УДК 656.2.072

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ВОКЗАЛІ

**А.В. Прохорченко**
Кандидат технічних наук, старший викладач
Кафедра управління експлуатаційною роботою*
Контактний тел.: 8-050-642-86-12

**І.А. Труфанова**
Магістр
Інститут перепідготовки та підвищення кадрів*
Контактний тел.: 8-097-939-98-30
*Українська державна академія залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050

***В роботі запропоновано удосконалити технологію управління пасажиропотоками на залізничних вокзалах за рахунок математичного моделювання руху пасажирів при здійсненні пересадки з урахуванням особливостей індивідуального характеру поведінки кожного пасажира в потоці виходячи із глобальної мети та локальної інформації (видимість пасажира)***

***Ключові слова: залізничний вокзал, динаміка руху пасажиропотоків, колективний інтелект***

***В работе предложено усовершенствовать технологию управления пассажиропотоками на железнодорожных вокзалах за счет математического моделирования движения пассажиров при осуществлениии пересадки с учетом особенностей индивидуального характера поведения каждого пассажира в потоке исходя из глобальной цели и локальной информации (видимость пассажира)***

***Ключевые слова: железнодорожный вокзал, динамика движения пассажиропотоков, коллективный интеллект***

***The paper suggests to improve the passenger traffic management technology at railway stations due to the mathematical modeling of the movement of passengers during the transshipment with takin in account the individual features of the behavior of each passenger in the flow from the global objectives and local information (the visibility of the passenger)***

***Keywords: railway station, dynamics of motion of passenger streams, collective intellect***

## 1. Вступ і актуальність задачі

Процеси інтеграції до Європейської системи пасажирських перевезень та зростання конкуренції на ринку транспортних послуг України вимагають застосування якісно нових концепцій управління залізничними пасажирськими вокзалами, які здатні гнучко реагувати на умови коливання ринкового середовища і на пріоритети споживачів, які постійно змінюються.

Відсутність технологій управління пасажиропотоками на вокзалах та координації роботи залізничного і суміжних видів транспорту в умовах зростання об'ємів перевезень в період проведення Євро-2012 вимагає ефективного рішення задач мінімізації часу пересадок пасажирів (Minimum Connecting Time) при формалізації процесу функціонування залізничного вокзалу, як пересадочного терміналу (Hub) на основі сучасних інтелектуальних технологій.

## 2. Постановка задачі

В межах формалізації процесу функціонування пересадочного терміналу пропонується представити процес роботи залізничного вокзалу при взаємодії з різними видами пасажирського транспорту як складну систему, що функціонує на макро та мікро рівні. На макро рівні залізничний вокзал є вузлом транспортної мережі, для якої можна описати процес курсування поїздів та інших видів пасажирського рухомого складу на основі теорії потоків в мережі з можливістю розробки моделей щодобового прогнозування структури та параметрів потоків пасажирів

по відправленню та прибуттю на вокзал. За таких умов залізничний вокзал є точкою біфуркації інтермодальних маршрутів прямування пасажиропотоків, що вимагає проведення досліджень на мікро рівні, де пасажиропотік представляється як потік часток, що взаємодіють між собою. Одним із напрямків дослідження маршрутів переміщення пасажирів при виконанні пересадки на мікро рівні є побудова адекватної математичної моделі динаміки руху пасажиропотоків на основі використання теорії динаміки натовпу (Crowd dynamics) [1, 2]. Проведення таких досліджень є важливою складовою організації ритмічної роботи вокзалу як пересадочного терміналу, що дозволить наперед визначати комфортність та час типової пересадки при розрахунках плану формування пасажирських поїздів та складанні графіку руху.

## 3. Вирішення задачі

Для рішення поставленої задачі в роботі запропоновано розробити модель визначення часу пересадки пасажирів з урахуванням особливостей індивідуального руху пасажирів в потоці. В основі такої моделі лежить підхід, що враховує індивідуальний характер поведінки кожного пасажира в потоці виходячи із глобальної мети та локальної інформації (видимість пасажира).

В даній моделі розглядається рух пасажирів у двомірному просторі 2D, що представляє собою район пересадки пасажирів у вигляді картографічної інформації. Для спрощення розрахунків структура всієї безперервної поверхні району пересадки пасажирів розбивається на однакові осередки (квадрати) заданого розміру – 0,1 метра [1]. Частина геометрії простору залізничного вокзалу та прилеглих площ зайнята непрохідними перешкодами (стіни вокзалу, краї платформ, турнікети, огорожі тротуару тощо). Кожний осередок закриває точку, що є вершиною статичного поля S та має приписаний атрибут наявності перешкоди в даному місті $\delta_{xy} = 1$.

Структуру пасажиропотоку при здійсненні пересадки через залізничний термінал можна розподілити на групи в яких існує різна мета. Так, якщо розглянути варіант пересадки "пасажирський поїзд – міський транспорт", частина пасажиропотоку виконує пересадку на поїзд метрополітену, інша на трамвай та автомобільний вид транспорту, деякі пасажири звертаються до послуг залізничного вокзалу. Отже, загальний пасажиропотік описується умовою

$$A = \sum_{j=1}^{m} \eta_j \text{ , пас} \qquad (1)$$

де $A$ – загальний пасажиропотік поїзда, що прибув на станцію;

$\eta_j$ – група пасажирів, що керується метою $j$, ( $j = 1,2,...,m$ ).

В процесі моделювання кожна мета $\eta_j$ групи пасажирів, до якої необхідно рухатись задається умовною областю простору ( $g_j$ - глобальна локація), яка використовується у сценарії пересадки.

На попередньому етапі проведення розрахунків слід кожній точці осередку на карті присвоїти ваговий коефіцієнт (потенціал).

Враховуючи фактори, яким надають перевагу пасажири при виборів маршруту пересадки, умовою формування потенційної функції $\phi$ на всій області визначення району пересадки є найкоротша відстань до глобальної мети та відчуття дискомфорту біля перешкод

$$\alpha \int_P 1 ds + \gamma \int_P \Theta ds \Rightarrow \int_P F ds, \quad F = \alpha + \gamma\Theta , \qquad (2)$$

де $ds$ – інтеграл по відстані; $\Theta$ – поле дискомфорту біля перешкод; $\alpha, \gamma$ – вагові коефіцієнти даних факторів; $P$ – маршрут пасажира, $P \in \Pi$. Отже, при розрахунках не береться до уваги присутність інших пасажирів в потоці, а лише статичні перешкоди району пересадки. Дана потенційна функція $\phi$ в точці мети $g_j$ дорівнює нулю, а на всьому іншому проміжку задовольняє рівнянню Ейконала

$$\|\phi(x)\| = F , \qquad (3)$$

де $\nabla\phi(x)$ – градієнт функції $\phi(x)$. Для рішення отриманого рівняння (3) запропоновано використати чисельний метод Multistencil Fast Marching Method [3].

На знайденому потенційному полі S для кожної глобальної локації $g_j$, що використовується як мета для руху пасажира, необхідно побудувати карту глобальних маршрутів пересадки пасажирів за допомогою методу оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій (Bacterial Foraging Optimization, BFO) [4]. Для рішення поставленої задачі агенти, що моделюють поведінку бактерій, повинні здійснювати оптимізацію в просторі пошуку статичного поля $S = (p_{1,1},...,p_{2,y},...,p_{x,2},...,p_{M,L})$, де індекси $x = \overline{1,M}$ та $y = \overline{1,L}$ моделюють координати поточного положення $p$-го пасажира в районі пересадки, $p \in A$.

Кожна бактерія в популяції при ініціалізації параметрів алгоритму BFO приймає початкові координати положення пасажирів, що задаються згідно до умов моделювання. Відповідно до біологічних основ життя бактерії E.Coli [5] в роботі методу враховуються хемотаксичні дії таких бактерій. Нехай $P(k,l,n) = X_p^{(x,y)}(k,l,n) \,|\, p = 1,2,...,A$ описує позицію кожного члена популяції $A$ бактерій на $k$-му кроці хемотаксису, $l$-му кроці відтворення та на $n$-ій події виключення-розсіювання. На кожному кроці хемотаксису бактерія, що моделює пасажира в потоці, може переміститися згідно до значення потенціалу осередків $\delta_{xy}$ в один із чотирьох напрямків $\theta = \{0^o, 90^o, 180^o, 270^o\}$ або залишитися на місці. В дискретному просторі координати цільових осередків напрямку руху пасажира з позиції $p_{x,y}$ можуть прийняти наступні значення: $p_{x+1,y}$, $p_{x,y+1}$, $p_{x-1,y}$, $p_{x,y-1}$.

Згідно до основ переміщення пасажирів на статичному полі S нове положення бактерії для кожної координати розраховується за виразом

$$X_p(k+1,l,n) = \begin{cases} 1, \text{якщо } X_p(k,l,n) + C(p)\cdot\varphi(l) \geq 1, \\ 0, \text{якщо } 0 < X_p(k,l,n) + C(p)\cdot\varphi(l) < 1, \\ -1, \text{якщо } X_p(k,l,n) + C(p)\cdot\varphi(l) \leq 0, \end{cases} \qquad (4)$$

де $C(p) \in (0,1)$ – змінна, що визначає розмір кроку в певному напрямку для $p$-ї бактерії; $\varphi(l) = \{-1,0,+1\}$ –

вектор випадкових чисел на $l$-му кроці хемотаксису, що моделює обертання.

Для кожної бактерії в межах циклу хемотаксису розраховується цільова функція, яка характеризує маршрут пересадки пасажира на потенційному полі $\phi$

$$E_p = \sum_{(x,y)\in P} \phi(x,y) \to \min , \quad (5)$$

де $\phi(x,y)$– потенціал осередку з координатами (x, y).

Запропонований метод моделювання переміщення бактерій є мультиагентним, що дозволяє виконувати розрахунки паралельно для великої кількості пасажирів та охоплювати весь район пересадки на залізничному вокзалі.

При пересадці пасажири, що рухаються в одному напрямку, утворюють так званий пасажиропотік. Область видимості $U(S,r)$ пасажира $p(x,y,t)$ в потоці визначена у формі кола із центром у місці розташування агента та заданим радіусом $r>0$ (параметр моделі, що задається). Приналежність об'єкта в момент часу $t$ з координатами $(\hat{x},\hat{y})$ до області видимості пасажира $p(x,y,t)$ визначається за виразом

$$U(S,r) = \{(\hat{x},\hat{y}) \mid \sqrt{(x-\hat{x})^2+(y-\hat{y})^2} < r\}, \quad (6)$$

де $\hat{x},\hat{y}$ – координати пасажира, що знаходиться в області видимості.

В процесі моделювання для кожного пасажира в потоці обчислюється щільність, як сума всіх щільностей пасажирів, що перебувають у зоні видимості $r_i$

$$\rho_i = \sum_{j,i\neq j,x_j\in r_i} \rho_j . \quad (7)$$

Також для кожного агента створюється поле середньої швидкості $\bar{v}_i$, що змінюється пропорційно індивідуальної щільності

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_{j,i\neq j,x_j\in r_i} \rho_j v_j}{\rho_i}, \quad (8)$$

де $v_j$ - швидкість j-того пасажира.

Основою руху пасажира в кожному моменті часу $i\Delta t$ є визначення нової швидкості та напрямку руху $\theta_v$, які повинні бути прийняті до наступного моменту $(i+1)\Delta t$. Визначений глобальний маршрут пересадки пасажира уникає зіткнення зі статичними перешкодами, але не враховує динаміку зміни позицій інших пасажирів. Для уникнення зіткнень з динамічними перешкодами (іншими пасажирами) в роботі запропоновано застосувати локальний алгоритм уникнення зіткнень RVO (Reciprocal Velocity Obstacle) [6]. Швидкість для уникнення перешкоди $RVO_j^i(v_j,v_i)$ визначається за виразом

$$RVO_j^i(v_j,v_i) = \{v_i' \mid 2v_i' - v_i \in VO_j^i(v_j)\}, \quad (9)$$

де $VO_j^i(v_j)$ область визначення швидкості пасажира $j$ з яким можливе зіткнення пасажира $i$, що рухається з поточною швидкістю $v_V$; $v_V'$– змінена швидкість пасажира $i$, яка дозволяє уникнути зіткнення. На рис. 1 графічно представлено визначення швидкості для уникнення перешкоди за правилом RVO. Слід зазначити, запропонований принцип уникнення зіткнень передбачає, що всі інші пасажири використовують аналогічні правила.

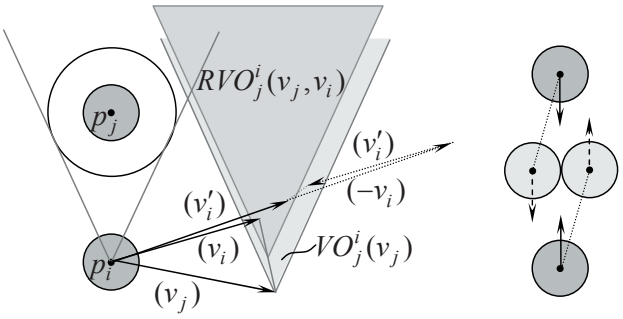


Рис. 1. Визначення швидкості для уникнення перешкоди за правилом RVO

Пасажир при здійсненні пересадки рухається на максимально можливій швидкості, яку можна досягти, враховуючи дані умови навколишнього середовища (підйоми, спуски, сходи) та щільності потоку. Згідно до цього на швидкість $v_V'$, яка дозволяє уникнути зіткнення для пасажира $V$ запропоновано накласти динамічне обмеження допустимої максимальної швидкості $v_i^{max}$

$$\kappa(v_i,\theta_i,\Delta t) = \{v_i' \mid \|v_i'\| \le v_i^{max}, \Delta t\} \quad (10)$$

Допустиму швидкість $v_i^{max}$ запропоновано визначати на основі методики [7, 8], яка враховує залежність швидкості від щільності пасажиропотоку за умовою

$$v_i^{max} = \begin{cases} v_{max}^{\Phi}, & \text{якщо} \quad \rho \le \rho_{min}, \\ \bar{v}_i^{max} = \bar{v}_i(x+n_\theta), & \text{якщо} \quad \rho > \rho_{max}, \\ v_{max}^{T} + \dfrac{\rho-\rho_{min}}{\rho_{max}-\rho_{min}}(\bar{v}_i^{max} - v_{max}^{T}), & \text{якщо} \quad \rho_{min} < \rho < \rho_{max}, \end{cases} \quad (11)$$

де $v_{max}^{\Phi}$ – максимально можлива топографічна швидкість на даній місцевості при здійсненні пересадки пасажирів; $\bar{v}_i$ – середня швидкість потоку, яка взята в поточному положенні пасажира зі зміщенням $n_\theta$ в сторону $\theta$; $\rho_{min}$, $\rho_{max}$ - відповідно задані мінімальна та максимальна щільності.

Для інтеграції в глобальний маршрут переміщення пасажира із бажаною швидкістю $v_i^p$ знайденого набору локальних швидкостей $v_i'$, що дозволяють уникнути динамічні перешкоди, накладено штрафну функцію виду

$$penalty_i(v_i'') = w_i \frac{1}{tc_i(v_i')} + \|v_i^p - v_i'\|, \quad (12)$$

де $w_i$ – коефіцієнт за допомогою якого можна визначати агресивність пасажира; $tc_i(v_i')$ – час до зіткнення з динамічною перешкодою, що визначено на основі методу RVO.

Результуючу швидкість для кожного пасажира можна знайти на основі мінімізації штрафу між всією множиною швидкостей пасажирів за виразом

$$v_i' = \arg \min_{v_i''\in\kappa(v_i,\theta_i,\Delta t_i)} penalty_i(v_i''). \quad (13)$$

В умовах ідентифікації пасажирів з якими можливе зіткнення та при проведенні розрахунків множини припустимих швидкостей руху важливим є визначення орієнтації пасажира на основі екстраполяції виду

$$\theta_i = \arctan(\alpha v_i + (1-\alpha)v_i^p), \text{ де } 0 \le \alpha \le 1. \quad (14)$$

Під час моделювання процесу пересадки кожен пасажир виконує послідовність дій згідно до заданої глобальної мети, що записується у скрипті сценарію поведінки пасажира. Пасажир планує свої дії на основі поточної мети та даних, що отримані з навколишнього середовища.

## 4. Висновки

Запропонована модель динаміки руху пасажиропотоків дозволить проаналізувати час пересадки пасажирів, що надасть можливість розробити узгоджений графік прибуття та відправлення міського пасажирського транспорту у взаємодії із залізничним та визначити основні напрямки удосконалення технології організації безперервного перевізного процесу в транспортному вузлі в години "пік". Це в свою чергу дозволить отримати економічний ефект за рахунок більш раціонального використання транспортних засобів у вузлі, підвищення рівня обслуговування та можливості реалізації подорожі пасажирів "від двері до двері", що, як наслідок, підвищить доходи від покращення конкурентних позицій залізниць на ринку пасажирських перевезень.

Література

1. G.K. Still, Crowd Dynamics. PhD Thesis, Mathematics Department, Warwick University, August 2000.
2. D.Helbing, I.Farkas, T.Vicsek, Simulating dynamical features of escape panic, Nature, 407(2000), 487-490.
3. M. Sabry Hassouna and Aly A. Farag, "Multistencils Fast Marching Methods: A Highly Accurate Solution to the Eikonal Equation on Cartesian Domains," IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI, vol. 29, no. 9, pp. 1-12, Sep 2007.
4. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / Під заг. ред. С.О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
5. Berg H.C., Brown D. A. Chemotaxis in escherichia coli analyzed by three-dimensional tracking // Nature, 1972. – №239. – P. 500–504.
6. Jur van den Berg, J., Patil, S., Sewall, J., Manocha, D., and Lin, M.: Interactive navigation of multiple agents in crowded environments. In Proceedings of the 2008 Symposium on interactive 3D Graphics and Games (Redwood City, California, February 15 - 17, 2008). I3D '08. ACM, New York, NY, 139-147. 2008.
7. HUGHES, R. L. 2003. The flow of human crowds. Annu. Rev. Fluid Mech. 35, 169–182.
8. Treuille, A., Cooper, S., and Popović, Z. 2006. Continuum crowds. In ACM SIGGRAPH 2006 Papers (Boston, Massachusetts, July 30 - August 03, 2006). SIGGRAPH '06. ACM, New York, NY, 1160-1168.