

УДК 656.027(477)

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОРГАНІЗАЦІЇ ШВИДКІСНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ПЕРЕСАДОК

Канд. техн. наук О. Е. Шандер, магістрант А. М. Леміш

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗАЦИИ СКОРОСТНЫХ ПАСАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСАДОК

Канд. техн. наук О. Э. Шандер, магистрант А. Н. Лемиш

IMPROVING THE PROCESS OF ORGANIZATION OF SPEED PASSENGER TRANSPORT IN CONDITIONS OF TRANSFER

Ph.D. Candidate of Technical Sciences O. Shander, master A. Lemish

В роботі розглядаються питання щодо удосконалення процесу організації швидкісних пасажирських перевезень, а саме використання нового методу в розробленні плану формування пасажирських поїздів у дальньому та місцевому сполученнях з урахуванням пересадок на залізничних вокзалах на основі методу рою часток. Визначено, що перевагою відповідного методу є висока швидкість знаходження рішення для транспортної мережі великої розмірності.

Ключові слова: пасажирські перевезення, метод оптимізації, моделювання пасажиропотоків.

В работе рассматриваются вопросы совершенствования процесса организации скоростных пассажирских перевозок, а именно использование нового метода в разработке плана формирования пассажирских поездов в дальнем и местном сообщениях с учетом пересадок на железнодорожных вокзалах на основе метода роя частиц. Определено, что преимуществом соответствующего метода является высокая скорость нахождения решения для транспортной сети большой размерности.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, метод оптимизации, моделирование пассажиропотоков.

The paper considers the issues of improving the process of organization of high-speed passenger transportation, namely the use of a new method in developing a plan for the formation of passenger trains in long-distance and local traffic, taking into account transfers at railway stations. A mathematical model is formed that formalizes the technological process of organizing high-speed passenger transportation in the form of an optimization task with a target function, which reflects the total cost of passenger transportation with transfers and a system of constraints. These studies are aimed at determining the optimal allocation of passenger traffic for the purpose of passenger trains and operational adjustment of the plan for the formation of passenger trains. To solve the problem, it is proposed to use a mathematical apparatus based on the method of fractional particles. It is determined that the advantage of the corresponding method is the high speed of finding a solution for a transport network of large dimension.

Keywords: passenger transportation, method of optimization, modeling of passenger traffic.

Вступ. Сучасні світові ринкові умови формують для залізничного транспорту нові стандарти на ринку транспортних послуг, що полягають в підвищенні швидкості перевезення та наданні якісних послуг.

В умовах жорсткої конкуренції на транспортному ринку частка залізничних пасажирських перевезень в пасажирообігу всіх видів транспорту становить понад 44,4 % і з кожним роком поступово зменшується. Провідну роль залізничних пасажирських перевезень визначають регулярність і універсальність перевезень незалежно від пори року і кліматичних умов, розгалужена мережа залізниць і їх високі провізні можливості.

В основі здійснення залізничних пасажирських перевезень лежать незмінні протягом кількох десятиріч технології перевізного процесу, які обмежують здатність пасажирського комплексу гнучко реагувати на умови функціонування ринку пасажирських перевезень і на вимоги споживачів, які постійно змінюються, а через це з кожним роком залізниця втрачає своїх пасажирів. Зважаючи на це, для зниження збитковості пасажирських перевезень та підвищення рівня оперативного реагування в дальньому та місцевому сполученнях необхідно застосовувати організаційні технології, в основу яких покладені концепції, що відповідають вимогам змінної основи організації пасажирських перевезень [1,3].

Одним із основних напрямків удосконалення пасажирських перевезень є впровадження швидкісного руху, що, як наслідок, передбачає організацію швидкісних сполучень між вузлами так званими хабами (англ. hub) у всіх регіонах країни та перевезення на коротких плечах в зоні тяжіння хабів. За таких умов потрібно розв'язати завдання організації швидкісних пасажирських перевезень в умовах пересадок та формування нових підходів до розроблення плану формування пасажирських поїздів (ПФПП).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показав аналіз, при розробленні графіка руху пасажирських поїздів майже не враховуються варіанти проїзду пасажирів з пересадкою [1]. Ув'язка розкладів прибуття і відправлення поїздів для здійснення пересадки виконується тільки для незначної кількості поїздів. При запізненні пасажирського поїзда інформації у диспетчерського персоналу, що такий поїзд для пасажирів є погодженим, немає, а отже, якщо пасажир не заявить про себе провіднику вагона (машиністу) і, зі свого боку, – той поїзному диспетчеру, ув'язки часу прибуття та затримки відправлення погодженого поїзда не відбудеться. Проведеним аналізом доведено, що попередні дослідження в напрямку розв'язання завдання планування перевезень з пересадками на мережевому рівні ґрунтувались на значних спрощеннях в його постановці і навіть за таких умов довели практичну складність розв'язання для полігона великої розмірності [3,4]. Таким чином, набуває актуальності розв'язання завдання організації швидкісних пасажирських перевезень в умовах залізничних пересадочних комплексів на рівнях плану формування пасажирських поїздів [5-7].

Досвід європейських країн показує, що подорож з пересадкою є найнеефективнішою і тому виникає завдання розрахунку ПФПП за допомогою математичних методів для всієї мережі з можливістю впровадження у виробництво, що дозволить раціонально формувати систему організації пасажирських перевезень [8,9].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даної роботи є удосконалення процесу організації залізничних швидкісних пасажирських перевезень в умовах пересадок при використанні нового методу в розробленні плану формування пасажирських поїздів на основі методу рою часток. Завданням дослідження є визначення оптимального розподілу пасажиропотоку за призначенням пасажирських

поїздів на основі корегування плану формування пасажирських поїздів.

Основна частина дослідження. Для розв'язання питання щодо визначення станцій пересадки пасажиропотоків та категорій пасажирських поїздів, для яких слід передбачити в графіку руху ув'язку часу прибуття та відправлення, запропоновано використати дослідження в галузі нових методів оптимізації. Проведеним аналізом було доведено, що попередні дослідження в напрямку розв'язання поставленого завдання показали практичну складність розв'язання для полігона великої розмірності. Згадане завдання є задачею оптимізації розподілу потоків в багатопродуктових мережах, яка відноситься до NP-складних задач і має комбінаторний характер.

Метод оптимізації на основі рою часток [2] довів, що цей метод на відміну від симплекс-методу та генетичного алгоритму досягає кращих результатів при розв'язанні задач великої розмірності за рахунок кращої швидкості збіжності, якості розв'язання і стабільності процедури пошуку. При реалізації даного методу використовується парадигма агентно-орієнтованого програмування, що сприяє підвищенню продуктивності обчислень та спрощується програмна реалізація.

Для розв'язання завдання розробки ПФПП для мережі великої розмірності в роботі запропоновано використати розроблену математичну модель з цільовою функцією, що відображає загальну вартість перевезень пасажирів з пересадками такого вигляду:

$$F_1 = \sum_r \left[\sum_k c_k^{(t_{int}=1)} x_k^r + \sum_j b_j^E x_k^r \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

та обмеженнями

$$\sum_i x_{i,j}^r - \sum_k x_{j,k}^r = \begin{cases} -f_{st}, & \text{якщо } j = s, \\ 0, & \text{якщо } j \neq s, t, \\ f_{st}, & \text{якщо } j = t, \end{cases} \quad (2)$$

$$f_r = \sum_{l=1}^L f_k^{r,l}, \quad (3)$$

$$\sum_r |f_{r,k}| \leq y_k, \quad (4)$$

$$\sum_r x_{rj} \leq P_j, \quad (5)$$

де c_k – вартість перевезення одиниці потоку на k -му призначенні пасажирських поїздів, що курсують на момент розрахунку; t – інтервал стаціонарності в межах планового періоду T ; x_k^r – число пасажирів r -го потоку, що подорожують в поїзді k -го призначення; b_j^E – вартість пересадки одиниці пасажиропотоку через

пересадочний комплекс E_j ; f_{st} – величина інтенсивності пасажиропотоку із джерела E_s ($s = \overline{1, q}$) у стік E_t ($t = \overline{1, q'}$), що відповідає занумерованому r -му потоку; $f_k^{r,l}$ – частка потоку r , що прямує по дузі k (призначенні) за l -м маршрутом; y_k – число місць в поїздах k -го призна-

чення; $\sum x_{rj}$ – величина потоку, що проходить через j -й пересадочний комплекс, $\sum x_{rj} = x_j$, пас/доб; P_j – максимальна пропускна здатність j -го пересадочного комплексу, пас/доб.

Задано залізничну мережу у вигляді орієнтованого графу G' [1]. Граф складається з 14 вершин та 29 ребер. Всі вершини графу знаходяться на умовному полігоні. Даний фізичний граф мережі зображений на рис. 1, а його вектор позиції частки буде мати вигляд

$$X_i = \begin{pmatrix} x_{11}^{i1} & x_{12}^{i2} & x_{13}^{i3} & x_{14}^{i4} & x_{15}^{i5} & x_{16}^{i6} & x_{17}^{i7} & x_{18}^{i8} & x_{19}^{i9} & x_{110}^{i10} & x_{111}^{i11} & x_{112}^{i12} & x_{113}^{i13} & x_{114}^{i14} & x_{115}^{i15} & x_{116}^{i16} & x_{117}^{i17} & x_{118}^{i18} & x_{119}^{i19} & x_{120}^{i20} & x_{121}^{i21} & x_{122}^{i22} & x_{123}^{i23} & x_{124}^{i24} & x_{125}^{i25} & x_{126}^{i26} & x_{127}^{i27} & x_{128}^{i28} & x_{129}^{i29} \\ x_{21}^{i1} & x_{22}^{i2} & x_{23}^{i3} & x_{24}^{i4} & x_{25}^{i5} & x_{26}^{i6} & x_{27}^{i7} & x_{28}^{i8} & x_{29}^{i9} & x_{210}^{i10} & x_{211}^{i11} & x_{212}^{i12} & x_{213}^{i13} & x_{214}^{i14} & x_{215}^{i15} & x_{216}^{i16} & x_{217}^{i17} & x_{218}^{i18} & x_{219}^{i19} & x_{220}^{i20} & x_{221}^{i21} & x_{222}^{i22} & x_{223}^{i23} & x_{224}^{i24} & x_{225}^{i25} & x_{226}^{i26} & x_{227}^{i27} & x_{228}^{i28} & x_{229}^{i29} \\ x_{31}^{i1} & x_{32}^{i2} & x_{33}^{i3} & x_{34}^{i4} & x_{35}^{i5} & x_{36}^{i6} & x_{37}^{i7} & x_{38}^{i8} & x_{39}^{i9} & x_{310}^{i10} & x_{311}^{i11} & x_{312}^{i12} & x_{313}^{i13} & x_{314}^{i14} & x_{315}^{i15} & x_{316}^{i16} & x_{317}^{i17} & x_{318}^{i18} & x_{319}^{i19} & x_{320}^{i20} & x_{321}^{i21} & x_{322}^{i22} & x_{323}^{i23} & x_{324}^{i24} & x_{325}^{i25} & x_{326}^{i26} & x_{327}^{i27} & x_{328}^{i28} & x_{329}^{i29} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

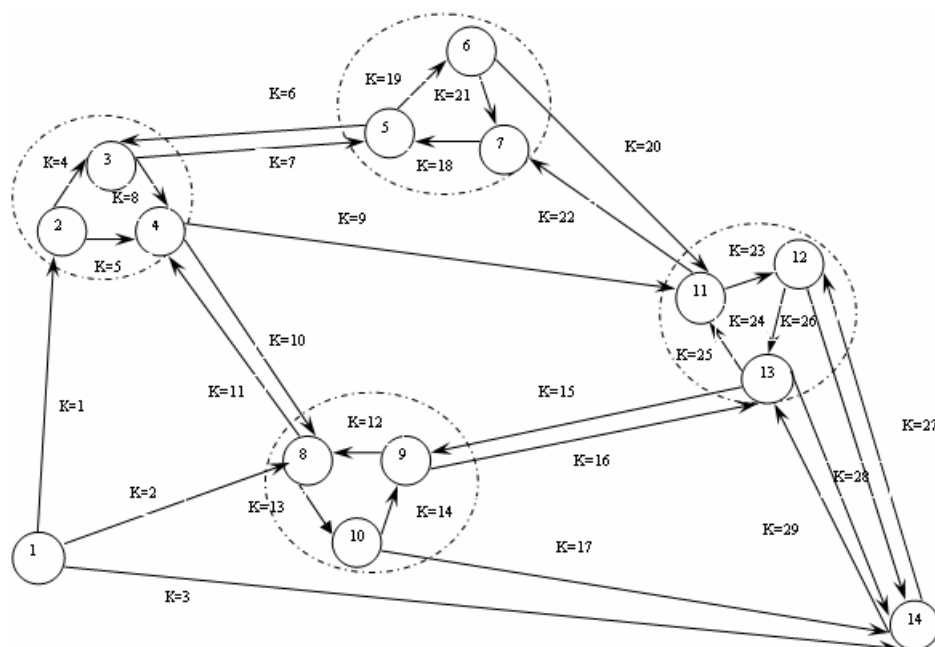


Рис. 1. Фізичний граф мережі G'

Для обліку обмежень на пропускні здатності дуг мережі в роботі запропоновано для кожної з компонентів вектора позицій встановити межі їх значень в просторі пошуку. Прийемо, що величина потоку логічного графу G' встановлюється вектором $u = [u_1, u_2, u_r, \dots, u_q] = [90, 20, 25]$, де кожний компонент відповідає заданій

величині r -го потоку пасажирів. Максимальна пропускна здатність описується вектором $y = [y_1, y_2, y_k, \dots, y_K] = [45, 90, 45, 20, 25, 20, 17, 17, 17, 40, 6, 7, 130, 60, 70, 7, 60, 17, 20, 20, 0, 16, 30, 10, 16, 30, 14, 70, 20]$, де кожна компонента відповідає величині пропускної здатності k -ї дуги графу мережі G' . Вектор позиції частки з обмеженнями на значення кожної компоненти буде мати вигляд

$$X_t^i = \left(\begin{matrix} x_{11}^{i1} x_{12}^{i2} x_{13}^{i3} x_{14}^{i4} x_{15}^{i5} x_{16}^{i6} x_{17}^{i7} x_{18}^{i8} x_{19}^{i9} x_{20}^{i10} x_{21}^{i11} x_{22}^{i12} x_{23}^{i13} x_{24}^{i14} x_{25}^{i15} x_{26}^{i16} x_{27}^{i17} x_{28}^{i18} \\ x_{18}^{i29} x_{19}^{i27} x_{20}^{i25} x_{21}^{i24} x_{22}^{i22} x_{23}^{i18} x_{24}^{i16} x_{25}^{i12} x_{26}^{i11} x_{27}^{i7} x_{28}^{i8} x_{18}^{i29} x_{19}^{i27} x_{20}^{i25} x_{21}^{i24} x_{22}^{i22} x_{23}^{i18} x_{24}^{i16} x_{25}^{i12} x_{26}^{i11} x_{27}^{i7} x_{28}^{i8} \end{matrix} \right) \quad (7)$$

Враховуючи, що система рою часток є методом безумовної оптимізації, в роботі для обліку обмежень нерівностей на провізні здатності дуг (можливих призначень пасажирських поїздів) запропоновано застосувати штрафні функції вигляду

$$g(x) \leq 0 \Leftrightarrow g(x) + |g(x)| = 0, \\ h_e(x) = g(x) + |g(x)|, e = \overline{1, B}. \quad (8)$$

Для спрощення розрахунків запропоновано здійснити запис обмежень у матричній формі. Так, для ув'язки розмірності вектора позиції частки з кількістю призначень пасажирських поїздів в мережі необхідно записати матрицю інциденцій A "призначення – змінні параметри задачі" розмірністю $K \times n_x$ [2]. Для фізичного графу мережі G' (рис. 1) та вектора позицій частки (б) матриця A має розмірність (29×36) .

Тоді обмеження (4) можна записати в матричній формі $AX_t^i \leq y$ або $AX_t^i - y \leq 0$, де $g(x) = AX_t^i - y$. Тоді, згідно з (8), можна записати $h_1(x) = AX_t^i - y + |AX_t^i - y| = 0$.

Обмеження рівності задачі в роботі запропоновано подати у вигляді

$$g_3(x) = Aeq^{(s)} X_r^i = u_r \Leftrightarrow g_3(x) = Aeq^{(s)} X_r^i - u_r = 0,$$

тоді, згідно з (9), можна записати штрафну функцію у вигляді

$$g(x) = 0 \Leftrightarrow |g(x)| = 0, \\ h_e(x) = |g(x)|. \quad (9)$$

Введемо до розгляду матрицю інцидентності орграфа Aeq розмірністю $n \times K$ (вершини – дуги), кожний елемент якої $a_{ik} = 1$, якщо із вузла E_i виходить дуга k ; $a_{ik} = -1$, якщо у вузол E_i входить дуга k ; $a_{ik} = 0$ у всіх інших випадках.

Позначимо через $Aeq^{(st)}$ матрицю з рядками s та t матриці Aeq , а через $Aeq^{(-st)}$ матрицю з видаленими рядками з номерами s і t . Для простоти сприйняття подамо вектор позиції частки у вигляді елементів, що відповідають r -му потоку пасажирів в кожній дузі k мережі G' .

Тоді умову на збереження потоку у вузлах мережі можна записати як

$$g_2(x) = Aeq^{(-st)} X_r^i = 0, \\ h_2 = |g(x)| = |Aeq^{(-st)} X_r^i|.$$

Обмеження рівності на задані величини r -го потоку мають вигляд

$$h_3 = |g_3(x)| = |Aeq^{(st)} X_r^i - u_r|.$$

Інтереси групи та окремо кожної частки описуються цільовою функцією, що визначає стратегію розподілення пасажиропотоку за призначеннями пасажирських поїздів [5]. Для врахування згаданих обмежень задачі (1 – 5) варіант розподілу пасажиропотоку по поїздах при розв'язанні основної задачі може бути оцінений на основі цільової функції безумовної мінімізації

$$f(X_t^i) = \text{sum}(AX_t^i .* C) + \lambda H \rightarrow \min, \quad (10)$$

де $(.*)$ - оператор поелементного множення векторів стовбців;

C – вектор, що описує вартість проходження потоку пасажирів через кожну дугу мережі, розмірність $(1 \times K)$. По суті, відповідно до дуги кожний компонент вектора описує вартість проїзду одиниці пасажиропотоку або вартість пересадки через пересадочний комплекс, грн,

$C = [10 \ 12 \ 40 \ 3 \ 3 \ 15 \ 15 \ 3 \ 25 \ 15 \ 15 \ 3 \ 3 \ 3 \ 20 \ 20 \ 35 \ 3 \ 3 \ 16 \ 3 \ 16 \ 3 \ 3 \ 3 \ 16 \ 16 \ 16 \ 16]$ розмірність (1×29) ;

C' – транспонована матриця із вектора рядка у вектор стовбця;

λ – параметр штрафної функції, $\lambda > 0$;

H – штрафна функція вигляду $H = \text{sum}(h_1) + \text{sum}(h_2) + \text{sum}(h_3)$, де $\text{sum}()$ – оператор поелементної суми кожного з векторів (дозволяє привести до одного значення величину штрафу для векторів різної розмірності),

$$h_1 = AX_t^i - y + |AX_t^i - y|,$$

$$h_2 = |Aeq^{(-st)} X_r^i|, \quad h_3 = |Aeq^{(st)} X_r^i - u_r|.$$

Результат розв'язання оптимізаційної задачі розподілу пасажиропотоку по поїздах з урахуванням пересадок для довільного фізичного графу мережі (рис. 1) наведено на рис. 2, а вектор позиції частки, що описує оптимальний варіант розподілу, буде мати вигляд

$$X_t^i = [0,52,38,0,0,0,0,53,22,22,31,0,0,0,0,0,22,17,3,3,13,13,13,7,7,7,13,13,17,8,8,8,8,17,16,9,],$$

при $f(X_t^i) = 6354 \text{ у.о.}$

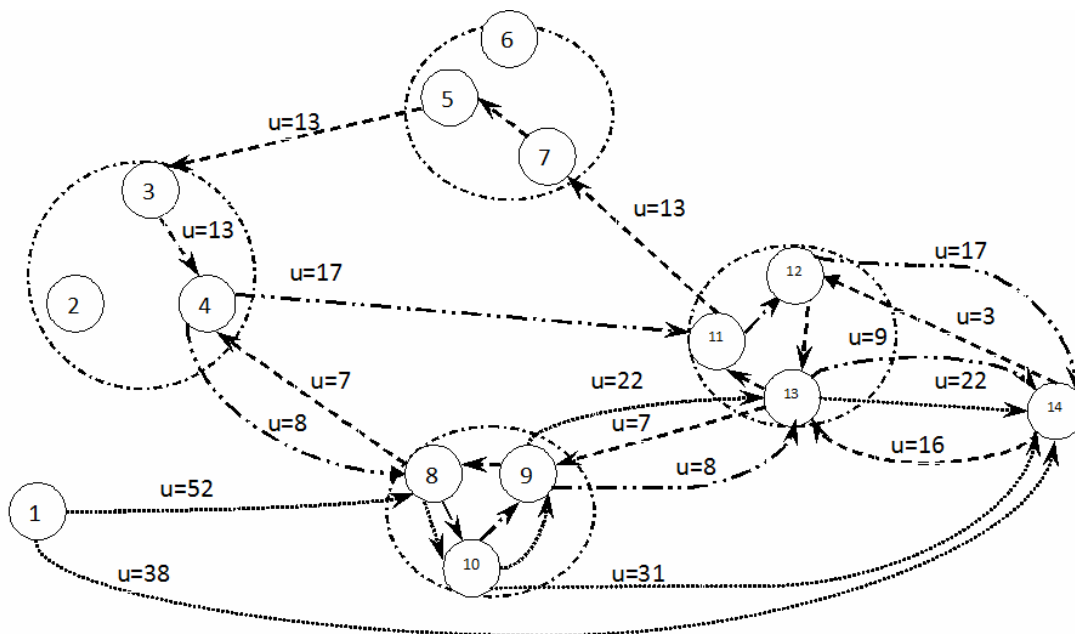


Рис. 2. Логічний граф мережі, що описує оптимальний варіант розподілу пасажиропотоків по поїздах

В межах практичної реалізації в середовищі Matlab було проведено розрахунки щодо моделювання розподілу

пасажиропотоків по поїздах [6,7]. Ілюстрація процесу зміни позицій часток наведена на рис. 3.

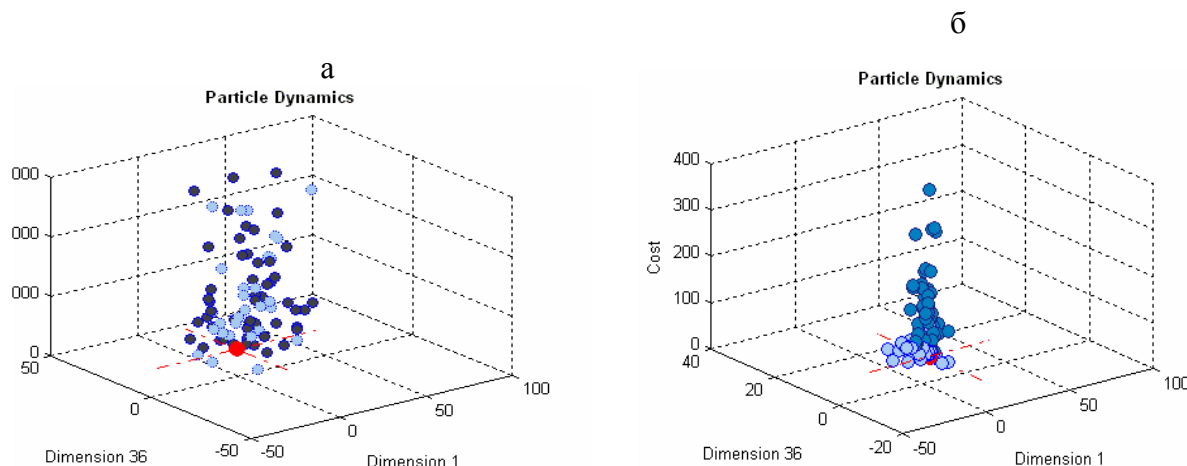


Рис. 3. Позиції часток рою в тривимірному просторі розв'язків на початку знаходження варіанта розподілу пасажиропотоків після 100 ітерацій роботи PSO-системи (а) та на момент знайденого оптимального розв'язку після 700 ітерацій (б)

Висновки. Проведений розрахунковий експеримент на мережі з 14 вершин при розв'язанні ПФПП з пересадками показав високу швидкість збіжності алгоритму PSO, що підтверджує перспективність та ефективність застосування даного методу у виробництві. За таких умов запропонований підхід до здійснення планування перевезень з урахуванням типових варіантів пересадки пасажиро-

потоків з використанням розрахункової моделі розподілу пасажиропотоків по поїздах на основі системи рою часток дасть змогу гнучко реагувати на умови коливання ринкового середовища і пріоритети споживачів, які постійно змінюються. Запропонований метод дозволить раціонально формувати систему організації швидкісних пасажирських перевезень.

Список використаних джерел

1. Бутько, Т. В. Моделювання розподілу пасажиропотоків по поїздам на основі колективного інтелекту [Текст] / Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко, О. О. Журба // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 2/4(44). – С. 44-47.
2. T. Krink, J. Vesterstrom, and J. Riget, Particle Swarm Optimization with Spatial Particle Extension, To appear in: Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, 2002 (CEC 2002).
3. Пархоменко, Л. О. Процедура формування моделі прогнозування пасажиропотоків на залізничних лініях [Текст] / Л. О. Пархоменко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Вып. 5/4 (65). – С. 7-10.
4. Пархоменко, Л. О. Дослідження напрямків розвитку швидкісного і високошвидкісного пасажирського руху поїздів на залізницях України [Текст] / Л. О. Пархоменко // 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 145. – С. 44-50.

5. Palacin R. High speed rail trends, technologies and operational patterns: a comparison of established and emerging networks [Text] / R. Palacin, L. Raif, Ö. Deniz., N. Yan // *Transport Problems International Scientific Journal*. – 2014. – Vol. 9. Special Edition. – P. 123-129.

6. Jianping Z. Planning and Development of High-Speed Rail Network in China // Презентація доклада на VIII всемирном конгресі по высокоскоростному залізничному транспорту. – Філадельфія, 2012. 13. Chinese high speed: in the wake of Wenzhou // *International Railway Journal*. 2012. – № 7. – P. 22.

7. Chinese high speed: in the wake of Wenzhou // *International Railway Journal*. 2012. – № 7. – P. 22.

8. Naohiko Hibino A Study on Characteristics of Train Station Passenger flows for Train Delay Reduction/ Naohiko Hibino; Yoshihisa Yamashita; Keiji Kariyazaki; Shigeru MORICHI // 12th WCTR, July 11-15, 2010 – Lisbon, Portugal 12 p.

9. Liebchen, C. The Modeling Power of the Periodic Event Scheduling Problem: Railway Timetables—and Beyond / Christian Liebchen, Rolf H. Mohring // F. Geraets et al. (Eds.): *Railway Optimization 2004*, LNCS 4359, P. 3–40, 2007.

Шандер Олег Едуардович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 730-10-88. E-mail: o.e.shander@gmail.com.
Леміш Андрій Миколайович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 099-688-26-64. E-mail: Alemish@gmail.com.

Shander Oleg Eduardovich, PhD. Of tehn. Sciences, Senior Librarian of Management of operational work of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 730-10-88. E-mail: o.e.shander@gmail.com.

Lemish Andriy Mikolajovych, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 099-688-26-64. E-mail: Alemish@gmail.com.

Стаття прийнята 17.11.2017 р.