
УДК 656.027(477)

ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

А. І. Дудчак

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПАСАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

А. И. Дудчак

THE FEASIBILITY AND EFFICACY OF HIGH-SPEED RAIL PASSENGER TRANSPORTATION

A. Dudchak

У статті вказується на доцільність та ефективність швидкісних залізничних пасажирських перевезень, де для розрахунку кореспонденцій потоків в умовах залізничного швидкісного пасажирського сполучення запропоновано математичну модель прогнозування кореспонденцій на основі ентропії, яка, на відміну від існуючих, дозволяє отримати

інтервальні оцінки обсягів пасажиропотоків, що в подальшому надасть можливість проводити більш точні розрахунки щодо економічної доцільності реалізації інноваційних проектів підвищення швидкості руху на залізничному транспорті.

Ключові слова: високошвидкісні та швидкісні магістралі (ВШМ), швидкісний і високошвидкісний рух пасажирських поїздів, швидкісні залізничні пасажирські перевезення, самоорганізація, топологія мережі, ентропія, імовірність, спроможні та неспроможні верстви швидкісного пасажиропотоку, дохід верств швидкісного пасажиропотоку.

В статье указывается на целесообразность и эффективность скоростных железнодорожных пассажирских перевозок, где для расчета корреспонденций потоков в условиях скоростного железнодорожного пассажирского сообщения предложена математическая модель прогнозирования корреспонденций на основе энтропии, которая, в отличие от существующих, позволяет получить интервалу оценки объемов пассажиропотоков, что в дальнейшем даст возможность проводить более точные расчеты относительно экономической целесообразности реализации инновационных проектов повышения скорости движения на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: высокоскоростные и скоростные магистрали (ВСМ), скоростное и высокоскоростное движение пассажирских поездов, скоростные железнодорожные пассажирские перевозки, самоорганизация, топология сети, энтропия, вероятность, состоятельные и несостоятельные слои скоростного пассажиропотока, доход слоев скоростного пассажиропотока.

Transport speed is the basic index of transport politics, that successfully clinched by West Europe states. In the article to calculate the correspondence flows in conditions of high-speed passenger rail service proposed a mathematical model for predicting correspondences on the basis of entropy, which unlike existing enables to obtain interval estimates of the volume of passenger traffic that in the future will enable more accurate calculations on the economic feasibility of innovative projects to increase the speed of movement of railway transport. Nowadays the passenger torrent principally consists of the prosperous sections of population such as businessmen and tourists. In spite of that the population(quantity of passengers) of high-speed trains increased comparatively than last year. Passengers prefer high-speed rail transport, and therefore the profitability of the Railways will increase significantly. It indicates the feasibility and effectiveness of high-speed rail passenger traffic. The speed and high-speed traffic is a perspective direction of development of transport.

Keywords: high-speed line (VSHM), high-speed and high-speed movement of passenger trains, high-speed rail passenger transport, self-organization, network topology, entropy, probability, capable and incapable of high-speed passenger segments, income sections of high-speed passenger traffic.

Вступ. Світовий досвід впровадження швидкісного та високошвидкісного руху пасажирських поїздів базується на двох напрямках розвитку, так званих японському та французькому [4, 5]. У першому варіанті розвиток топології мережі орієнтовано на високий попит, при якому реалізуються перевезення близько 100 000 пасажирів на добу завдяки високій

густоті населення та концентрації економічної діяльності уздовж залізничних ліній (Японія, Китай, Південна Корея, Тайвань). Другий варіант розвитку ґрунтується на мінімізації вартості, тобто орієнтований на більш низькі капітальні та експлуатаційні витрати (Франція, Німеччина, Італія).

Актуальність. На концептуальному рівні розвиток мереж високошвидкісних магістралей (ВШМ, англ. High Speed Rail або HSR) можна виділити декілька підходів. До першого можна віднести відокремлений розвиток топології мережі, тобто лінії ВШМ повністю ізолюються від загальної залізничної мережі (Японія, Іспанія). Другий напрямок передбачає розвиток розгалуженої мережі спеціалізованих ліній, на яких поїзди здатні розвивати швидкість 250-300 км/год з можливістю часткової взаємодії зі звичайною мережею (Франція). Останній напрямок найбільш економічний – передбачає змішаний варіант розвитку мережі швидкісних сполучень на основі модернізації існуючих залізничних ліній для можливості руху пасажирських поїздів до 200 км/год (Німеччина, Італія) [4, 5]. Даний підхід передбачає застосування швидкісних пасажирських поїздів, що здатні рухатися коліями звичайної залізничної мережі України.

Комерційний успіх високошвидкісних мереж світу ґрунтується на зменшенні тривалості поїздки (до 3 год у дорозі), що дозволяє конкурувати з автомобільним і авіаційним транспортом, чим і підтверджувати вигідність швидкісного та високошвидкісного руху пасажирських поїздів.

Аналіз останніх наукових і практичних досліджень. Дослідження в галузі

проблем проектування мереж (англ., Network Design Problems) [6] підтверджують, що макрохарактеристики складної транспортної системи не формуються на основі централізованого планування згори вниз, а визначаються шляхом самоорганізації пасажирів у потоки на основі попиту на перевезення [6]. Підходи до пошуку раціональної топології залізничної пасажирської мережі проводились окремо для мережі високошвидкісних залізничних пасажирських перевезень без урахування існування і розвитку залізничної мережі звичайних пасажирських сполучень, що завжди впливає на ефективність існування HSR, що підтверджено науковими статтями [1, 2, 3]. Але в цих роботах недостатньо висвітлено проблеми визначення раціональної топології ВШМ.

Викладення основного матеріалу. З метою вирішення цієї проблеми доцільно провести статистичні дослідження параметрів пасажирських потоків на ВШМ. Взявши до уваги статистичні дані на поїзди «Інтерсіті+» [7], а саме населеність швидкісних поїздів №741/742, №743/744 у січні 2014 року та січні 2015 року, при порівнянні отримано такі результати. Населеність поїздів №741/742, №743/744 у січні порівняно з минулим роком зростає: поїзд №742 – на 31%, поїзд №741 – на 15%, поїзд №744 – на 17%. Цей результат наведено в таблиці та на рис. 1.

Таблиця

Населеність швидкісних поїздів № 741/742, № 743/744 у січні 2014 року та січні 2015 року

Номер поїзда	Сполучення	Вагони	Запропоновано	Продано	Запропоновано	Продано	Населеність, %	
			2014 рік	2014 рік	2015 рік	2015 рік	2014 рік	2015 рік
742	Трускавець – Київ	9	17370	6655	17949	12296	38	69
741	Київ – Трускавець	9	17370	5674	17949	8354	32	47
744	Львів – Київ	9	16735	4410	17949	7960	27	44
743	Київ – Львів	9	15771	8280	17949	9455	53	53

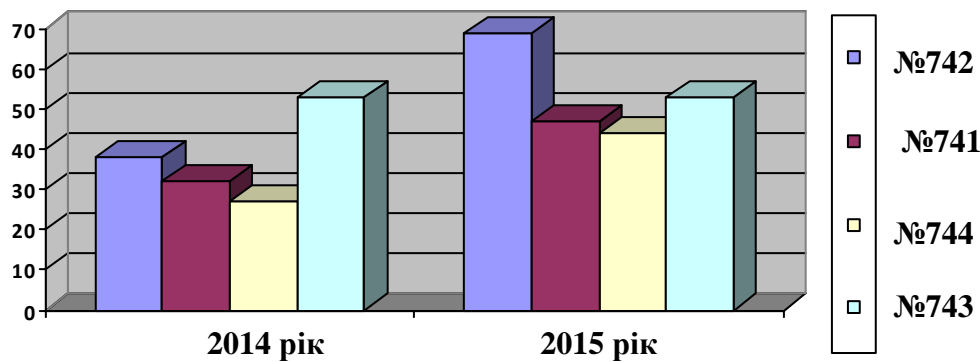


Рис. 1. Діаграма населеності у швидкісних поїздах № 741/742, № 743/744 у січні 2014 року та січні 2015 року

Дані дослідження підтверджують тенденції підвищення ефективності впровадження швидкісного руху на залізницях України. На даній діаграмі спостерігається значне збільшення населеності в поїздах №741\742, №743/744 у 2015 році порівняно з минулим роком і це не зважаючи на цінову політику, адже вартість проїзного документа становить у два рази більше, ніж у пасажирських поїздах, що підтверджує правильність застосування моделі процесу розвитку залізничної системи швидкісних перевезень, яка заснована на принципах колективної самоорганізації.

У швидкісних залізничних пасажирських перевезеннях спроможність чи неспроможність верств пасажиропотоку використання цих послуг пов'язано з власними доходами. Для оцінки спроможності населення в користуванні проїзду у швидкісних пасажирських поїздах запропоновано математичну модель прогнозування кореспонденцій пасажиропотоку на основі ентропії. Ентропійний коефіцієнт (індекс Г. Тейла, 1967 р.) вперше був застосований в ентропійному підході до оцінки нерівності розподілу доходів [8]

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\mu} \ln \frac{x_i}{\mu} \right), \quad (1)$$

де n – кількість суб'єктів; x_i – дохід i -го суб'єкта; μ – середній дохід.

Згодом був запропонований клас узагальнених ентропійних показників нерівності [9] (Generalized Entropy Class) з параметром α :

$$GE(\alpha) = \frac{1}{\alpha^2 - \alpha} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^\alpha - 1 \right]. \quad (2)$$

Особистим випадком ентропійних коефіцієнтів індекс Тейла є при $\alpha = 1$. Розглянемо зв'язок індексу Тейла з ентропією Шеннона. Якщо дана дискретна випадкова величина, яка набуває n значень з імовірностями p_1, p_2, \dots, p_n , то ентропія Шеннона буде мати вигляд

$$H = \sum_{i=1}^n \left(p_i \ln \frac{1}{p_i} \right). \quad (3)$$

Використовується ентропія розподілу доходу для вирахування індексу Тейла, позначимо її H_T :

$$H_T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\mu n} \ln \frac{\mu n}{x_i} \right). \quad (4)$$

Невизначеність потрапляння одиниці доходу суб'єктам вибірки характеризує

ентропія H_T : $q_i = \frac{x_i}{\mu n}$ – це ймовірність отримання одиниці доходу i -м суб'єктом або ймовірність того, що i -й суб'єкт отримає q_i частку сукупного доходу. Максимального значення досягає ентропія $H_T^* = \ln n$ при рівномірному розподілі $q_i = \frac{1}{n}$, тобто за умови рівності доходів суб'єктів. Рівність доходів, приймаючи за ідеальний стан індекс Тейла, визначається як показник, який характеризує різницю між ентропією ідеального і аналізованого розподілів:

$$T = \ln n - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\mu n} \ln \frac{\mu n}{x_i} \right). \quad (5)$$

Цей вираз після перетворень зводиться до формули (1). Система повністю детермінована у тому випадку, коли весь дохід зосереджений в одного суб'єкта і з ймовірністю 100 % відомо, кому припаде додаткова одиниця доходу, $H_T = 0$. При цьому індекс Тейла досягає максимального значення $T = \ln n$. Найбільшою невизначеністю при рівності доходів характеризується розподіл доходу по суб'єктах, коли для всіх суб'єктів

ймовірність отримання одиниці доходу однакова: $T = 0$.

Виділимо моменти в інтерпретації індексу Тейла: по-перше, стан, що характеризується максимальною ентропією, приймається за ідеальний стан; по-друге, показник нерівності, індекс Тейла, і показник невизначеності H_T , що характеризується монотонною різноспрямованою зміною, при зменшенні нерівності H_T збільшиться і навпаки. Невизначеність у розподілі доходу, розглядаючи економічну систему по суті, що складається з одиниць доходу, характеризує ентропія, яка використовується для визначення індексу Тейла.

Економічними агентами (суб'єктами) подано мікроекономічну систему, поведінка якої характеризується ймовірністю отримання того чи другого доходу. Невизначеність системи залежить від розподілу її елементів (агентів) за доходом. Якщо дохід агента є дискретною випадковою величиною, яка набуває значення x_1, x_2, \dots, x_m з ймовірністю p_1, p_2, \dots, p_m , то для характеристики невизначеності можемо безпосередньо використати формулу Шеннона

$$H = \sum_{k=1}^m \left(p_k \ln \frac{1}{p_k} \right) = - \sum_{k=1}^m (p_k \ln p_k). \quad (6)$$

На відміну від H_T , ентропія H при рівності доходів дорівнює 0: стан системи є найбільш упорядкованим і в цьому сенсі його можна вважати ідеальним. Якщо

виразити ентропію H_T і індекс Тейла з використанням частот p_1, p_2, \dots, p_m , отримаємо

$$H_T = \sum_{k=1}^m \left(\frac{n_k x_k}{\mu n} \ln \frac{\mu n}{x_k} \right) = \ln n - \sum_{k=1}^m p_k \frac{x_k}{\mu} \ln \frac{x_k}{\mu}, \quad (7)$$

$$T = \sum_{k=1}^m p_k \frac{x_k}{\mu} \ln \frac{x_k}{\mu}. \quad (8)$$

Максимального значення $\ln m$ при рівномірному розподілі суб'єктів за доходом $p_k = \text{const} = \frac{1}{m}$ набуває ентропія H . У цьому випадку всі значення доходу є рівномірними для суб'єкта і в цьому сенсі система характеризується найбільшою невизначеністю, що зі змістовної точки зору цілком зрозуміло. У цьому випадку ентропія H_T буде мати вигляд

$$H_T = \ln n - \ln m - \sum_{k=1}^m \frac{x_k}{X} \ln \frac{x_k}{X}, \quad (9)$$

де $X = \sum_{k=1}^m x_k$.

Значення доходу x_k при цьому можуть бути достатньо близькими, а можуть дуже відрізнятись. Залежно від цього ентропія розподілу доходу H_T буде більше або менше близькою до свого максимального значення $H_T^* = \ln n$, а індекс Тейла – до 0. Якщо розподіл суб'єктів за доходом задано функцією щільності розподілу $p(x)$, $0 \leq x \leq x_{\max}$, то цікаві нам показники будуть мати вигляд

$$H = - \int_0^{x_{\max}} p(x) \ln p(x) dx, \quad (10)$$

$$H_T = - \int_0^{x_{\max}} p(x) \frac{x}{\mu} \ln \frac{x}{\mu} dx,$$

$$T = \int_0^{x_{\max}} p(x) \frac{x}{\mu} \ln \frac{x}{\mu} dx. \quad (11)$$

У випадку рівномірного розподілу суб'єктів за доходом вони набувають значення

$$H^* = \ln(x_{\max}), \quad (12)$$

$$H_T = \ln n - \ln 2 + \frac{1}{2}, \quad T = \ln 2 - \frac{1}{2}.$$

У відповідності з ентропією H найбільшого безпорядку система досягає не при граничних значеннях індексу Тейла, тобто ні при максимальній або мінімальній нерівності, а при $T \approx 0,193$. У більш загальному випадку, коли розподіл суб'єктів за доходом задано степеневою функцією розподілу $F(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^\alpha$, при $\alpha = 1$ отримаємо рівномірний розподіл, індекс Тейла набуває значення, залежне від параметра α : $T = \ln \frac{\alpha+1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha+1}$.

Демонструють розглянуті приклади особливості інтерпретації ентропії розподілу суб'єктів за доходом, ентропії розподілу доходу по суб'єктах і показників нерівності – індекс Тейла. Ентропія розподілу доходу H_T є показником невизначеності, одночасно характеризує і нерівність доходів, тобто чим менша нерівність, тим більше ентропія і навпаки. Ентропія розподілу суб'єктів H характеризує тільки невизначеність потрапляння суб'єктів у групи доходу, тобто чим рівномірніше розподілено населення по значеннях, інтервалах доходу, тим більш невизначеним стає положення суб'єктів у цьому сенсі, що вирівнюються ймовірності потрапляння в неможливі і заможні верстви населення.

Коефіцієнт Джині і ентропія. Розглянемо зв'язок між ентропією розподілу суб'єктів за доходом (H) та іншими популярними показниками нерівності – коефіцієнтом Джині, який належить до групи ентропійних, тому аналіз даного випадку має більш загальний характер. Для зручності використовуємо безперервну постановку.

Коефіцієнт Джині можна знайти за формулою

$$d = 1 - 2 \int_0^1 L(t) dt, \quad (13)$$

де $L(t)$ - функція Лоренца, яка виражає залежність між часткою населення t , $0 \leq t \leq 1$, і часткою, яку складає сумарний дохід цієї групи в загальному доході всього населення, $0 \leq L(t) \leq 1$.

Якщо відома функція щільності розподілу доходу $p(x)$, $0 \leq x \leq x_{max}$, то функцію Лоренца можна задати як функцію від доходу індивіда:

$$L(x) = \frac{\int_0^x tp(t) dt}{\int_0^{x_{max}} tp(t) dt} = \frac{1}{x} \int_0^x tp(t) dt, \quad (14)$$

де \bar{x} – середній дохід.

Через функцію розподілу доходу $F(x)$ вона виражається як

$$L(F) = \frac{\int_0^F x(F_1) dF_1}{\int_0^1 x(F_1) dF_1}, \quad (15)$$

де $x(F)$ – функція, зворотна до функції розподілу.

Продемонструємо зв'язок між коефіцієнтом Джині і функцією розподілу доходу на прикладі степеневого закону $F(x) = \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^\alpha$. Параметр $\alpha > 0$

дозволяє врахувати зрушення розподілу в бік заможних, спроможних, або незаможних, неспроможних, верств швидкісного пасажиропотоку. При $\alpha > 1$ графіки функцій знаходяться нижче прямої, їх умовно назвемо як розподіл заможних, спроможних, верств швидкісного пасажиропотоку, для яких низький дохід є менш імовірним. При $\alpha < 1$ – це розподіл незаможних, неспроможних, верств швидкісного пасажиропотоку, високий дохід для них є більш рідким явищем. Рівномірний розподіл, коли всі значення доходу є рівноймовірними, відбувається при $\alpha = 1$ (пряма на рис. 2).

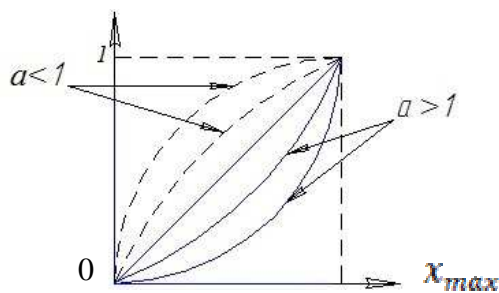


Рис. 2. Розподіл заможних, спроможних, і незаможних, неспроможних, верств швидкісного пасажиропотоку

Криві Лоренца $L(t) = t^{\frac{\alpha+1}{\alpha}}$ при різних значеннях параметра α , де t – частка населення, $0 \leq t \leq 1$, будуть розташовуватися під прямою, яка відповідає рівності доходів, – сторона заможних, спроможних, і незаможних, неспроможних, верств швидкісного пасажиропотоку (рис. 3). Коефіцієнт Джині залежить від параметра α $d = \frac{1}{2\alpha+1}$: при $\alpha \rightarrow \infty$ крива Лоренца наближається до бісектриси і коефіцієнт Джині прагне до 0; при $\alpha \rightarrow 0$ показник нерівності прагне до свого максимуму – 1 (рис. 3).

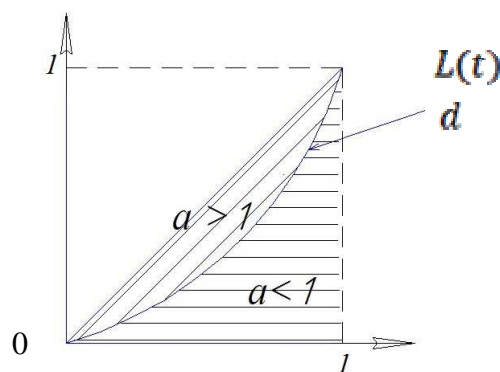


Рис. 3. Криві Лоренца, що характеризують ступінь нерівності в спільнотах спроможних і неспроможних верств швидкісного пасажиропотоку

При рівномірному розподілі доходу крива Лоренца має параболічний вигляд $L(t) = t^2$. Коефіцієнт Джині в цьому випадку дорівнює $1/3$. Вище цієї кривої розміщується розподіл заможних $\alpha > 1$, нижче – розподіл незаможних $\alpha < 1$. Таким чином, значення коефіцієнта від 0 до $1/3$ характеризують ступінь нерівності в спільнотах, де високе значення доходу є частішим явищем, тобто суспільство заможних, спроможних, верств пасажиропотоку, а значення від $1/3$ до 1 відповідає рівням нерівності в суспільстві незаможних, неспроможних верств пасажиропотоку, коли більш поширеними є низькі доходи (рис. 3). Показник ентропії для степеневі функції розподілу і відповідної їй функції щільності $p(x)$ буде мати вигляд

$$H(\alpha) = \ln(x_{max}) + 1 - \ln \alpha - \frac{1}{\alpha}.$$

При рівномірному розподілі доходу максимального значення $H^* = \ln(x_{max})$ ентропія набуває при $\alpha = 1$. При $\alpha < 1$ ентропія збільшується: кривим Лоренца, які знаходяться вище $L(t) = t^2$, відповідає значення ентропії, які виростають при наближенні до цієї кривої (рис. 4). Таким чином, зміна показників нерівності і ентропії в області розподілу заможних, спроможних, верств швидкісного пасажиропотоку має однонаправлений характер, тобто вони виростають з наближенням до рівномірного розподілу. При $\alpha > 1$ коефіцієнт Джині продовжує зростати, а ентропія, навпаки, зменшується. Інтерпретуючи ентропію як міру упорядкованості системи, отримуємо, що зрушення розподілу заможних в бік рівномірності розподілу, що означає підсилення нерівності, супроводжується і підсиленням невизначеності, неупорядкованості системи. Характеризується зменшенням невизначеності і підсиленням

упорядкованості системи, хоча і супроводжується зростанням нерівності подальше зрушення в бік незаможних, тобто деформація рівномірного розподілу в напрямку підвищення ймовірності більш низьких значень доходу (рис. 4).

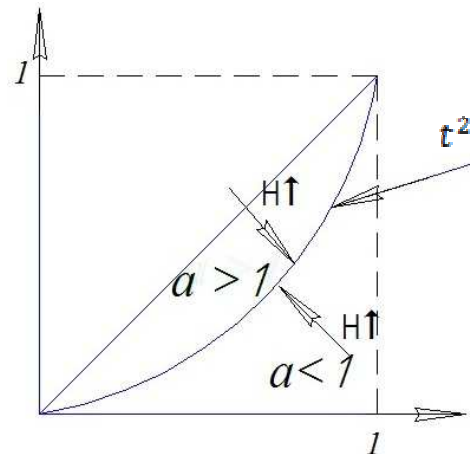


Рис. 4. Характеристики збільшення ентропії і зростання нерівності

Отже, будь-яке відхилення від рівномірного розподілу населення за доходом у відповідності з критерієм ентропії, що характеризується найбільшим безпорядком, є позитивним з точки зору підвищення підпорядкованості системи. Також ці зрушення нерівноцінні з точки зору нерівності, вимірюваної коефіцієнтом Джині.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Для розрахунку кореспонденцій потоків в умовах залізничного швидкісного пасажирського сполучення запропоновано математичну модель прогнозування кореспонденцій на основі ентропії, яка, на відміну від існуючих, дозволяє отримати інтервальні оцінки обсягів пасажиропотоків, що в подальшому надасть можливість проводити більш точні розрахунки щодо економічної доцільності реалізації інноваційних проектів підвищення швидкості руху на залізничному транспорті. Не зважаючи на те, що пасажиропотік складають в

основному заможні верстви населення, тобто бізнесмени і туристи, у 2015 році населеність швидкісних поїздів порівняно з

минулим роком зросла, що вказує на доцільність та ефективність швидкісних залізничних пасажирських перевезень.

Список використаних джерел

1. Прохорченко, А. В. Розроблення раціональної топології мережі швидкісних залізничних пасажирських перевезень на основі методів колективного інтелекту [Текст] / А.В. Прохорченко, Л.О. Пархоменко, А.І. Дудчак, Є.О. Сільченко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 133. – С. 39-45.
2. Бутько, Т. В. Формування моделі розвитку транспортної системи швидкісних залізничних пасажирських перевезень на основі інтелектуальних технологій [Текст] / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Л.О. Пархоменко // Тези доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (Дніпропетровськ, 17-18 листопада 2012 р.). – Дніпропетровськ: ДНУЖТ, 2012. – С. 16-17.
3. Helbing, D., Keltsch, J., Molnár, P., Modeling the evolution of human trail systems. Nature, 1997. – 388. – 47 p.
4. Блохин, Е. П. Высокоскоростной наземный транспорт мира [Текст] / Е.П. Блохин, О.М. Пшинько; Днепрпетровский нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепрпетровск: Изд-во ДУЖТ, 2009. – 74 с.
5. Блохин, Е. П. Высокоскоростные железнодорожные системы Европы [Текст] / Е.П. Блохин // Железные дороги мира. - 2007. - № 7. - С. 17-21.
6. Вильсон, А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем [Текст] / А.Дж. Вильсон. – М.: Наука, 1978. – С. 10.
7. Статистичні дані на поїзди «інтерсіті+» ОДБ ВП «Вокзал ст.Львів» ДТГО «Львівська залізниця».
8. Theil H/ Economics and information theory / H. Theil – Amsterdam: North-Holland, 1967. – 488 p.
9. Cowell F. Measuring Inequality / Cowell F., Philip A. – Oxford, UK, 1977.

Рецензент д-р техн. наук, професор Т. В. Бутько

Дудчак Андрій Ількович, магістр Українського державного університету залізничного транспорту.
Тел.: 730-10-85.

Dudchak Andriy, master of a Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: 730-10-85.

Стаття прийнята 26.08.2016 р.