

УДК 656.223

ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПРЯМУВАННЯ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ

Канд. техн. наук Д. В. Константинов, студентка І. Ю. Невидюк,
магістрант Р. М. Островерх

ФОРМИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ СЛЕДОВАНИЯ Поездов НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ

Канд. техн. наук Д. В. Константинов, студентка І. Ю. Невидюк,
магістрант Р. Н. Островерх

FORMATION OF RATIONAL ROUTES FOR TRAINS ON THE RAILWAYS OF UKRAINE

Cand. of techn. sciences D. V. Konstantinov, student I. Y. Nevidyuk,
master student R. N. Ostroverh

У роботі було розглянуто питання про раціональну організацію маршрутів прямування поїздів на залізницях України. Запропоновано удосконалення моделі системи підтримки прийняття рішень на основі використання нейро-нечіткого моделювання та генетичного алгоритму, призначеної для формування маршрутів прямування. На основі удосконаленої моделі можливе створення автоматизованої системи управління формуванням оптимальних маршрутів прямування пасажирських і вантажних поїздів.

Ключові слова: маршрут, залізниця, перевезення, моделювання, автоматизація.

В работе был рассмотрен вопрос про рациональную организацию маршрутов следования поездов на железных дорогах Украины. Предложено усовершенствование модели системы поддержки принятия решений на основе использования нейро-нечеткого моделирования и генетического алгоритма, предназначенной для формирования маршрутов следования. На основе усовершенствованной модели возможно создание автоматизированной системы управления формированием оптимальных маршрутов следования пассажирских и грузовых поездов.

Ключевые слова: маршрут, железная дорога, перевозки, моделирование, автоматизация.

The paper examined the rational organization of routes for movement passenger and freight trains on the railways of Ukraine. In modern conditions in rail-based passenger and freight traffic are not effective transportation process technologies that limit the ability of the transport sector to respond flexibly to fluctuations in consumer demand and the market of passenger transportation.

Therefore, to reduce the loss of transportation is necessary to use organizational technologies, which are based on the concept of flexible adaptive regulation of the transportation process and long-term operational nature in accordance with the principles of logistics. It is possible to implement by creating a common model of transportation, whose task will be to develop a route based on collecting accounting data on time spent on processing stations and the time required to pass driving of each individual based on their capacity. There was offered an improving for model of decision support system based on the use of neuro-fuzzy modeling and genetic algorithm designed to create a route. Based on the improved model there is possible creation of automated formation system of optimum routes for passenger and freight trains.

Keywords: route, railway, transportation, modeling, automation.

Вступ. В сучасних умовах в основі залізничних перевезень лежать недостатньо ефективні технології перевізного процесу, які обмежують здатність залізнично-транспортного комплексу гнучко реагувати на коливання попиту споживачів ринку перевезень. Виходячи з цього для зниження збитковості перевезень необхідним є застосування організаційних технологій, в основу яких покладені концепції гнучкого адаптивного регулювання перевізного процесу оперативного та довгострокового характеру відповідно до принципів логістики.

За останні п'ять років українські залізниці отримали збитків тільки від пасажирських перевезень близько 30 млрд грн. Головними причинами цього є застарілий рухомий склад, малі швидкості руху, низькі показники населеності та пасажиропотоків на фоні високих експлуатаційних витрат, що постійно зростають. Єдиним шляхом підтримки пасажирських перевезень і компенсації їх збитків в сучасних умовах розвитку залишається перехресне фінансування пасажирського господарства за рахунок значних прибутків від вантажних перевезень. Однак така система господарювання є неефективною і призводить до суттєвого стримування розвитку залізнично-транспортного комплексу в цілому. Отже, потрібно шукати нові шляхи зниження витрат на організацію пасажирських та вантажних перевезень.

Згідно з Концепцією Державної програми реформування залізничного транспорту від 27 грудня 2006 р. № 651-р

та Програмою реструктуризації галузі одним із основних напрямків розвитку організації пасажирських перевезень є формування та подальше удосконалення гнучких технологій управління перевізним процесом, що є одним з напрямків розв'язання проблеми значної збитковості та покращення ресурсозбереження [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запропоновані раніше в [2,3] моделі формування раціональних маршрутів прямування поїздів можуть бути ефективно використані для удосконалення системи організації маршрутів як у пасажирських, так і вантажних перевезеннях різних сполучень. Але для взаємного узгодження процесів моделювання та можливості їх практичної реалізації виникає потреба долучити їх роботу до єдиної інтеграційної системи адаптивного управління. Це можливо здійснити через створення загальної моделі організації маршрутів прямування, завданням якої буде розробка оптимальних маршрутів на основі збору звітних даних щодо регульовальної роботи на станціях та аналізу можливих варіантів вибору напрямків прямування з метою прискорення просування поїздів по залізницях. Результатом роботи такої системи буде створення найбільш економічно та технологічно доцільних маршрутів прямування поїздів, що дозволить надати системам пасажирських і вантажних перевезень гнучкості і здатності до адаптації у змінних умовах роботи, які обумовлюються постійним коливанням

попиту. Розробку такої системи доцільно реалізувати на основі використання генетичного алгоритму та нейро-нечіткого моделювання [2, 3].

Одним з важливих завдань удосконалення транспортної системи швидкісних пасажирських перевезень на залізницях України є визначення раціонального напрямку розвитку залізничної мережі високошвидкісних і швидкісних перевезень на основі аналізу світового досвіду функціонування ринку швидкісних перевезень. Подане у [4] теоретичне обґрунтування раціональної топології мережі швидкісних залізничних перевезень може бути покладене в основу формування перспективної мережі маршрутів швидкісних міжрегіональних поїздів. Відповідно до [5, 6] розвиток мереж швидкісних міжрегіональних перевезень на залізницях розвинених країн Європи є одним з найбільш пріоритетних напрямків надання транспортних послуг в сфері пасажирських перевезень, який при якісній організації в умовах використання сучасних транспортних технологій та інфраструктури має величезний фінансовий успіх і привабливість для вибагливих потреб сучасних пасажирів. В сфері вантажних перевезень з досвіду сучасних залізничних мереж розвинених країн світу [7] та відповідно до вітчизняних програм розвитку питання прискорення просування вантажних поїздів також порушується дуже гостро. Особливо це спостерігається в сфері міжнародних перевезень стосовно просування іноземних вагонів по залізницях України.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є формування моделі визначення оптимальних маршрутів прискореного

просування поїздів різних категорій на основі математичних апаратів нечіткої логіки, нейронних мереж та генетичного алгоритму з використанням досвіду моделювання в [2,3]. Завданням дослідження є взаємне функціональне поєднання структур моделей для отримання комплексної моделі, що може бути в перспективі основою системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Основна частина дослідження. Моделювання маршрутів прискореного прямування поїздів полягає в пошуку оптимальних варіантів їх курсування в межах певної мережі, моделлю якої може бути зважений граф $G(v,r)$, де вагами ребер є гени h_{ij}^k [3]. Завдання пошуку оптимального маршруту курсування поїзда в межах певної мережі полягає у знаходженні деякої сукупності дільниць прямування поїзда від i -х станцій відправлення до j -х станцій призначення, послідовне проходження яких поїздом формує загальний маршрут, який порівняно з іншими варіантами є більш ефективним відносно критерію оптимізації, враховуючи, що станції i та j є станціями зупинки поїздів на певних напрямках. Тому, враховуючи необхідність формування генотипу (набору оптимальних маршрутів) певної мережі в умовах моделювання на основі генетичного алгоритму відповідно до завдання пошуку певної оптимальної комбінації дільниць в маршруті, доцільно подати як хромосому деякий маршрут, що складається з певної сукупності дільниць $i-j$ залізничного вузла, де кожний ген відповідно моделює дільницю прямування між певною парою станцій $i-j$. Структуру хромосоми подано у вигляді

$$H = \sum_{i,j=1}^v h_{ij} \in \{h_{ij}^1, h_{ij}^2, \dots, h_{ij}^k, h_{ij}^{k+1}, \dots, h_{ij}^m\} \quad h_{ij}^k = \begin{cases} 1 - \text{можливий} \\ 0 - \text{неможливий} \end{cases}, \quad (1)$$

де v – кількість станцій у вузлі, що моделюється;

h_{ij}^k – ген, що моделює певний варіант слідування від станції відправлення i до станції призначення j і набуває значення 1 або 0;

m – загальна кількість генів у певному маршруті;

k – певний ген маршруту із загальної сукупності m , $k \in m$.

Отже, генотипом графу $G(R)$ буде набір хромосом $H \in \{h_{ij}^1, h_{ij}^2, \dots, h_{ij}^k\}$, кожна з яких відповідно моделює один певний маршрут для певного поїзда. Водночас гени в кожному певному маршруті розташовуються іншим чином, моделюючи іншу послідовність дільниць прямування у маршруті [3].

Початковим етапом розв'язання завдання пошуку оптимальної комбінації в моделі генетичного алгоритму є формування вихідної популяції, що здійснюється шляхом випадкового перебору та розстановки генів і їх значень в заданій сукупності хромосом з поданням їх як двійникової послідовності фіксованої довжини. Кожен ген в хромосомі моделює певну дільницю прямування від станції відправлення i до станції призначення j та може набувати значень 1 або 0. Таким чином, в комбінації генів кожної хромосоми подано певний маршрут прямування, гени якого розташовуються послідовно згідно з порядком прямування дільницями маршруту [3].

Оцінювання пристосованості хромосом в популяції або вибір найкращих варіантів здійснюється для кожної хромосоми вихідної популяції за допомогою фітнес-функції. Завдання пошуку оптимального маршруту прискореного прямування полягає у визначенні варіанта з мінімальними витратами часу, що вказує на необхідність спрямування задачі фітнес-функції до пошуку мінімального рішення.

Однак необхідно врахувати деякі особливості формування маршрутів в умовах використання генетичного алгоритму, що є основою системи обмежень:

1. Кінцева станція прибуття j в останньому гені h_{ij}^m певної хромосоми-маршруту має збігатись з початковою станцією відправлення i в першому гені h_{ij}^1 наступної хромосоми-маршруту, що забезпечує можливість формування як послідовних маршрутів, так і замкнених, що особливо актуально для пасажирських перевезень.

2. В межах певної хромосоми-маршруту станція відправлення i кожного наступного гена h_{ij}^{k+1} має збігатись зі станцією прибуття j кожного попереднього гена h_{ij}^k .

3. Сумарна довжина дільниць прямування обраних генів кожної хромосоми-маршруту $\sum_{i,j=1}^n l_{ij}^k h_{ij}^k$ не повинна перевищувати максимальну відстань руху між двома суміжними технічними операціями ТО-2 з рухомим складом – L_{\max}^{TO-2} .

4. Сумарний час прямування по i - j дільницях обраних генів, згідно з хромосомою-маршрутом $\sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k$, не повинен перевищувати тривалості прямування до встановленого графіком руху поїздів пункту зміни локомотивних бригад $T_{\max}^{лб}$.

Визначені умови формують систему обмежень, яка має бути закладена в фітнес-функцію і потребує її структуризації. Ці умови є основою для обмеження сукупності змодельованих маршрутів через перевірку їх виконання та відсіювання тих, що її не пройшли, тобто найменш пристосованих хромосом [3].

$$FH(H) = \begin{cases} \min, \text{ якщо } i \in h_{ij}^1 = j \in h_{ij}^{1+m} \text{ та } j \in h_{ij}^k = i \in h_{ij}^{k+1} \text{ при } h_{ij}^k = 1, \\ \max \text{ в іншому випадку} \end{cases}, \quad (2)$$

$$FF2(H) = \begin{cases} \min, \text{ якщо } \sum_{i,j=1}^n l_{ij}^k h_{ij}^k \leq L_{\max}^{TO-2} \text{ та } \sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k \leq T_{\max}^{лб} \text{ при } h_{ij}^k = 1 \\ \max \text{ в іншому випадку} \end{cases}. \quad (3)$$

Завданням моделювання є пошук оптимального маршруту з сукупності змодельованих випадковим чином і перевірених в системі обмежень згідно з (2) та (3). Критерієм пошуку є мінімальні сумарні витрати від прямування за закладеним в хромосомі маршрутом, що складаються з суми витрат на прямування по кожній дільниці відповідно до обраних генів

$$FF3(H) = \min \sum_{i,j=1}^n t_{ij}^k h_{ij}^k, \quad (4)$$

де t_{ij}^k – рівень витрат часу на прямування, згідно з геном h_{ij}^k , що визначається витратами часу на обробку по станції

відправлення $t_{обр}^n$ та витратами часу на прямування між станціями t_{ij}^n по певній дільниці n .

$$t_{ij}^k = x_{ij}^n (t_{обр}^n + t_{ij}^n), \quad (5)$$

де x_{ij}^n – параметр, що визначає рівень ефективності відправлення поїзда на n -ну дільницю за результатом моделювання, згідно з [2], і визначається як

$$x_{ij}^n = \frac{100\% - X}{100\%}, \quad (6)$$

де X – відповідно до [2] відповідає задачі визначення рівня доцільності відправлення міжрегіонального поїзда на n -й напрям.

$$X = (\Delta N^{AB}, t_{ij}^{AB}) \rightarrow D \in \{d_1, d_2, \dots, d_k\}, \quad (7)$$

де d_1 – доцільність призначення 90-99,9 %;
 d_2 – доцільність призначення 80-89,9 %;
 d_3 – доцільність призначення 70-79,9 %;
 d_4 – доцільність призначення 60-69,9 %;
 d_5 – доцільність призначення 50-59,9 %.
 d_6 – доцільність призначення 40-49,9 %;
 d_7 – доцільність призначення 30-39,9 %;
 d_8 – доцільність призначення 20-29,9 %;
 d_9 – доцільність призначення 10-19,9 %;
 d_{10} – доцільність призначення 0,1-9,99 %.

Обчислення значення параметра X здійснюється за результатом роботи нейро-нечіткої моделі, структура якої аналогічна поданій у [2].

Таким чином, оцінювання здатності до пристосування хромосом в популяції здійснюється через перевірку їх на виконання трьох зазначених умов. Отже, фітнес-функція має складатися з трьох частин, кожна з яких здійснює обчислення значення виконання певної вимоги згідно з (2), (3) та (4). Тому загальний розв'язок, що містить суму значень відповідно до кожної умови, спрямовується на пошук найменшої величини

$$FF(H) = (FF1(H) + FF2(H) + FF3(H)) \Rightarrow \min . \quad (8)$$

Якщо відомо або задано мінімальне значення функції пристосованості, зупинка алгоритму може бути здійснена після досягнення цього значення, що буде означати знаходження оптимального рішення. Знаходження на даному етапі оптимального розв'язку, що відповідає найменшим витратам на прямування певним маршрутом, є завершенням роботи моделі генетичного алгоритму з огляду на виділення найкращої хромосоми.

Якщо ж у сукупності отриманих розв'язків жоден не відповідає оптимальному значенню, наступним етапом моделювання є селекція хромосом, після чого до хромосом, відібраних за допомогою селекції, застосовуються генетичні оператори. Хромосоми, отримані в результаті використання генетичних операторів до тимчасової батьківської популяції, входять до складу нової початкової популяції, яка бере участь у новій ітерації генетичного алгоритму, для якої знову здійснюється оцінювання здатності до пристосування хромосом в популяції. Поданий цикл операцій

повторюється доти, поки не буде знайдено хромосому з найкращим значенням фітнес-функції. Результатом розв'язання завдання пошуку оптимального маршруту є знаходження хромосоми з мінімальним значенням $FF(H)$ відносно інших та прокладання маршруту прямування відповідно до її набору генів.

Для навчання нейро-нечіткої мережі в роботі було сформовано навчальну вибірку із 90 експериментальних даних у вигляді $\langle \text{вхід } (\Delta N^{AB}, t_{ij}^{AB}) - \text{вихід } (d) \rangle$. Мінімум похибки навчання складає 0,35221% та досягається в районі 84-ї ітерації алгоритму. Після 84-ї ітерації похибка стає сталою, що вказує на втрату моделлю властивостей узагальнення (рис. 1).

Перевіркою на адекватність моделі є проведення її тестування на тестовій вибірці. На рис. 2 подано результати тестування моделі після навчання у вигляді ступеня точності потрапляння значення виходу до області певного варіанта розв'язку.

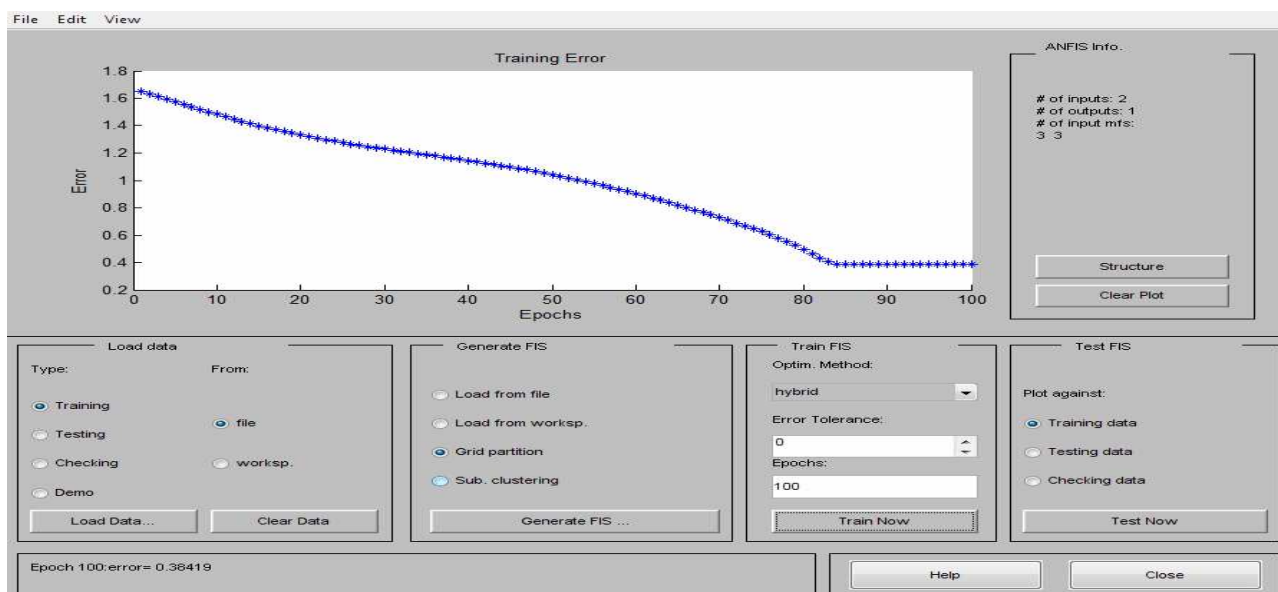


Рис. 1. Крива навчання моделі

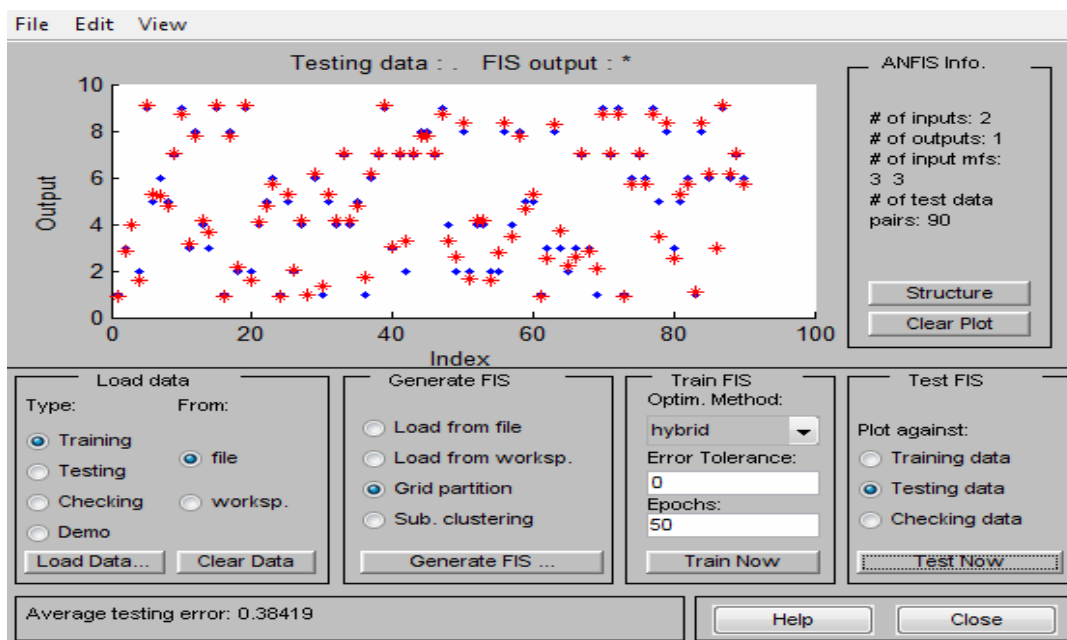


Рис. 2. Результати тестування моделі

Аналіз результатів тестування вказує на досить високий рівень точності роботи тренованої моделі, мінімальний рівень похибки якої не перевищує 0,35 %, а загальний – 5 %. Висока точність роботи зберігається приблизно близько 42 ітерацій, після чого спостерігається втрата точності в певних варіантах розв’язання, що потребує подальшого навчання моделі на нових даних.

Висновки. Реалізація на основі запропонованої моделі системи підтримки прийняття рішень для використання на

рівні оперативно-розпорядчого відділу служби перевезень управління залізниці дозволить автоматизувати процес формування маршрутів та удосконалити діючі графіки руху та обороту. В умовах використання нових зразків швидкісного рухомого складу в системі пасажирських перевезень та необхідності прискорення просування вантажних поїздів це надасть можливість знизити експлуатаційні витрати та реалізувати перспективну систему організації руху на основі принципів логістики.

Список використаних джерел

1. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту від 27 грудня 2006 р. N 651-р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uz.gov.ua/>.
2. Константинов, Д. В. Удосконалення процесу просування міжнародних транзитних поїздів залізницями України [Текст] / Д. В. Константинов, І. В. Чорна // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 140. – С. 23-30.
3. Константинов, Д. В. Удосконалення організації маршрутів прямування приміських пасажирських поїздів на залізницях України [Текст] / Д. В. Константинов, Д. О. Бурлакова // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 131. – С. 149-157.
4. Формування моделі розвитку залізничної системи швидкісних перевезень на основі принципів самоорганізації [Текст] / Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко, Л. О. Пархоменко [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": зб. наук. праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2011. – № 54. – С. 67-70.

5. Fröidh, O. Competition on the tracks – Passengers’ response to deregulation of interregional rail services [Text] / Oscar Fröidh, Camilla Byström // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – October 2013. – Volume 56. – P. 1–10.

6. Fröidh, O. The impact of market opening on the supply of interregional train services [Text] / Oscar Fröidh, Bo-Lennart Nelldal // *Journal of Transport Geography*. – June 2015. – Vol. 46. – P. 189–200.

7. Murali, P. Modeling strategies for effectively routing freight trains through complex networks [Text] / Pavankumar Murali, Fernando Ordóñez, Maged M. Dessouky // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – September 2016. – Vol. 70. – P. 197-213.

Константинов Денис Володимирович, канд. техн. наук, кафедра управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-88.

E-mail: kdv1984@ukr.net.

Невидюк Інна Юріївна, студентка групи 25-VI-ОПУТм Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 0639487709. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Островерх Роман Миколаєвич, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 0930620236. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Konstantinov Denis Volodimirovich, cand. of techn. sciences, Department of operational work Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-88. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Nevidyuk Inna Yuriiivna, student of group 25-VI-OPUTm Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 0639487709. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Ostroverh Roman Mikolayevich, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 0930620236. E-mail: kdv1984@ukr.net.

Стаття прийнята 13.11.2017 р.