

УДК 656.072.2

DOI: 10.18664/iksz.v29i1.300883

БУТЬКО Т. В., д.т.н., професор,

КРИВИЧ А. В., магістрант

ЯЩУК Ю. І., аспірант

ГУРИН Д. О., магістрант

(Український державний університет залізничного транспорту)

ЖУКОВИЦЬКИЙ І.В., д.т. н, професор (Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту, Український державний університет науки і технологій)

Організація функціонування інтегрованих пасажирських залізничних пересадочних комплексів на засадах логістики

Анотація. Процес організації пасажирських залізничних перевезень потребує підвищеної уваги, особливо в період воєнного стану в країні. Одним із критичних місць у цьому процесі є зосередження значної кількості пасажирів у межах вокзалу і привокзальної площі, де відбувається пересадка на інші види транспорту. Проведений аналіз по країнах ЄС, США, Південної Кореї, Великої Британії, Китаю свідчить, що основною тенденцією в цих країнах є перехід універсальних залізничних вокзалів до інтегрованих залізничних пересадочних комплексів. Такий пересадочний комплекс виконує функції об'єднання різних видів транспорту: залізничного, авіаційного, міського, приміського, і забезпечує найбільш швидку пересадку пасажирів, що запобігає ефекту створення неконтрольованого натовпу. Для оцінювання параметрів пасажиропотоків в умовах такого мегаполіса, як Київ, було проведено дослідження, які подано у вигляді погодинних динамік розподілу кількості пасажирів, перевезених разом у міжрегіональному і приміському сполученні, і доведено існування «ранкового» і «вечірнього» ефектів. Це спричиняє збільшення кількості пасажирів та ускладнює управління потоками. Для переходу залізничного вокзалу Київ-Пасажирський у статус інтегрального пересадочного комплексу запропоновано об'єднати в єдину систему залізничну станцію, вокзал, привокзальну площу, де зосереджено зупинки міського транспорту, включно з метрополітеном, під управлінням єдиного інтермодального пасажирського оператора. Задля управління пасажиропотоками в такій системі сформовано оптимізаційну математичну модель із цільовою функцією, що являє собою сумарний час на пересування пасажирів кожною складовою системи. Система обмежень містить умову збереження пасажиропотоку і технологічні параметри щодо інтервалів часу прибуття поїздів.

Ураховуючи, що найбільш критичними місцями в системі є час перебування пасажирів у будівлі вокзалу і час знаходження на привокзальній площі, для управління пасажиропотоками на цих елементах використано апарат теорії динаміки натовпу. Процес пересування пасажиропотоків будівлею вокзалу подано як хвильовий процес. При цьому кожне прибуття поїзда утворює хвилю пасажирів. Для формалізації цього хвилеподібного процесу використано хвильове рівняння Шредінгера у форматі 2D, обмеженнями є план будівлі вокзалу. Таку модель доцільно використовувати для формування розумної системи орієнтації пасажирів на вокзалі. Для управління пасажиропотоками на привокзальній площі запропоновано використати комплекс математичних моделей: для формалізації руху пасажирів до зупинок міського транспорту – рівняння Ейконала, а для синхронізації пасажиропотоків із часом і місткістю міського транспорту – моделі теорії розкладу.

Процес управління пасажиропотоками на інтегрованому пересадочному комплексі запропоновано організувати на структурі розподілених систем підтримки прийняття рішень (СППР) під керівництвом єдиного пасажирського інтермодального оператора.

Ключові слова: пасажиропотоки, залізничний вокзал, інтегрований пересадочний комплекс, математичні моделі, міський транспорт.

Вступ

Процес організації пасажирського залізничного сполучення, зокрема швидкісного, є надзвичайно складним в умовах воєнного стану в Україні. АТ «Укрзалізниця» залишається основним стратегічним перевізником вантажів і пасажирів. Надійність самого перевезення і безпека пасажирів є

головним завданням у процесі функціонування транспортної системи України та АТ «Укрзалізниця» зокрема. Особливо це стосується великих мегаполісів, де концентруються пасажиропотоки і відбувається взаємодія залізничного і міського транспорту: метрополітену, міського електротранспорту (трамвай, тролейбус), маршрутних таксі тощо, зупинки яких зосереджено на привокзальній площі.

© БУТЬКО Т. В., КРИВИЧ А. В., ЯЩУК Ю. І., ГУРИН Д. О., ЖУКОВИЦЬКИЙ І.В 2024

У цьому контексті залізничну станцію, вокзал разом із привокзальною площею доцільно розглядати як великий пасажирський хаб (інтегральний пересадочний комплекс). Для того щоб запобігти скупченню пасажирів у такій системі, доцільно синхронізувати функціонування всіх її елементів на засадах логістики, тобто забезпечити чітку взаємодію залізничного і міського транспорту.

Постановка проблеми

Підвищення рівня конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку пасажирських перевезень обумовлено переважно рівнем організації, комфорту і безпеки процесу переміщення пасажирів. Особливої актуальності ці питання набувають у період воєнного стану в Україні.

Одним із критичних місць у процесі переміщення пасажирів є перебування їх у межах такої системи, як інтегрований пересадочний комплекс. Як відомо, пасажиропотокам, які прибувають і відправляються з залізничної станції, притаманний так званий «ранковий» і «вечірній» ефект, що призводить до значного збільшення пасажирів у всій системі. Цей ефект обумовлений підвищенням інтенсивності надходження і відправлення приміських і міжрегіональних поїздів у певні періоди доби, що у свою чергу спричиняє значну нерівномірність у функціонуванні зазначеної вище системи та ускладнює її управління. Ураховуючи, що пасажирські і приміські поїзди надходять на станцію з певним інтервалом часу, необхідно так скоординувати рух пасажиропотоку в системі, щоб загальний час знаходження пасажирів у ній був якомога найменшим, тобто не створювати ефект «неконтрольованого натовпу».

Управління пасажиропотоками відбувається на основі створення розумної системи орієнтації пасажирів і узгодженого графіка підведення на привокзальній площі міського транспорту до зупинок.

Отже, необхідним є формування комплексу математичних моделей, що адекватно відтворюють процес руху пасажиропотоків від платформи на станції, через будівлю вокзалу, привокзальну площу до зупинок міського транспорту.

Аналіз досліджень і публікацій

Як доводить аналіз, у більшості країн ЄС та інших країнах залізничні вокзали перетворилися у складові інтегрованих транспортних вузлів, а пасажирів все частіше складають маршрути, використовуючи декілька поїздів або різні види транспорту. Питанням організації функціонування пересадочних пасажирських комплексів присвячено багато уваги в сучасних наукових дослідженнях. Так, у дослідженні [1] для визначення розподілу щільності потоку пасажирів на вокзалі було запропоновано методологію, що поєднує методи математичної статистики та імітаційного моделювання. Цей метод дає змогу визначити необхідну пропускну спроможність пішохідних комунікацій та оптимальну швидкість пересадочних потоків. Однак такий метод потребує проведення складних статистичних досліджень параметрів пасажиропотоків, які можуть значно відрізнятися за різними залізничними вокзалами. У дослідженні [2], що стосується завантаження

залізничного вокзалу в Гуанчжоу (Китай), було запропоновано спосіб моделювання організації пасажиропотоків із використанням клітинних автоматів і генетичного алгоритму. У роботі [3] авторами зазначено, що розповсюдження пасажиропотоку відбувається в інформаційному полі. При цьому умовою формування потенційної функції на всій області визначення району пересадки є найкоротша відстань до глобальної мети і відчуття дискомфорту біля перешкод. Для формалізації процесу руху пасажирів запропоновано використання рівняння Ейконала. У роботі [4] розроблено модель узгодження графіка підведення рухомого складу різних видів транспорту до залізничного пересадочного комплексу на основі комплексного використання методів теорій розкладу та генетичних алгоритмів, що, на відміну від наявних методів, дає змогу визначити більш точний графік прибуття і відправлення міського пасажирського транспорту у взаємодії з залізничним за умови гарантованого забезпечення варіантів пересадки в межах директивних строків.

Проведений аналіз довів, що складність формалізації процесу організації потоків пасажирів на залізничному вокзалі при здійсненні пересадки потребує розроблення нових методів, які б дали змогу реалізувати модель направленої руху пасажиропотоків з урахуванням індивідуальної поведінки пасажирів на інтегрованому пересадочному комплексі.

Мета дослідження

Формалізація процедури управління пасажиропотоками на інтегрованому пасажирському залізничному пересадочному комплексі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одним із основних завдань функціонування залізничної транспортної системи є організація надійного і безпечного перевезення пасажирів і вантажів. Особливої актуальності набуває це завдання в період воєнного стану в Україні. У надзвичайних умовах АТ «Укрзалізниця» виконувала і виконує функції, від яких залежить існування Української Держави. Як відомо, тільки за перше півріччя 2023 р. обсяги перевезень вантажів залізницею становили 70,5 млн т, а у важливому для країни експортному сполученні – 40 % загальних обсягів перевезень. АТ «Укрзалізниця» також здійснювала масштабні евакуаційні заходи з перевезень населення до західних областей (перевезено 4 млн пасажирів) і за кордон

(перевезено 600 тис. пасажирів). У цьому контексті особливу увагу слід приділити саме питанням безпеки при перевезенні населення, особливо зважаючи на трагічні події на вокзалі в м. Краматорськ. Саме такі події спонукають розглядати системно процес перевезення задля безпеки і комфорту пасажирів.

Процес перевезення пасажирів залізницею не закінчується такою подією, як прибуття потяга на відповідну платформу на станції. Далі пасажиропотоки переміщуються або будівлею вокзалу, або підземними тунелями і виходять на привокзальну площу для

пересадки на міський транспорт, включно з метрополітемом. Системний підхід передбачає, що залізничну станцію, вокзал разом із привокзальною площею доцільно розглядати як великий пасажирський хаб, тобто об'єднати їх у єдину систему під управлінням єдиного інтермодального оператора, який забезпечує синхронізацію при взаємодії залізничного і міського транспорту. Схему руху пасажиропотоків у такій системі наведено рис. 1.

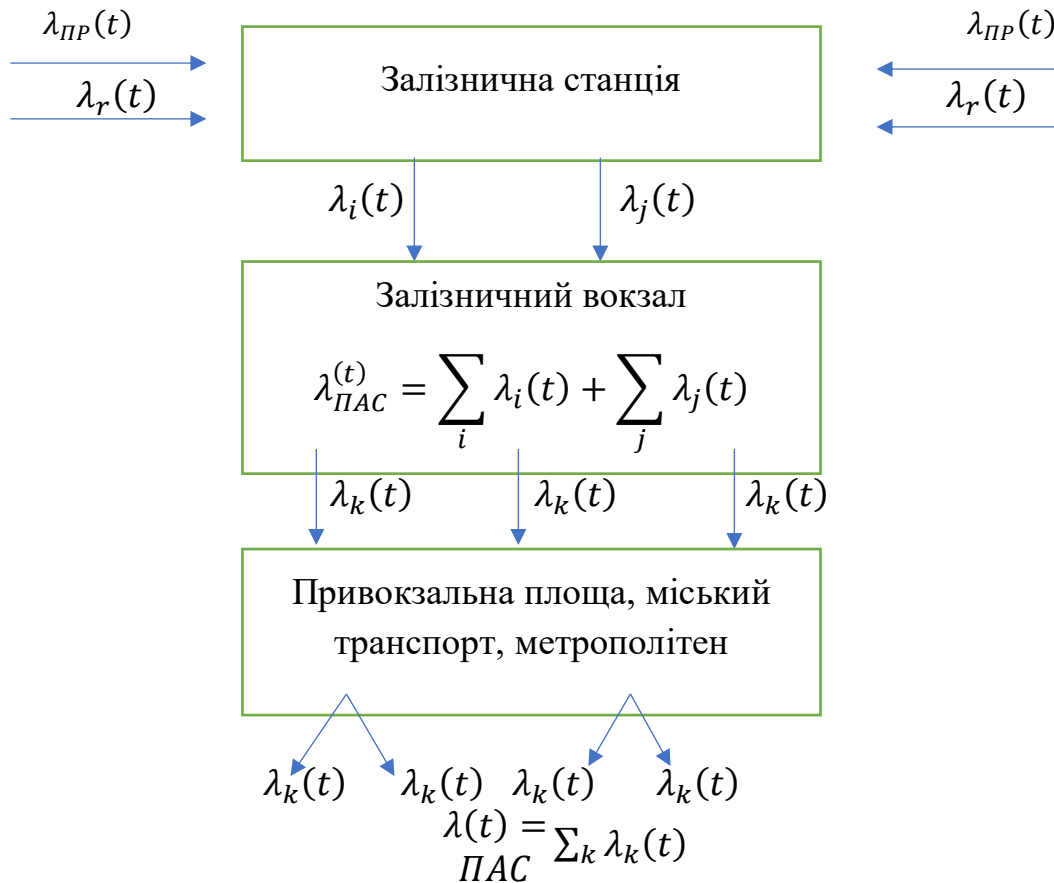


Рис. 1. Схема руху пасажиропотоків

Тут $\lambda_{PP}(t)$ – інтенсивність надходження приміського залізничного транспорту; $\lambda r(t)$ – інтенсивність надходження міжрегіональних пасажирських поїздів; $\lambda_i(t)$ – інтенсивність приміського пасажиропотоку; $\lambda_j(t)$ – інтенсивність міжрегіонального пасажиропотоку; $\lambda_k(t)$ – інтенсивність пасажиропотоку на k -й вид міського транспорту.

Як відомо, інтенсивність залізничного транспортного потоку в загальному випадку є функцією часу, і в інтервалі часу $t \in [0,75 - 2]$ год підпорядковується нормальному закону розподілу

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{|x-\lambda t|^2}{2\bar{J}}\right), \quad (1)$$

де x – випадкове значення кількості поїздів;

$\lambda = \lambda_{PP} + \lambda r$ – середня годинна інтенсивність.

У меншому періоді часу $t < 0,75$ год кількість поїздів підпорядковується закону Пуасона

$$P_t(X = x) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Для оцінювання особливостей зміни інтенсивності пасажиропотоку на інтегрованому пересадочному комплексі було проведено дослідження в умовах станції і вокзалу Київ-Пасажирський. Результати таких досліджень подано у вигляді динамік розподілу кількості пасажирів, що прибувають по годинно (разом у міжрегіональному та приміському сполученні (рис. 2) і окремо у приміському сполученні (рис. 3)), та оцінено такі параметри: \bar{N} – середня годинна інтенсивність, σ – середньоквадратичне відхилення за час t та K_H – коефіцієнт нерівномірності.



$$(\bar{N} = 42967,7; \sigma = 1645,6; k_H = 1,2)$$



$$(\bar{N} = 21712,9; \sigma = 601,1; k_H = 1,1)$$

Аналіз динамік на рис. 2, 3 доводить існування так званого «ранкового» і «вечірнього» ефектів, коли кількість пасажирів збільшується приблизно на 20 %, а сам процес надходження пасажирів можна подати як хвилеподібний із різними амплітудами.

Для того щоб запобігти виникненню ефекту «натопу», доцільно синхронізувати функціонування елементів системи – залізнична станція, вокзал, привокзальна площа – відповідно до їхніх пропускних спроможностей. Для формалізації цього процесу сформовано оптимізаційну математичну модель із цільовою функцією такого вигляду:

$$F(t, n) = t_{\text{плат}} + t_{\text{вокз}} + t_{\text{прив. пл}} > \min \quad (3)$$

де t – час;

n – кількість пасажирів; $t_{\text{плат}}$ – час проходження пасажирів по платформі;

$t_{\text{вокз}}$ – час перебування пасажирів на вокзалі;

$t_{\text{прив. пл}}$ – час перебування пасажирів на привокзальній площі.

При цьому час між надходженням пасажирських поїздів, у тому числі приміських, $t_{\text{п}}$ має бути більшим,

ніж час проходження пасажирів по вокзалу:

$$t_{\Pi} \geq t_{\text{ВОКЗ}}. \quad (4)$$

Час підведення міського транспорту на привокзальну площу t_{MTP} має відповідати умові

$$t_{MTP} \leq t_{\text{ВОКЗ}}. \quad (5)$$

Також має виконуватись умова збереження пасажиропотоку

$$\int_0^{t_{\text{плат}}+t_{\text{вокз}}} t_{\text{пас}} \cdot \lambda(t) dt = \int_0^t t * \lambda_k(t) - N_{\text{пер}}, \quad (6)$$

де $N_{\text{пер}}$ – кількість пасажирів, які залишаються у будівлі вокзалу для пересадки на інші поїзди (транзитні пасажирів).

Тобто вирази (4)-(6) являють собою систему обмежень математичної моделі.

Найбільш критичними місцями у формулі (3) є час перебування пасажирів у будівлі вокзалу $t_{\text{пас}}$ і час їхнього знаходження на привокзальній площі $t_{\text{прив. пл.}}$.

З метою управління пасажиропотоками при їхньому переміщенні будівлею вокзалу доцільно використовувати теорію динаміки натовпу. Разом із тим складність формалізації руху пасажирських потоків на залізничному вокзалі визначається технічними (просторовими) параметрами будівлі вокзалу та нерівномірним характером у часі і просторі переміщення самих пасажиропотоків. Аналіз напрямів досліджень у сфері математичного моделювання динаміки руху потоків людей доводить, що їх можна поділити на макроскопічні в неперервному просторі, мікроскопічні в дискретному просторі та гібридні, які поєднують особливості і переваги двох попередніх типів моделей. Моделі макроскопічного рівня описують рух пасажирських потоків у цілому, наприклад на основі рівнянь газо- і гідродинаміки, які дають дуже наближені рішення. Моделі мікроскопічного рівня описують поведінку окремих пасажирів у потоці, тобто вони враховують соціальні зв'язки: іде пасажир окремо чи пасажир рухається групами (родина з дітьми і багажем тощо). Формування гібридних моделей потребує переходу від дискретного простору до неперервного. Для того щоб пасажиропотік узагалі рухався, навколо пасажирів має існувати зона комфорту, яку доцільно уявити як коло з радіусом 0,5-0,8 м залежно від групи, у якій рухається пасажир. Отже, дискретний простір переводиться в неперервний простір 2D (ординати (x, y)), де, як відомо, визначена операція диференціювання. Спираючись на вищенаведене, сформуємо модель руху пасажиропотоків гібридного типу.

З метою моделювання і організації процесу руху пасажирів уявімо, що кожне прибуття поїзда утворює хвилю пасажирів, яка розповсюджується будівлею

вокзалу з деякою швидкістю V . Ця хвиля може поступово загасати (зменшується амплітуда хвилі) і через такі фактори, як дифузія пасажирів усередині вокзалу або вихід їх із вокзалу на привокзальну площу. Тобто рух пасажирів по вокзалу пов'язаний з хвилями, що генеруються прибуттям нових поїздів. Для відтворення цього процесу сформуємо модель, у якій пасажиропотоки можна уявити як хвильові функції, і скористаємося хвильовим рівнянням, аналогічним рівнянню Шредінгера [5, 6].

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v \cdot \nabla^2 \psi - 2 \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (7)$$

де $\psi(x, t)$ – хвильова функція, що описує щільність (кількість пасажирів на вокзалі залежно від часу t і їхнього місцезнаходження $X_{(x,y)}$ – координати простору);

v – швидкість розповсюдження хвилі (швидкість руху пасажирів) при надходженні потяга;

$$\nabla^2 = l \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \text{оператор Лапласа, який}$$

описує розподіл пасажирів по будівлі вокзалу у форматі 2D.

α – коефіцієнт загасання, який може описувати зменшення амплітуди хвилі із часом.

Обмеженнями в моделі є просторові параметри будівлі вокзалу в плані. Розв'язок моделі подається у вигляді суми функції Бесселя і Неймана.

Таку модель доцільно використовувати для регулювання системи орієнтації пасажиропотоків на вокзалі задля зменшення часу перебування $t_{\text{вокз}}$ і запобігання створенню ефекту «натовпу».

З метою зменшення часу перебування пасажирів

на привокзальній площі тприв. пл запропоновано комплекс відповідних моделей – це моделі руху пасажирів по привокзальній площі та узгодження графіка підведення рухомого складу різних видів міського транспорту до залізничного пересадочного комплексу залежно від інтенсивності пасажиропотоку.

Ураховуючи фактори, яким надають перевагу пасажирів при виборі маршруту на привокзальній площі для пересадки на міський транспорт, – найкоротша відстань і відчуття дискомфорту біля перешкод, доцільно як модель руху пасажиропотоків обрати рівняння Ейконала [3].

Для зменшення часу очікування пасажирів прибуття бажаного виду міського транспорту, тобто синхронізації хвилеподібної інтенсивності пасажиропотоку з часом підведення і місткістю міського транспорту, доцільно використовувати моделі теорії розкладу (англ. *Schedule theory*) [4].

Запропонований комплекс математичних моделей для управління функціонуванням системи «залізнична станція, вокзал, привокзальна площа» може бути використаний для процесів посадки пасажирів у поїзди чи висадки з них. Інформаційно цей процес може бути організований у розподіленій системі підтримки прийняття рішень на автоматизованих робочих місцях персоналу залізничної станції, вокзалу та диспетчерського персоналу різних видів міського транспорту під керівництвом єдиного пасажирського інтермодального оператора на основі Internet/Intranet-технології.

Висновки

З метою підвищення надійності і комфорту залізничних пасажирських перевезень запропоновано перехід універсальних вокзалів у статус інтегрованих пасажирських пересадочних комплексів шляхом об'єднання в єдину віртуальну систему залізничної станції, залізничного вокзалу і привокзальної площі, де зосереджено зупинки міського транспорту. Як доводить аналіз по країнах ЄС, Великої Британії, США, Південної Кореї, Китаю тощо, такий перехід зменшує час перебування пасажирів у системі та запобігає створенню ефекту «неконтрольованого натовпу», якщо синхронізувати функціонування елементів системи.

Для оцінювання параметрів пасажиропотоків у такій системі проведено статистичні дослідження в умовах станції і вокзалу Київ-Пасажирський та отримано динаміки розподілу погодинної інтенсивності пасажирів, які прибули міжрегіональними і приміськими поїздами. Доведено існування «ранкового» і «вечірнього» ефектів, що призводить до збільшення інтенсивності пасажиропотоків приблизно на 20 %.

Сформовано оптимізаційну математичну модель функціонування такого інтегрованого пасажирського пересадочного комплексу при взаємодії з міським транспортом. Як цільову функцію обрано сумарний час перебування пасажирів на кожному елементі системи. Система обмежень включає умову збереження пасажиропотоку і технологічні параметри надходження

поїздів.

Для управління пасажиропотоками на елементах системи використано теорію динаміки натовпу. При цьому процес надходження і пересування пасажирів будівлею вокзалу подано як хвилеподібний, який генерується прибуттям кожного потяга. Для формалізації цього процесу запропоновано використання рівняння Шредінгера у форматі 2D, а обмеженням є план будівлі вокзалу. Використання такого підходу – це основа формування «розумної» системи орієнтації пасажирів на вокзалі, що зменшує час їхнього перебування в ньому.

Для управління пасажиропотоками на привокзальній площі запропоновано використання комплексу математичних моделей: моделі руху пасажирів до глобальної мети (зупинка міського транспорту) на основі рівняння Ейконала синхронізації інтенсивностей пасажиропотоків із часом підведення і місткістю міського транспорту на основі теорії розкладу.

Сформовано комплекс математичних моделей як основну СППР на АРМах відповідних працівників, запропоновано організувати на системі розподілених СППР під управлінням єдиного пасажирського інтермодального оператора.

Список використаних джерел

1. Торопов Б. І. Розвиток пасажирських комплексів на основі закономірностей формування пасажиропотоків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Київський ін-т залізничного транспорту Харківської держ. акад. залізнич. тр-ту. Київ, 2001. 21 с.
2. Wand W., Huand H. The Optimization Study on Passenger Organization at Passenger Station Based on CAS. Transportation Logistics Engineering Institution, HoHai University 210098, P.R. China PHD of Business School. 2007. DOI10.2991/iske.2007.166.
3. Бутько Т. В., Прохорченко А. В., Журба О. О. Формування моделі організації пасажиропотоків при здійсненні пересадки на залізничному вокзалі з використанням колективного інтелекту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2010. № 2. С. 57-61.
4. Журба О. О. Формування моделі узгодження графіка підводу рухомого складу різних видів транспорту до залізничного вокзалу. *Збірник*

наукових праць. Донецьк: Дон ІЗТ, 2010. Вип. 22. С. 62-68.

5. Schrodinger E. An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules. *Physical Review*. 1926. 28(6). P.1049-70. doi:10.1103/PhysRev.28.1049.

Abstract. The process of organizing passenger railway transportation requires increased attention, especially during the period of martial law in the country. One of the critical places in this process is the concentration of a significant number of passengers within the station and the station area, where transfers to other modes of transport take place. The analysis carried out for the countries of the EU, USA, South Korea, Great Britain, and China shows that the main trend in these countries is the transition of universal railway stations to integrated railway transfer complexes. Such a transfer complex performs the functions of combining various types of transport: railway, air, urban, suburban and ensures the fastest transfer of passengers, which prevents the effect of creating an uncontrolled crowd. In order to evaluate the parameters of passenger flows in the conditions of such a metropolis as Kyiv, studies were conducted, which are presented in the form of hourly dynamics of the distribution of the number of passengers transported together in interregional and suburban traffic, and the existence of «morning» and «evening» effects was proven. This causes an increase in the number of passengers and complicates flow management. For the transition of the Kyiv-Pasajyrskiy railway station to the status of an integral transfer complex, it is proposed to unite the railway station-station-station square into a single system, where city transport stops are concentrated, including the subway, under the management of a single intermodal passenger operator. In order to manage passenger flows in such a system, an optimization mathematical model with an objective function representing the sum of the times for the movement of passengers through each component of the system was formed. The system of restrictions contains the condition of maintaining the passenger flow and technological parameters regarding the time intervals of train arrivals.

Given that the most critical points in the system are the time passengers stay in the station building and the time they are on the station square, the crowd dynamics theory apparatus was used to manage passenger flows on these elements. The process of movement of passenger flows through the station building is represented as a wave process. At the same time, each train arrival creates a wave of passengers. To formalize this wave-like process, Schrödinger's wave equation in 2D format was used, and the plan of the station building acts as a limitation. This model should be used for the formation of a smart passenger orientation system at the train station. It is proposed to use a set of mathematical models to manage passenger flows at the station square, namely: to formalize the movement of passengers to city transport stops - the Eikonal equation, and to synchronize passenger flows with the time and capacity of city transport - timetable theory models.

The process of managing passenger flows at the

integrated transfer complex is proposed to be organized on the basis of the structure of distributed decision support systems (DSS) under the leadership of a single passenger intermodal operator.

Бутько Тетяна Василівна, д.т.н., професор, завідувач кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1082-599X.

Tetyana Butko, Doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1082-599X.

Кривич Артем Вікторович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: krivich.artem35@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-8910-4835.

Artem Kryvyich, master's student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: krivich.artem35@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-8910-4835.

Яцук Юрій Іванович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: topqrtent@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-1985-1181.

Yury Yashchuk, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: topqrtent@gmail.com. ID ORCID 0009-0006-1985-1181.

Гурин Дмитро Олександрович, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: dmmitrogurin@gmail.com. ID ORCID 0009-0009-1439-9407.

Dmytro Hurin, master's student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: dmmitrogurin@gmail.com. ID ORCID 0009-0009-1439-9407.

Жуковицький Ігор Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Електронні обчислювальні машини, Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.

Ihor Zhukovytskyi, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Dnipro Institute of Infrastructure and Transport, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.