочная оценка параметров транспортного потока выполняется на основе метода наименьших квадратов.

Ключевые слова: улично-дорожная сеть, промышленный город, транспортный поток, окклюзивность транспортного кластера, краткосрочное прогнозирование, метод наименьших квадратов.

FORECASTING IMPACT OF TRANSPORT FLOWS ON THE INDUSTRIAL CITY ROAD NETWORK

The purpose of this work is to develop of short-term forecasting method of traffic flow parameters within a road network taking into account an industrial city specific. The structural characteristics of industrial cities transport flows have been analysed in morning and evening peak traffic periods. Analyse of qualitative and quantitative indicators of transport clusters in the environment of the industrial cities road network has allowed to propose a hypothesis about occlusivity of transport clusters, both in the time and geographic location. The occlusivity can be characterized by the transport flow density indicator, and the occlusivity point is the maximum rolling stock units concentration level in the transport cluster that is investigated. The mathematical model of the road network of an industrial city is based on Euler's graph. There is an ordered sequence of nodes and linear elements of Euler's graph. And this graph describes the sustainable routes of traffic clusters in the road network. The most acceptable mathematical approach for the short-term forecast of transport clusters that form the traffic flow of an industrial city is the low-parametric representation of the transport clusters position at different times. This approach is based on the definition of the occlusivity point position of the transport clusters. The parameter estimation of an industrial city transport flows is realized in three ways by means of the least square method. The proposed mathematical relation specifies the transport cluster parameters transformation at specific points in the past into parameter values at current time points. Further implementation of this approach can be used to model the neural network for urban transport system managing.

Key words: road network, industrial city, traffic flow, occlusivity of transport cluster, short-term forecasting, least square method.