

В роботі для комплексного рішення задач розрахунку плану формування та розробки раціональних схем обігу пасажирських поїздів на мережі залізниць запропоновано модифіковану систему мурашиних колоній, яка відображає специфіку технології організації залізничних пасажирських перевезень в дальньому та місцевому сполученнях, володіє здатністю до самоорганізації і адаптації системи при зміні розмірів пасажиропотоків

Ключові слова: схема обігу пасажирських поїздів, план формування пасажирських поїздів, система мурашиних колоній, колективний інтелект

В работе для комплексного решения задач расчета плана формирования и разработки рациональных схем оборота пассажирских поездов на сети железных дорог предложена модифицированная система муравьиных колоний, которая отображает специфику технологии организации железнодорожных пассажирских перевозок в дальнем и местном сообщениях, и владеет способностью самоорганизации и адаптации системы при изменении размеров пассажиропотоков

Ключевые слова: Схема оборота пассажирских поездов, план формирования пассажирских поездов, система муравьиных колоний, коллективный интеллект

In this paper, for the complex tasks of calculating the formation and development plan of rational schemes of traffic of passenger trains on the railway network proposed modification ant colony systems, which reflects the specifics of technologies for railway passenger transport in the long-distance and local communications, and owns the ability to self-organization and adaptation of the system when changing the size of passenger traffic.

Figures – 2 items, Sources- 5 items

Keywords: Scheme of passenger trains circulation, plan of forming of passenger trains, swarm Intelligence, ant colony system (ACS)

РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ ПРЯМУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ МУРАШИННИХ КОЛОНІЙ

Т.В. Буцько

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
Кафедра “Управління експлуатаційною роботою”*
Контактний тел.: 8 (057) 730-10-89

А.В. Прохорченко

Кандидат технічних наук, асистент*
Кафедра “Управління експлуатаційною роботою”*
Контактний тел.: 8 (057) 730-10-88

Є.В. Чеклова

Аспірант*
Контактний тел.: 8 (057) 730-10-88

*Українська державна академія залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м.Харків, Україна, 61050

1. Вступ

Застосування логістичних технологій при вирішенні задач раціонального розподілення поїздопотоків на мережі залізниць в межах технічного планування пасажирськими перевезеннями, приводить до необхідності аналізу можливостей нових наукових досліджень в області “Swarm Intelligence” [1]. Даний підхід заснований

на моделюванні колективного інтелекту та реалізує мультиагентні методи оптимізації, які можна досить перспективно використовувати при вирішенні експлуатаційних задач пасажирського комплексу.

У вирішенні питань удосконалення схем обігу пасажирських поїздів накопичено значний практичний досвід [2, 3], який свідчить про комплексність підходу та необхідність формалізації задач розподілення поїз-

дів дальнього та місцевого сполучень за паралельними напрямками з урахуванням їх пропускної спроможності та технічного оснащення станцій, корегування маршрутів прямування поїздів з погодженням часу прибуття та відправлення по великим вузловим та пасажирським станціям мережі залізниць. Для успішного вирішення і реалізації поставлених задач необхідним є проведення одночасних розрахунків на полігоні мережі з обліком багатьох факторів, що потребує виконання значного обсягу обчислень. Існуючі підходи до вирішення поставлених задач зводяться до використання класичних методів лінійного програмування, недоліком яких є неможливість врахування стохастичної природи пасажирських перевезень та лінійність функції рішення від управляючих параметрів, що є досить часто не ефективним та впливає на точність знаходження оптимального рішення.

Тому, в роботі для удосконалення методів розрахунку раціональних маршрутів обігу составів пасажирських поїздів по залізницям мережі запропоновано застосувати один із інтелектуальних мультиагентних методів оптимізації на основі системи мурашиних колоній (Ant Colony System, ACS) [4], які базуються на моделюванні поведінки колонії мурах.

2. Постановка задачі дослідження

В межах вирішення поставленої задачі щодо оптимізації маршрутів прямування пасажирських поїздів на окремих розрахункових полігонах мережі або на мережі в цілому в роботі запропоновано представити залізничну мережу у вигляді неорієнтованого графу $G(P, E)$, де вершини P відповідають станціям можливого прослідування та обертів составів пасажирських поїздів і мають позначення $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, тоді як вершина 0 відповідає станції формування состава, із якої починають і в якій закінчують свої маршрути всі пасажирські поїзди, а вершина p – станція обертів состава пасажирського поїзда $p \leq n$; E – множина дуг e_{ij} , що з'єднують відповідні вершини графа та відповідають залізничним лініям між станціями мережі, де $e_{ij} \in E$, $i, j = \overline{1, n}$. Інформація про зв'язки вершин графу міститься в матриці суміжностей ξ , з елементами

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо маршрут прямування поїзда існує;} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (1)$$

Кожний можливий напрямок слідування поїзда характеризується пасажиропотоком f_{ij} , що слідує в прямому і зворотньому напрямку $f_{ij} \neq f_{jv}$. За умови спрощення задачі слід вважати, що пасажирські поїзди не мають зупинок на проміжних станціях, а пасажиропотік між ними є незначним і враховується у встановленій величині максимального рівня населеності пасажирських поїздів при відправленні з головної станції (від 5 до 15 % вільних місць) [3].

Для визначення загального часу руху поїзда за маршрутом кожній дузі (i, j) мережі відповідає час його знаходження в дорозі t_{ij} між станцією i , $i \in P$ та станцією j , $j \in \overline{P}$. Позначимо індексом k – пасажирський поїзд, де $k = \overline{1, v}$, $k \in V$, V – множина пасажирських поїздів залізниці B , які передбачається використовувати на напрямку з від-

повідною середньою місткістю состава a^k . C_{ij}^k – вартість перевезення одиниці потоку по дузі (i, j) k -м поїздом.

Практичний досвід розробки схем обігу пасажирських составів та їх схематичного (скороченого) графіку руху свідчить про необхідність обліку наступних умов:

- прибуття і відправлення пасажирських поїздів слід передбачати в зручний для пасажирів час доби на основі проведення аналізу та прогнозування пасажиропотоків по відправленню із основних станцій мережі;
- підвід поїздів до попутних пасажирських станцій з великим пасажиропотоком – в ранковий і вечірній час;
- узгоджений розклад прослідування по великим міжстиковим станціям мережі, так як в умовах пікового часу передачі вагонопотоків між залізницями (з 16-00 до 17-00 год) прослідування пасажирських поїздів перешкоджає руху вантажних поїздів.

3. Вирішення задачі

Для задоволення вище наведених умов в роботі пропонується надати кожній станції і "часовий період" $[l_i, h_i]$, $i \in P$ в межах якого доцільне прибуття та прослідування пасажирських поїздів. Час прибуття відповідного поїзда у визначену вершину графа позначається S_i^k для $\forall i \in P, \forall k \in V$. Час відправлення із станції формування для кожного поїзда може знаходитись в межах часового вікна $[0, \infty]$. Отже, час прибуття поїзда до кожної станції мережі повинен бути в межах часового вікна

$$l_i \leq S_i^k \leq h_i, \forall i \in P, \forall k \in V. \quad (2)$$

Виходячи із наведених вище позначень поставлена задача наглядно інтерпретується в термінах поведінки мурах при функціонуванні системи мурашиних колоній (ACS). Процедура ACS використовує колонію віртуальних мурах, що ведуть себе як кооперативні агенти в математичному просторі, у якому вони можуть шукати та підтверджувати знайдені шляхи (рішення) з метою пошуку єдиної мережі раціональних маршрутів курсування пасажирських поїздів. В основі ACS лежить принцип функціонування мультиагентної системи, в якій може проявлятися самоорганізаційна та складна поведінка в умовах, коли стратегія поведінки кожного агента досить проста.

Розглянемо, як реалізувати основні складові самоорганізації штучних мурах при визначенні маршрутів прямування пасажирських поїздів для залізниці B . Робота алгоритму починається із створення m мурах, $m = \overline{1, M}$. Стартовою точкою розміщення мурах є станція формування составів з індексом 0 , що обумовлено наступними обмеженнями задачі:

кожний пасажирський поїзд залишає та повертається на станцію формування тільки один раз

$$\sum_{j \in N} X_{0j}^k = 1; \sum_{j \in N} X_{i, n+1}^k = 1, \quad (3)$$

де X_{ij}^k – ознака приналежності напрямку (i, j) до маршруту прямування k -го поїзда, що приймає значення

$$X_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо поїзд } k \text{ відвідує} \\ & \text{вершину } j \text{ негайно після } i, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (4)$$

поїзд може відправитися із вершини i , тільки якщо він прибув до неї

$$\sum_{j \in N} X_{i,j}^k - \sum_{j \in N} X_{u,j}^k = 0, \forall u \in P, \forall k \in V. \quad (5)$$

Кожна мураха за час однієї ітерації повинна побудувати складений маршрут прямування всіх поїздів $R = r^1, r^k, \dots, r^{n-1}$, де $r^k = (0, 1, 2, \dots, p)$, шляхом послідовного включення вершин графу до поточного маршруту за умови можливості відвідання поїздом кожної вершини графу декілька разів

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} X_{i,j}^k \geq 1, \forall i \in P. \quad (6)$$

та задоволення обмеження, при якому час прибуття поїзда в j не може бути меншим за суму часу прибуття поїзда на станцію i (S_i^k) та часу руху поїзда із станції i до станції j ($t_{i,j}$), тобто

$$\sum_{j \in N} X_{i,j}^k (S_i^k + t_{i,j} - S_j^k) \leq 0, \forall (i,j) \in A, \forall k \in V. \quad (7)$$

Вершина графу, що відповідає станції обертв @ при формуванні мурахою m маршруту r^k , визначається за умови порушення обмеження, при якому сума часу руху поїзда в прямому та зворотньому напрямках до станції обертв складає j ($j = p$) не повинна перевищувати максимальний час безперервної роботи бригади провідників $l \cdot t_{op}^{nпов}$

$$\sum_{i,j \in E} t_{0,j}^{r,k} + \sum_{i,j \in E} t_{j,0}^{r,k} \leq l \cdot t_{op}^{nпов}, \forall k \in V. \quad (8)$$

де l – ціле число, що визначає дальність маршруту прямування поїзда.

Сформований на кожній ітерації процедури ACS складений маршрут прямування всіх поїздів R може бути оцінений на основі цільової функції безумовної мінімізації

$$F = F_1 + F_2 + \lambda \left(\sum_{\psi=1}^{\phi} (\max(0, g_{\psi}(x)))^2 + \sum_{\kappa=1}^z (h_{\kappa}(x))^2 \right) \rightarrow \min, \quad (9)$$

де F_1, F_2 – відповідно сумарна вартість прямування всіх поїздів k в прямому та зворотньому напрямках

$$F_1 = \sum_{k \in V} \sum_{(i,j) \in E} A_{ij}^k \cdot C_{ij}^k \cdot X_{ij}^k; F_2 = \sum_{k \in V} \sum_{(j,i) \in E} A_{ji}^k \cdot C_{ji}^k \cdot X_{ji}^k, \quad (10)$$

A_{ij}^k - населеність k -го пасажирського поїзду при прямуванні із i в j

$$A_{ij}^k = \begin{cases} a^k, & f_{ij} - a^k > 0, \\ f_{ij}, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (11)$$

λ – параметр штрафної функції, $\lambda > 0$; $g_{\psi}(x)$ – обмеження рівності задачі, що приведені до виду

$g_{\psi}(x) = 0, \psi \in \Psi$; $h_{\kappa}(x)$ – обмеження нерівності задачі, що приведені до виду $h_{\kappa}(x) \leq 0, \kappa \in K$.

Мураха-дослідник вибирає напрямок переміщення із i в j на основі псевдо-випадкового правила переходу [1, 4], в якому застосовується рівномірно розподілений випадковий параметр $q \in [0, 1]$, що визначає відносну значимість використання відповідного напрямку руху для дослідження та q_0 – параметр балансу між використанням накопиченого досвіду та дослідженням нових рішень, $0 \leq q_0 \leq 1$.

Якщо $q < q_0$ то мураха m визначає найкращий напрямок руху на основі накопиченого досвіду з використанням суперкритерію в мультиплікативній формі за виразом

$$(i,j) = \arg \max_{u \in J_m(i)} \{[\tau_{i,u}] \cdot [\eta_{i,u}]^{\beta} \cdot [\theta_{i,u}]^{\nu}\}, \quad (12)$$

де u – додаткова вершина (станція), що утворює дугу при визначенні напрямку руху мурахи; β та ν – два регульованих параметри, що надають вагу видимості та значенню привабливості напрямку з більш потужним пасажиропотоком при виборі маршруту; $J_m(i)$ – доповнення до пам'яті мурахи (tabu list), що визначає перелік вершин графу G , які ще необхідно відвідати m -й мурасі хоча б один раз; $\tau_{i,u}$ – рівень віртуального сліду феромона на дузі $e_{i,u}$, який на початку роботи ACS приймається рівним невеликому додатньому числу, а в подальшому визначається після завершення переміщення мурахи m за виразом

$$\tau_{i,u}^m = \begin{cases} 1/F_m, & (i,j) \in R_m(t), \\ 0, & (i,j) \notin R_m(t). \end{cases} \quad (13)$$

де $R_m(t)$ – складений маршрут, який пройдено мурахою m на ітерації t ; F_m – значення цільової функції при даному варіанті обігу пасажирських поїздів.

Після кожної мурахи m на пройдених маршрутах застосовується локальне правило оновлення (local updating rule) [4]

$$\tau_{i,u} = (1 - \rho) \cdot \tau_{i,u} + \rho \Delta \tau_0, \quad (14)$$

при цьому $\rho \in [0, 1]$ показник локального випарювання, а $\Delta \tau_0 = 0$ початкове значення феромону. На основі відкладення феромону при переміщенні та запропонованих правил його оновлення реалізується кооперативність в поведінці мурах, що дозволяє кращим маршрутам зберігатися в глобальній пам'яті колонії.

$\eta_{i,u}$ – видимість, евристична функція, що дозволяє мурасі прийняти деяке локальне рішення щодо вибору найближчого маршруту до станції u із станції i

$$\eta_{i,u} = 1 / (t_{i,u} + w_u), \quad (15)$$

де $t_{i,u}$ – час прямування із станції i до станції u ; w_u – часовий штраф, що додається до $t_{i,u}$ за умови, якщо мураха відвідає вершину раніше початку або пізніше закінчення бажаного періоду прибуття та прослідування поїзда

$$w_u = \begin{cases} \max(l_j - S_j^k, S_j^k - h_j), & S_j^k \notin [l_j, h_j], \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (16)$$

$\vartheta_{i,u}$ – локальна статична інформація, що виражає евристичне бажання вибрати залізничний напрямок $e_{i,u}$, на якому найбільший попит на перевезення

$$\vartheta_{i,u} = (f_{i,u} + f_{u,i}) / 2a^k. \quad (17)$$

де a^k – місткість состава k -го пасажирського поїзда, пас.

В процесі формування складеного маршруту m -ю мурахою після проходження кожної дуги локально змінюється пасажиропотік для підвищення бажаності формування наступних маршрутів прямування поїздів по напрямках на яких попит був повністю незадоволений

$$f_{ij}^{local} = \begin{cases} f_{ij} - a^k, & f_{ij} - a^k > 0, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (18)$$

В іншому випадку ($q \geq q_0$) мураха m визначає напрямки руху на основі імовірності їх вибору за виразом

$$P_{i,u}^m = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,u}] \cdot [\eta_{i,u}]^\beta \cdot [\vartheta_{i,u}]^\gamma}{\sum_{u \in J_m(i)} [\tau_{i,u}] \cdot [\eta_{i,u}]^\beta \cdot [\vartheta_{i,u}]^\gamma}, & u \in J_m(i) \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (19)$$

Для дослідження всього простору рішення необхідно забезпечити випарювання феромону після завершення перемішень всіх мурах за допомогою застосування глобального правила оновлення на основі суворої елітної стратегії, відповідно до якої тільки агент, що склав краще рішення, виділяє феромон на шляху свого переміщення. Тоді кількість феромонів на ребрах змінюється відповідно до виразу

$$\tau_{i,u} = (1 - \alpha) \cdot \tau_{i,u} + \alpha \Delta \tau_{i,u}^{\Delta_{best}}, \quad (20)$$

$$\tau_{i,u}^{\Delta_{best}} = \begin{cases} (F_{G_{best}}^*)^{-1}, & (i,j) \in G_{best}, \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

де α – параметр випарювання; $F_{G_{best}}^*$ – значення кращого знайденого глобального рішення з початку пошуку; G_{best} – кращий складений маршрут, який було знайдено на всіх ітераціях від початку роботи процедури ACS.

Запропонована процедура системи мурашиних колоній ітерує оптимізаційний процес доки не буде задоволено прийнятій критерій зупинки на основі встановленого максимуму кількості ітерацій.

Для прослідкування поїзда по станціях мережі в межах встановлених часових вікон необхідно визначити рекомендовані часові періоди для прокладання ниток графіку відправлення та прибуття поїздів по станції формування. Такі розрахунки запропоновано виконати після одержання кращої схеми обігу пасажирських поїздів на всіх ітераціях від початку роботи методу системи мурашиних колоній. Отже, сформований му-

рахою m маршрут в прямому напрямку необхідно подвоїти, тобто

$$r^k \Rightarrow (0, 1, 2, 3, p, 3, 2, 1, 0) \Rightarrow (i_0, i_1, i_2, i_3, i_4, i_6, i_7, i_8, i_{2p+1}). \quad (21)$$

Прийmemo за $t_{i_0}^{-k}$ та $t_{i_{2p+1}}^{-k}$ відповідно останній фактичний час відправлення та прибуття пасажирського поїзда на станцію формування при реалізації маршруту r^k . Згідно до [5] для знаходження t_0^{-k} необхідно виконати зворотнє розгорнення маршруту r^k від i_{2p+1} до i_0 за виразом

$$t_{i_{2p+1}}^{-k} \leftarrow h_{i_{2p+1}}, \quad (22)$$

$$t_{i_j}^{-k} \leftarrow \min \{ t_{i_{j+1}}^{-k} - t_{i_{j+1}, i_j}^{-k}, h_{i_j} \}, j = i_{2p}, \dots, i_0. \quad (23)$$

Розрахунок останнього часу відправлення поїзда $t_{i_0}^{-k}$ із станції формування виконується на основі розгорнення маршруту в прямому напрямку

$$t_{i_j}^{-k} \leftarrow \max \{ t_{i_{j-1}}^{-k} + t_{i_{j-1}, i_j}^{-k}, l_{i_j} \}, j = i_1, \dots, i_{2p+1}. \quad (24)$$

Час самого раннього відправлення $t_{i_0}^k$ та прибуття $t_{i_{2p+1}}^k$ поїзда на станцію формування визначається за умови дотримання мінімальної тривалості маршруту ($t_{min}^k = t_{i_{2p+1}}^{-k} - t_{i_0}^{-k}$) на основі розрахунку зсуву часового вікна: $\delta^k = \min_{j=0, \dots, 2p+1} (t_{ij}^{-k} - l_{i_j})$. Таким чином, раціональним часовим вікном для прокладки нитки графіку відправлення та прибуття поїзда на k -му маршруті є $[t_{i_0}^k, t_{i_0}^k]$ та $[t_{i_{2p+1}}^k, t_{i_{2p+1}}^k]$, де $t_{i_0}^k = t_{i_0}^{-k} - \delta^k$ та $t_{i_{2p+1}}^k = t_{i_{2p+1}}^{-k} - \delta^k$.

В загальному вигляді запропонована технологія моделювання колективного інтелекту на основі системи мурашиних колоній дозволяє з позиції нових можливостей підійти до комплексного вирішення задач розрахунку плану формування та розробки раціональних схем обігу пасажирських поїздів на мережі залізниць. Приклад роботи розробленої моделі ACS реалізований в середовищі Matlab 7. Запропонована процедура системи мурашиних колоній, дозволила знайти оптимальне рішення за 3,2 хв., динаміка знаходження рішення наведена на рис. 1. На рис. 2 наведено результати розрахунку маршрутів прямування пасажирських поїздів на довільно сформованому графі мережі G з 14 вершинами.

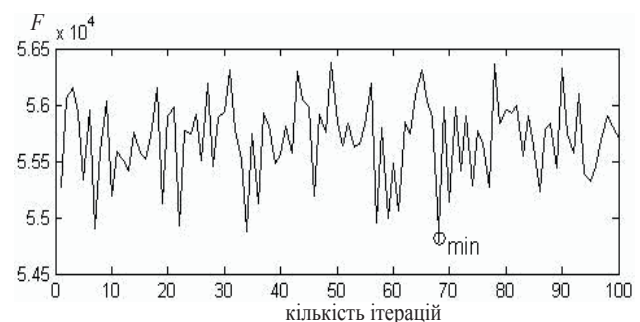


Рис. 1. Графік залежності значень цільової функції F від кількості ітерацій процедури ACS

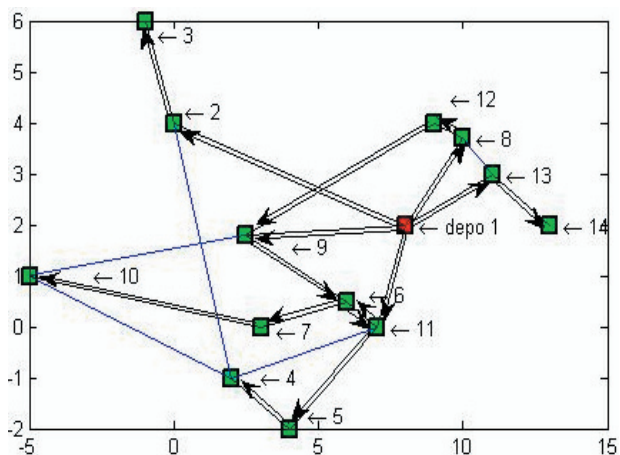


Рис. 2. Граф мережі G та знайдені кращі варіанти маршрутів прямування пасажирських поїздів

4. Висновок

Ефективність застосування ACS при вирішенні експлуатаційних задач великої розмірності з можливістю реалізації в динамічному застосуванні дозволить розробити нове покоління систем підтримки прийняття рішень (DSS - Decision Support Systems) інженерно-технічних та оперативних працівників пасажирського комплексу на основі WEB-технологій. Це надасть

можливість упорядкувати рішення експлуатаційних задач в межах єдиної інформаційно-керуючої системи, що дозволить підвищити точність та ефективність їх реалізації при здійсненні залізничних пасажирських перевезень.

Література

1. Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz - Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. New York, NY: Oxford University Press, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, 1999.
2. Пазойский Ю. О., Рябуха Л. С., Шубко В. Г. Организация пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте (в примерах и задачах). М.: Транспорт, 1991, 240с.
3. Семин К.Ф., Зашихина Л.И., Чантурия Г.Я. Современный опыт оперативного планирования, разработки схем обращения пассажирских поездов и регулирования пассажирских перевозок. -Тр.ВНИИЖТ, 1982, вып. 662, с.6-14.
4. Dorigo, M., and L. M. Gambardella. "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem." IEEE Trans. Evol. Comp. 1 (1997): 53-66.
5. N. Azi, M. Gendreau, J.-Y. Potvin. An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes // European Journal of Operational Research 178 (2007), pp. 755–766.