УДК 656.2

РОЗРОБЛЕННЯ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ ПАСАЖИРІВ У ШВИДКІСНОМУ РУСІ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ ПРОСТОРОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Канд. техн. наук Л. О. Пархоменко, В. О. Лавренюк

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ПАССАЖИРОВ В СКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Канд. техн. наук Л. А. Пархоменко, В. А. Лавренюк

DEVELOPMENT OF FUZZY MODEL FOR FORECASTING OF PASSENGERS CORRESPONDENCE IN HIGH-SPEED MOVEMENT ON THE BASIS OF SPATIAL INTERACTION

Assistant professor L. A. Parkhomenko, V. O. Lavreniuk

Запропоновано математичну модель прогнозування кореспонденцій пасажирів на основі нечітких реляційних обчислень, яка, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати населеність міст, тривалість подорожі, транспортну доступність, вплив агломераційного ефекту в структурі кореспонденцій, що підвищить точність прогнозування та в подальшому надасть можливість проводити більш точні розрахунки щодо економічної доцільності реалізації інноваційних проектів підвищення швидкості руху на залізничному транспорті.

Ключові слова: *швидкісний пасажирський рух, нечітка модель прогнозування, просторова взаємодія, гравітаційні моделі, кореспонденція пасажирів.*

Предложена математическая модель прогнозирования корреспонденций пассажиров на основе нечетких реляционных вычислений, которая, в отличии от существующих, позволяет учесть населенность городов, продолжительность путешествия, транспортную доступность, влияние агломерационного эффекта в структуре корреспонденций, что повысит точность прогнозирования и в дальнейшем позволит проводить более точные расчеты экономической целесообразности реализации инновационных проектов повышения скорости движения на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова*: скоростное пассажирское движение, нечеткая модель прогнозирования, пространственное взаимодействие, гравитационные модели, корреспонденция пассажиров.*

High-speed passenger transport is one of the priorities of Ukrainian railways. Mechanism of improving rail system passenger traffic is formalizing procedures for rational distribution of high-speed trains in the long term with further integration into the information management system based on the formation of a decision support system for strategic planning speed passenger traffic on the railways of Ukraine. To determine the efficient rail network topologies and high-speed transport and the rational distribution of high-speed trains managers taking management decisions need to provide a modern system of forecasting passenger flows. The mathematical model predicting correspondence passengers based on fuzzy relational calculations that the difference

from the existing, allow for the habitability of cities, travel time, transport accessibility, the impact of agglomeration effect in the structure of correspondence, which will improve the accuracy of forecasting, and later will allow for more accurate calculations on the economic feasibility of innovative projects increasing the speed of traffic on the railways.

Keywords: *high-speed passenger traffic, fuzzy forecasting model, spatial interaction, gravitational model correspondence* passengers.

Вступ. В умовах здійснення структурних змін у залізничній транспортній мережі країни постають питання щодо пошуку збалансованого існування маршрутів прямування поїздопотоків швидкісного і звичайного руху з урахуванням розвитку топології залізничної мережі.

Проведений аналіз кількості відправлених пасажирів на залізничному транспорті України за період 2009-2013 рр. свідчить про сталу тенденцію падіння інтенсивності пасажиропотоку з середньою величиною в 1,09 % протягом 2011-2013 рр. На фоні незначного падіння кількості перевезених пасажирів загострюється конкуренція між залізничним і автомобільним транспортом. Аналіз досвіду залізниць світу показує, що найбільш значне підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту можливе при впровадженні швидкісного або високошвидкісного руху пасажирських поїздів.

Подальший розвиток проектів підвищення швидкості руху пасажирських поїздів на залізницях України потребує проведення наукових досліджень щодо вибору стратегії розвитку залізничної системи пасажирських перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз реалізації останніх проектів підвищення швидкості руху пасажирських поїздів на залізницях України довів ряд недоліків: рішення щодо розвитку залізничної мережі приймаються розрізнено, не взаємопов'язано між собою та без комплексної оцінки їх впливу в довгостроковому періоді функціонування мережі; не існує теоретично обґрунтованих техніко-економічних розрахунків щодо ефективності впровадження різних варіантів розвитку мережі залізничних пасажирських перевезень. Наведені вище недоліки доводять необхідність проведення наукових досліджень щодо формування системи стратегічного управління пасажирськими перевезеннями з можливістю проведення прогнозування попиту на перевезення в довгостроковому періоді планування та визначення раціональної топології залізничної мережі швидкісних перевезень у взаємодії зі звичайними пасажирськими поїздами.

Підвищення швидкості руху поїздів у залізничних системах світу створило фундаментальні зміни в просторовій взаємодії віддалених територій. Високі темпи розвитку швидкісних (від англ. Speed Rail, SR) і високошвидкісних залізниць (від англ. High Speed Rail, HSR) значною мірою зумовлені їх підвищеною безпекою руху, більш високою продуктивністю за рахунок здатності покривати великі географічні відстані за короткий час, зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище та значної соціально-економічної ефективності [1-3].

Досвід експлуатації швидкісних і високошвидкісних залізниць свідчить про значний соціально-економічний ефект, що досягається підвищенням мобільності населення і, як наслідок, зростанням ділової активності населення в колись ізольованих регіонах [4]. Взагалі економічні і соціальні наслідки після впровадження високошвидкісних магістралей дуже складно передбачити і кількісно оцінити [5]. Так, до більш широких економічних переваг можна віднести підвищення ринкової доступності (від англ. market accessibility) [4]; агломераційні переваги (від англ. agglomeration benefits), що

призводять до збільшення ринку праці шляхом підвищення транспортної доступності територій [6, 7]; підвищення якості життя тощо. Такі результати можуть бути виміряні збільшенням ВВП країни, що відбувається в результаті зміни економічної активності [4].

Перелічені вище переваги швидкісних і високошвидкісних залізниць призвели до їх значного поширення у світі [8]. Так, по всьому світу в період з січня 2008 р. по січень 2011 р. майже в 1,5 разу збільшилась кількість високошвидкісних поїздів – з 1737 поїздів до 2517. Дві третини цієї кількості знаходиться у п'яти країнах: Франція, Китай, Японія, Німеччина та Іспанія. За прогнозами до 2025 р. очікується, що кількість високошвидкісних поїздів по всьому світу складе до 5600 одиниць [9].

Визначення мети та задачі дослідження. Метою дослідження є проведення аналізу пасажиропотоків в умовах звичайної та прискореної швидкості руху пасажирських поїздів на залізницях України; розроблення моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів в умовах впровадження залізничного швидкісного пасажирського сполучення.

Виконані дослідження базуються на процедурі аналізу ринку швидкісних перевезень пасажирів, теорії імовірностей та математичної статистики. Використано методи нечіткої алгебри, генетичних алгоритмів для формування математичної моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів в умовах впровадження залізничного швидкісного пасажирського сполучення; методи статистичної фізики, теорії графів, метод Дейкстри та мультиагентний метод оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій для формування ентропійної математичної моделі пошуку раціональної топології залізничної мережі для курсування швидкісних і звичайних пасажирських поїздів; методи дослідження інформаційних потоків при формуванні інформаційно-керуючої системи з реалізацією СППР для стратегічного планування.

В основі формування математичної моделі запропоновано використати підхід на основі використання моделей просторової взаємодії. Найбільш поширеними моделями такого класу є "гравітаційні" моделі [10, 11]. В основі даних моделей лежить сформульована більше ста років тому теорія, за якою обсяги перевезень між двома містами підпорядковуються закону обернених квадратів відповідно до закону гравітації [10]. На сучасному етапі наукових досліджень найбільш популярні версії гравітаційних моделей використовують імовірнісну постановку, крім того, моделі доповнюються різними варіантами показників, що підвищують точність прогнозування [12].

Враховуючи відсутність реалізації гравітаційних моделей з прийнятною точністю (похибка складає понад 20 %), для залізничного транспорту дане дослідження присвячено створенню і реалізації моделі прогнозування кореспонденцій в умовах впровадження швидкісних пасажирських поїздів на основі нечітких реляційних обчислень.

Відповідно до застосування у транспортних системах у гравітаційних моделях у якості тіл виступають пункти зародження-погашення потоків, за масу тіл приймаються обсяги відправлень з одного транспортного району і прибуття в інший за період прогнозування, фізичну відстань можна замінити на транспортну відстань, яку доцільно інтерпретувати як узагальнену функцію транспортних витрат [12, 13]. У найпростішій формі гравітаційна модель має вигляд

$$\rho_{ij} = \kappa \frac{s_i d_j}{c^2_{ij}} \Rightarrow \rho_{ij} = \kappa s_i d_j f(c_{ij}), \quad (1)$$

де ρ_{ij} – прогноз кореспонденції з пункту i в пункт j, пас., $i \in R$, $j \in R$;

R – множина пунктів прибуття;

s_i – загальний обсяг відправлення з пункту i, пас./доба;

d_j – загальний обсяг прибуття в пункт j, пас./доба;

c_{ij} – показник опору між двома пунктами (тариф на перевезення), грн.

Враховуючи неможливість отримання точних значень наведених вище параметрів моделі прогнозування та слабку структурованість процесу, у роботі запропоновано використати методи нечіткої алгебри, зокрема нечіткі реляційні обчислення [18], що засновані на описі систем у термінах простору станів для визначення залежності (1). Такий опис ґрунтується на матричній формі уявлення залежностей, що досить зручно для практичної реалізації. Згідно з вказаним вище модель прогнозування кореспонденцій в умовах впровадження швидкісних пасажирських поїздів можна записати за допомогою системи нечітких реляційних рівнянь (від англ. Fuzzy Relational Equation, FRE) [14]:

$$R \circ S = T, \qquad (2)$$

де $R_{m\times p}$ – матриця нечітких входів;

$S_{p\times n}$ – матриця нечітких відношень;

$T_{m\times n}$ – матриця нечітких виходів на дискретних чітких множинах X, Y, Z кінцевих потужностей m, p, n відповідно, правило композиції $\circ$ засновано на максимінному критерії.

Індекс відвідуваності тим більше, чим більше і ближче до району відвідування розташовані альтернативні райони відправлення.

Даний фактор дозволяє моделювати ефект, при якому обсяги прибуття потоків пасажирів до міста, яке розташоване в агломерації деякої кількості інших міст, меншого значення породжує більшу кореспонденцію, ніж це диктується факторами транспортного зв'язку [15, 16] (рис. 1).

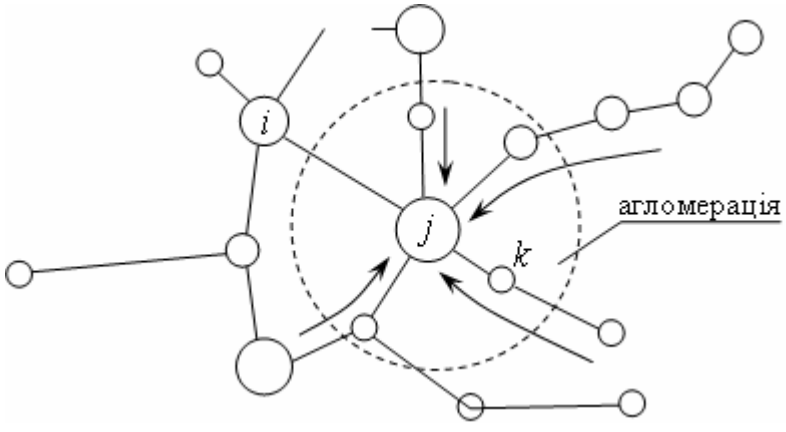

Рис. 1. Схематичне подання агломераційного ефекту при прогнозуванні пасажиропотоку

Викладення основного матеріалу. Вихідні дані моделі запропоновано формалізувати також у вигляді ЛЗ $\Omega = \{$обсяги кореспонденції пасажирів із міста i до міста $j\}$ з терм-множиною $T_\Omega \forall \{$"низькі" – t_1, "середні" – t_2, "високі" – $t_3\}$ з трикутними функціями належності. За таких умов вихідний вектор має розмірність $n = 3$, тобто

$$T = (\underbrace{\mu_{(t_1)}, \mu_{(t_1)}, \mu_{(t_1)}}_{\Omega}), m = 1, n = 3. \qquad (3)$$

Для визначення залежності між вхідними параметрами та виходом моделі необхідно знайти матрицю нечітких відношень $S_{p=15\times n=3}$. Отже, у рівнянні (2) є невідомим S. За аналогією з матричною алгеброю дане рівняння можна назвати лівим нечітким реляційним рівнянням [14], розв'язання якого зводиться до розв'язання системи нечітких реляційних рівнянь (від англ. fuzzy linear system equations), для чого необхідним є пошук основи і всіх відгалужень. Основа в структурі множини розв'язків такого рівняння являє собою максимальний розв'язок, тоді як відгалуженням є множина мінімальних розв'язків. Для того щоб система була розв'язуваною, необхідно і достатньо, щоб розв'язком цієї системи було $G = \mathrm{I}\, G_j$, де $G_j -$ максимальний розв'язок j-го рівняння. Для того щоб система мала мінімальні розв'язки, необхідно і достатньо, щоб мінімальні елементи (а також незрівнянні ні з одним з решти) множини

$$\{\mathop{\mathrm{Y}}_{j} M^{j}_{\beta_j} \mid M^{j}_{\beta_j} \in M^{j} \wedge M^{j}_{\beta_j} \le G\},$$

де M – множина мінімальних розв'язків системи рівнянь, взяті з об'єднання min-рішень всіх рівнянь, що входять у систему, були розв'язком системи [14, 17].

Знайдене нечітке відношення $S_{p\times n}$ дозволяє розв'язати пряму задачу розв'язання рівняння (2), тобто знаходити прогнозні кореспонденції між містами. Схему реалізації моделі прогнозування кореспонденцій в умовах впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів на основі нечітких реляційних обчислень наведено на рис. 2.

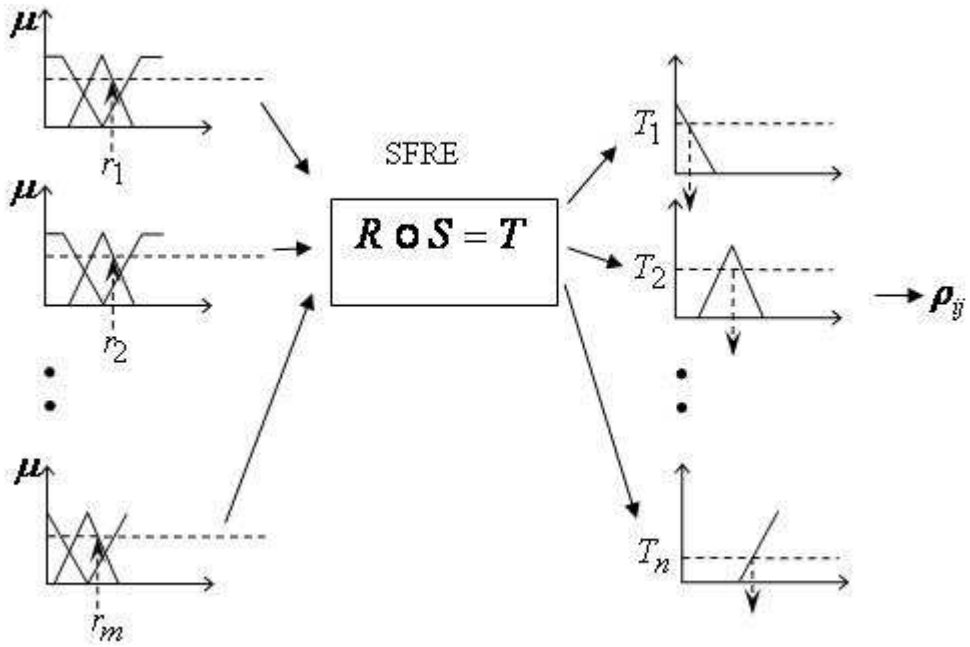

Рис. 2. Схема моделі прогнозування кореспонденцій на основі системи нечітких реляційних рівнянь

Результат прогнозування моделі ρ_{ij} запропоновано знаходити на основі операції дефазифікації нечіткої множини, що відповідає вектору T, який отримано на основі прямого розв'язання рівняння (3) з нечітким вхідним вектором з навчальної

вибірки R_i та знайденим відношенням $S_{15\times3}$. На першому етапі приведення до чітких значень виходу рівняння (3) проводиться операція знаходження мінімального зрізу нечітких множин відповідно до значень вектора T. Після цього за допомогою операції максимум проводиться об'єднання усічених нечітких множин трьох термів лінгвістичних змінних (ЛЗ) $\Omega = \{$обсяги кореспонденції пасажирів із міста i до міста $j\}$. На останньому етапі над знайденою об'єднаною нечіткою множиною проводиться операція дефазифікації на основі методу центра тяжіння [18].

Отримані залежності можна записати лінгвістичними змінними $\Lambda_3 = \{$індекс тривалості подорожі$\}$, $\Lambda_4 = \{$індекс транспортної доступності$\}$ та $\Lambda_5 = \{$індекс відвідуваності міста прибуття$\}$ із наступними терм-множинами $T_{3,4,5}\forall$ {"низький" – t_1, "середній" – t_2, "високий" – t_3} і відповідними трикутними функціями належності. Схематичну візуалізацію графіків функцій належності нечітких термів вхідних змінних $\Lambda_{1\div5}$ наведено на рис. 3.

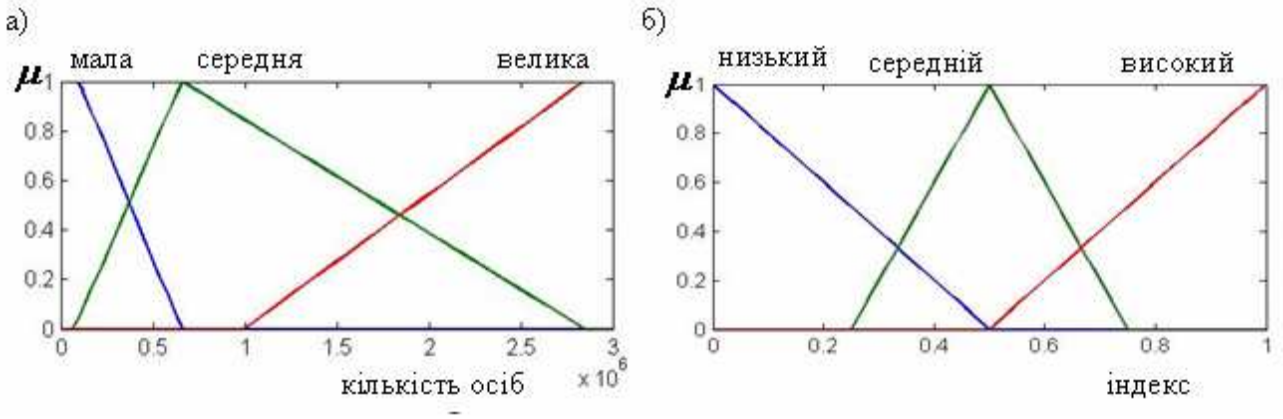

Рис. 3. Графіки функцій належності нечітких термів вхідних змінних:
а – терм-множина ЛЗ $\Lambda_{1\div2}$; б – терм-множина ЛЗ $\Lambda_{3\div5}$

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. На основі аналізу існуючих моделей прогнозування пасажиропотоків в умовах впровадження швидкісних пасажирських поїздів доведено доцільність використання гравітаційних моделей.

1. Загальну гравітаційну модель прогнозування адаптовано до умов перевезення пасажирів залізничним транспортом з урахуванням існуючого агломераційного ефекту.

2. Враховуючи неможливість оцінювання точних значень параметрів гравітаційної моделі, запропоновано використання підходу на основі системи нечітких реляційних рівнянь для знаходження прогнозних кореспонденцій пасажиропотоків між містами в рамках розв'язання прямої задачі. Вхідні та вихідні дані моделі представлено як нечіткі множини з функціями належності у вигляді кусочно-лінійних апроксимацій, які враховують фактори щодо населеності міст, тривалості подорожі, транспортну доступність, наявність агломераційного ефекту в структурі кореспонденцій, що забезпечує підвищення точності прогнозування. Приведення до чіткості функціону-

вання моделі прогнозування проведено на основі процедури дефазифікації.

3. Процедура формування адаптивної моделі прогнозування пасажиропотоків до умов розподілу поїздопотоків на мережі дозволяє вирішувати завдання як щодо стратегічного планування, так і для управління з урахуванням впливу сезонного фактора при застосуванні моделі змішаного руху.

Список використаних джерел

1. High speed rail. Fast track to sustainable mobility. This brochure is a publication of the INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC) 16 rue Jean Rey, F-75015 Paris, NOVEMBER 2010. – 18 p.

2. Vickerman, R. High-speed rail in Europe: experience and issues for future development [Текст] / R. Vickerman // The Annals of Regional Science, 1997. – 31.– P. 21-38.

3. Givoni, M. Development and impact of the Modern High-Speed Train: A Review [Text] / M. Givoni // Transport Review. – 2006. –Vol.26, No.5. – P.593-611.

4. Ginés, de Rus Economic Analysis of High Speed Rail in Europe [Text] / Ginés de Rus, Ignacio Barrón, Javier Campos, Philippe Gagnepain, Chris Nash, Andreu Ulied, Roger Vickerman //Fundación BBVA, 2009 Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao. – 140 p.

5. Amos, P. High speed Rail: The Fast Track to Economic Development? The World Bank [Text] / P. Amos, D. Bullock, J. Sondhi // Beijing, – 2010. – 28 p.

6. Preston, John Impact of High Speed Trains on Socio-Economic Activity: The case of Ashford (Kent) [Text] / John Preston, Adam Larbie, Graham Wall// 4th Annual Conference on Railroad Industry Structure, Competition and Investment, Universidad Carlos III. Madrid, 2006. – 18 p.

7. Graham, Daniel J. Agglomeration Economies and Transport Investment [Text] / Daniel J. Graham // Discussion Paper No. 2007-11, International Transport Forum, Joint Transport Research Centre, OECD, 2007. – 23 p.

8. Анисимов, П. С. Высокоскоростные железнодорожные магистрали и пассажирские поезда [Текст]: монография / П.С. Анисимов, А.А. Иванов. — М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 542 с.

9. Global Expansion of High-Speed Rail Gains Steam [Электронный ресурс] / Supriya Kumar // 2013 Worldwatch Institute – 2013. – Режим доступа: http://www.worldwatch.org/global-expansion-high-speed-rail-gains-steam.

10. Carrothers, G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction [Text] / G. A. P. Carrothers // J. of the American Instit. Planners. – 1956. –V. 22. – P. 94-102.

11. Doganis, R. Traffic forecasting and the gravity model [Text] / R. Doganis // Flight International. – 1966. – P.547–549.

12. Погребняк, Е. Б. Анализ методов формирования матрицы корреспонденций транспортной сети города [Текст] / Е. Б. Погребняк, Н. И. Самойленко // Коммунальное хозяйство городов; [Харьковская национальная академия городского хозяйства]. – 2006. – № 69. – С. 121-126.

13. Введение в математическое моделирование транспортных потоков [Текст]: учеб. пособие / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, [и др.]; под ред. А.В. Гасникова. – М.: МФТИ, 2010. – 362 с.

14. Peeva, K. Fuzzy Relational Calculus Theory: Applications and Software [Text] / Ketty Peeva, Yordan Kyosev // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2005. – 291 p.

15. Fotheringham, A.S. A new set of spacial-interaction models: the theory of competing destinations [Text]// Envir. & Plan. A. – 1983. – V. 15. – P 15-36.

16. Швецов, В. И. Математическое моделирование транспортных потоков [Текст] / В.И. Швецов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3–46.

17. Блюмин, С. Л. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения [Текст]: монография / С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова, П. В. Сараев, И. В. Черпаков. – Липецк: ЛЭГИ, 2002. – 111 с.

18. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский; пер. с польс. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия: Телеком, 2004. – 452 с.

19. Удосконалення підходів щодо розрахунку кореспонденцій потоків пасажирів в умовах впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів [Текст] / Т.В. Бутько, Л.О. Пархоменко // Тезисы XXXVI науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства 24-26 апреля 2012 г. – Харьков, 2012. – Ч.2. – С. 64-65.

Пархоменко Лариса Олексіївна, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-88.
Лавренюк Вадим Олександрович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту.

Larisa Oleksiiovna Parkhomenko, assistant professor of cathedra of management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport.
Vadym Oleksandrovych Lavreniuk, master student, Ukrainian State University of Railway Transport.

Стаття прийнята 01.09.2016 р.