

УДК 656.025.2

НАТУРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРИМІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

В. К. Мироненко, д-р техн. наук; **В. В. Габа**, канд. техн. наук;
В. І. Мацюк, канд. техн. наук; **Т. М. Грушевська**; **В. П. Костюшко**

tanya.grushevska@yandex.ua

Проаналізовано підхід пасажирів на приміську платформу, заповнення поїздів на конкретному напрямку. Отримано закономірності підходу пасажирів на платформу, темпи заповнення і завантаженість приміських поїздів. Отримані результати досліджень дають можливість здійснювати розрахунки важливих техніко-технологічних параметрів приміських перевезень пасажирів, а саме: інтервали між відправленням поїздів, завантаженість вагонів у поїздах приміського сполучення, визначення певної кількості турнікетів на відповідну кількість пасажирів, безпечність на платформі, підвищення зручностей та комфорту пасажирів. Розроблено математичну модель підходу пасажирів на приміську платформу для будь-якого пасажиропотоку та інтервалу між поїздами. Дана модель дозволяє просто та швидко розрахувати пасажиропотік у будь-який проміжок часу та оцінити заповнення поїзда пасажирами в заданий час t . Побудовано універсальну аналітичну модель, яка дає змогу описати заповнення платформи пасажирами для будь-якої завантаженості поїзда та інтервалу між поїздами, що є дуже важливим для організації процесу перевезення пасажирів.

Ключові слова: приміські пасажирські перевезення, пасажиропотік, завантаженість вагонів, технологія перевезень, інтервали відправлення поїздів, пасажиро-години очікування пасажирів.

In the article analyzed approach commuter passengers to platform, filling of trains on a specific direction, based on which received regularities the approach of passengers to platform, the rate of filling and habitability commuter train. The obtained results enable to carry out calculations of important technical and technological parameters suburban of transportations of passengers such as intervals between the departure of trains, habitability carriages in commuter trains, the definition of a number of turnstiles at the appropriate number of passengers, the safety on the platform, enhancing the convenience and comfort of passengers. Been developed the mathematical model the approach of commuter passengers to platform for any passenger flow and interval between trains. This model allows you to quickly and easily calculate passenger flow in any period of time and assess filling of train by passengers at a specified time t . Constructed a universal analytical model that can describe the filling of platform by passengers for any habitability train and interval between trains, that is very important for the organization of process of transportation of passengers.

Keywords: suburban passenger transportation, passenger traffic, habitability cars, transportation technology, intervals departure of trains, passenger-hours of waiting passengers.

Вступ

Зручність руху приміських поїздів є одним з основних якісних показників, що характеризує комфортність поїздки пасажирів і одночасно вимагає відповідного стану технічної готовності рухомого складу, наявності резерву рухомого складу, організації контролю за графіком руху.

Під час перевезення пасажирів у приміському сполученні будь-яким із конкуруючих видів транспорту найголовнішими якісними характеристиками є тривалість поїздки та комфортні умови, а також тривалість та умови очікування, що є вагомою частиною витрат загального часу подорожі.

Час очікування пасажирами приміських поїздів є внутрішнім резервом підвищення якості перевізного процесу. За інших рівних умов, час очікування залежить від інтервалу між поїздами, якщо тільки не йдеться про тактовий рух або про випадки, коли пасажир іде на вокзал на «звичний» для нього поїзд.

Отже, інтервал між прибуттям поїздів є одним із найважливіших технологічних чинників, який, однак, пов'язаний із іншими техніко-технологічними параметрами приміських перевезень, натурним та теоретичним дослідженням яких присвячена дана стаття.

Постановка проблеми та її зв'язки з науковими і практичними завданнями

У зв'язку з необхідністю підвищення конкурентоспроможності приміських пасажирських перевезень залізниця повинна забезпечити повне і якісне задоволення попиту населення на перевезення, подальше удосконалення інтервалів відправлення та дальності перевезень пасажирів. [2; 4; 5]. Це є одним із пріоритетних питань Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010–2019 рр. [1].

Існуючі підходи до пошуку раціонального забезпечення приміських перевезень дозволяють знаходити лише розподіл пасажиропотоків на мережі без належного урахування коливання

попиту в різні періоди доби, незважаючи на деталізацію до величини міжпоїздного інтервалу.

На основі виконаних досліджень (даних про підхід пасажирів на приміську платформу, заповнення поїздів) можна отримати закономірності підходу пасажирів на платформу, темпи заповнення і населеність приміських поїздів.

Для раціонального встановлення інтервалів між приміськими поїздами, визначення кількості турнікетів на відповідну кількість пасажирів, безпеку на платформі, підвищення зручностей, комфорту пасажирів необхідно проводити натурні дослідження часу приходу пасажирів на платформу, заповнення вагонів у поїздах приміського сполучення залежно від сезонності, рівня сервісу, якості наданих послуг, а також інтервалу відправлення і дальності перевезень пасажирів. При цьому натурні спостереження таких досліджень (які є досить трудомісткими і дорогими) повинні доповнюватись їх теоретичним узагальненням.

Пасажиропотік є визначальним фактором при виборі рухомого складу, інтервалів руху поїздів, характеристик інфраструктури, необхідної для обслуговування пасажирів та інших параметрів [3; 6]. Для того щоб мати уявлення про його закономірності, необхідно дослідити режим підходу пасажирів на платформу перед відправленням приміських поїздів, їх завантаженість і розробити адекватну математичну модель, а також визначити закономірності цього процесу для їх використання в практичних цілях.

Аналіз попередніх досліджень і виділення невирішених раніше аспектів проблеми, яким присвячена стаття

Дослідження та розроблення щодо ефективної організації приміських залізничних пасажирських перевезень проводяться постійно, але останнім часом у науково-практичній літературі згадуються все частіше, що зумовлено зростаючою актуальністю проблеми.

Найбільше робіт було присвячено питанням якості транспортних послуг, у тому числі вартісній оцінці часу, що витрачає пасажир та проїзд різними видами транспорту. Серед публікацій слід відзначити роботи таких авторів як О. П. Артинов, Т. В. Бутько, О. М. Гудков, Д. В. Константинов, Ф. П. Кочнев, Ю. Ф. Кулаєв, Н. В. Левадна, Д. В. Ломотько, Ю. О. Пазойський, Р. В. Панк, Л. С. Рябуха, П. В. Самарцев, В. І. Терзи, В. Г. Шубко та ін. [2; 3; 6].

Досвід функціонування приміського пасажирського транспорту в ринкових умовах свідчить про відчутне посилення конкуренції з боку автоперевізників завдяки оперативності їх реагування

на потреби населення. Це проявляється у гнучкому графіку та вищій інтенсивності руху, підвищенні комфортності транспортних засобів, зручному розташуванні зупинок у приміській зоні.

Слід визнати, залізничний транспорт за своєю природою не може вживати у відповідь аналогічних заходів. Тому в умовах, що склалися, адаптувати приміський пасажирський залізничний транспорт до вимог конкурентного середовища можливо, якщо використовувати його переваги в техніко-технологічних аспектах, які визначають загальний час, що витрачає пасажир на проїзд та умови, в яких перебуває пасажир під час проїзду в рухомому складі.

Основний матеріал досліджень з обґрунтуванням наукових результатів

Окрім загальновідомих особливостей приміських пасажирських перевезень (просторова і добова нерівномірність пасажиропотоку, масовість, невеликі відстані слідування), на сучасному етапі можна виділити такі особливості приміських перевезень:

1) залізниця взяла на себе частину міських перевезень пасажирів у великих міських агломераціях і, фактично, стала видом міського громадського транспорту;

2) критична нестача справного рухомого складу, його невідповідність сучасним умовам комфортного проїзду;

3) суттєве скорочення приміських пасажиропотоків на залізничному транспорті, зокрема за рахунок конкуренції з боку автомобільного транспорту, вимушене підвищення рівня залізничних тарифів, зменшення кількості поїздів у приміському сполученні.

За таких умов збільшується середній час очікування пасажиром приміського поїзда, що характеризує якість організації приміських перевезень.

За даними опитувань, у Київському залізничному вузлі більше 80 % пасажирів, які користуються послугами приміського залізничного транспорту, точно знають час відправлення поїздів. Тому можна припустити, що значна кількість пасажирів, знаючи розклад руху поїздів, приходять на платформу безпосередньо перед відправленням поїзда, створюючи додаткове навантаження на інфраструктуру, що перевищує середні розрахункові значення, а інакше кажучи — тісняву на платформах та незручності при посадці.

З метою більш глибокого вивчення цього процесу були проведені дослідження щодо надходження пасажирів на пункти зупину Тетерівському та Фастівському напрямках Київського залізничного вузла. Проводилися натурні спо-

стереження і хронометрувався час надходження пасажирів на платформу до моменту відправлення поїзда.

Спостереження показали, що у більшості випадків поява першого пасажирів на платформі зафіксована не раніше ніж за 35–40 хв до прибуття поїзда. Потім розраховувалася кількість пасажирів, які приходили на платформу, по п'ятихвилинних інтервалах до самого моменту відправлення поїзда.

Відносна похибка такого методу спостережень не перевищує 6 %. Характерні графіки надходження пасажирів на платформу подано на рис. 1, на якому як приклад показано три поїзди (три спостереження з інтервалами між поїздами 40, 25 і 8 хв відповідно).

Очевидно, що наведені на рис. 1, *а*, *б* та *в* криві статистичних розподілів мають одну й ту саму закономірність, хоча деякі відмінності теж є, тому ці дані потребують узагальнення за допомогою побудови теоретичних інтегральних кривих.

Для розрахунку інтегральної функції проводиться розрахунок площі кожної фігури, обмеженої вертикальними лініями [7; 8], що відповідають певним інтервалам часу, осі часу і графіком функції (рис. 2).

Після цього проводиться послідовне підсумовування всіх цих площин і нормування до 100 % часу і 100 % фактичної завантаженості поїзда на момент відправлення. В результаті отримуємо графіки інтегрального розподілу інтенсивності підходу пасажирів (рис. 3).

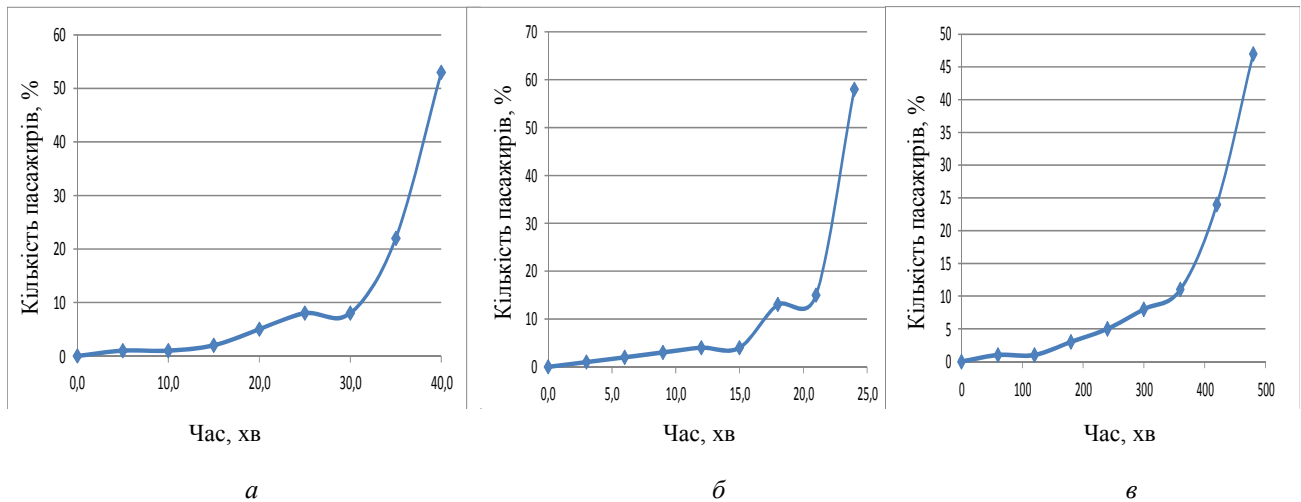


Рис. 1. Графік фактичного розподілу інтервалів підходу пасажирів на приміську платформу для різних інтервалів між поїздами: *а* — 40 хв; *б* — 25 хв; *в* — 8 хв

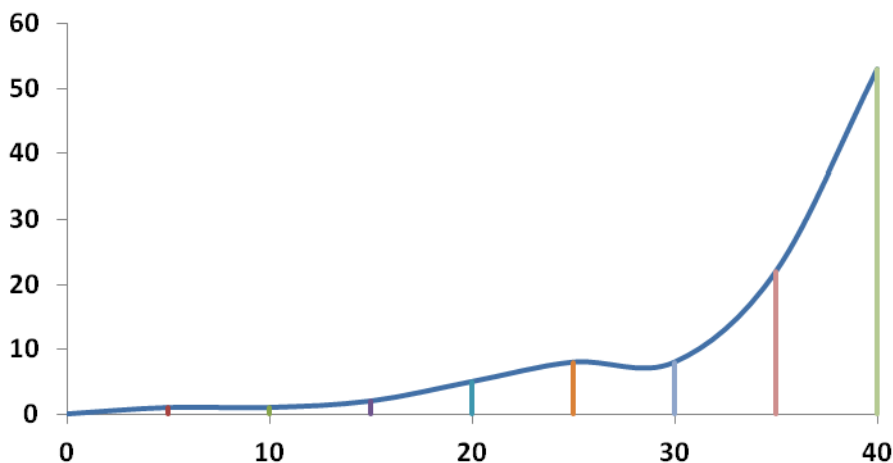


Рис. 2. Графік фактичного розподілу (принцип розрахунку інтегрального розподілу надходження пасажирів)

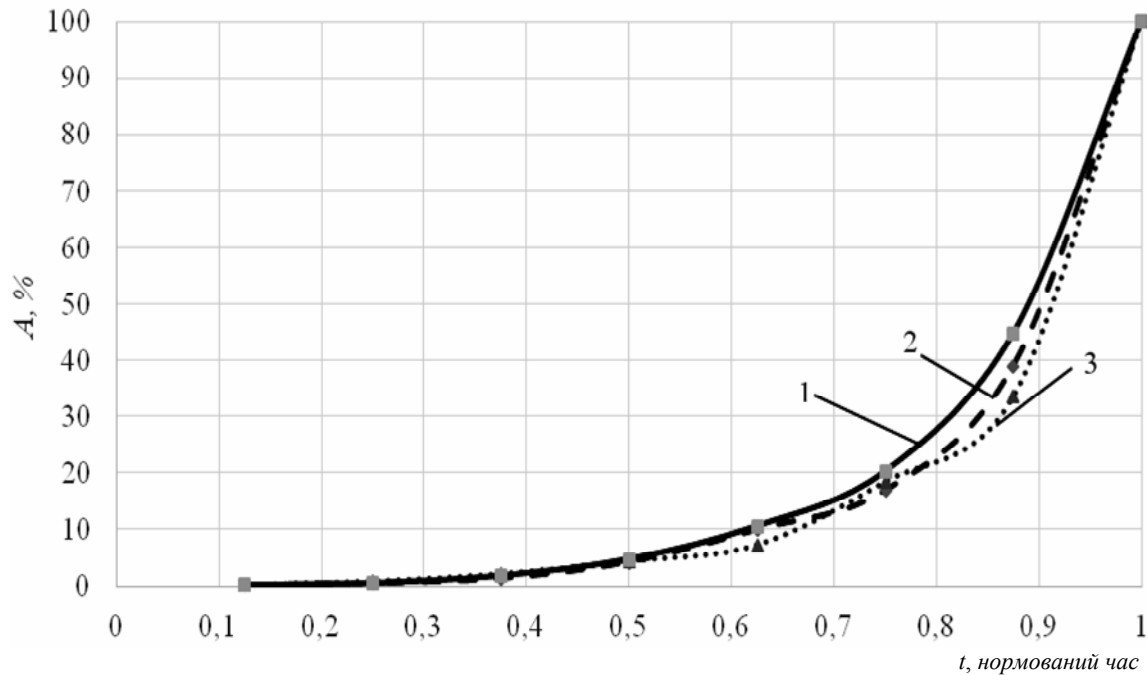


Рис. 3. Інтегральні криві розподілу інтервалів підходу пасажирів на платформу:
1 — інтервал між поїздами 8 хв; 2 — інтервал між поїздами 40 хв (у середньому за добу);
3 — інтервал між поїздами 25 хв

Як видно з графіка рис. 3, для усіх трьох поїздів, що відправлялися в різний час та мали різну завантаженість, характер зміни кривих, що відображають інтенсивність підходу пасажирів на платформу, однаковий.

На цих інтегральних кривих дуже виразно виділяються три періоди, в межах яких ця інтенсивність приблизно однакова. А саме, перший період — це початковий «повільний» період підходу пасажирів, він триває від 0 до 60 % від загального інтервалу між поїздами; другий період — середній «помірний» період пасажиропотоку (від 60 до 85 %), і третій період — це період максимального «інтенсивного» пасажиропотоку, який триває від 85 до 100 % тривалості інтервалу між поїздами.

Виділені три періоди тривають приблизно 60, 25 та 15% відповідно від інтервалу між послідовними відправленнями поїздів (міжпоїзний інтервал, нормоване значення якого дорівнює 100 %).

Така закономірність буде надалі використана разом з іще однією, яку можна помітити, розглядаючи криві на рис. 1.

Вона полягає в тому, що найбільший за тривалістю перший період «дає» найменшу кількість пасажирів, що надходять — лише 8–15 %, а другий — середню, 20–40 %; третій період, в якому процес надходження пасажирів найбільший дає решту 40–70 % пасажирів.

Отже, саме третій період є найбільш важливим, критичним у процесі підходу пасажирів та заповнення поїзда.

Наведені спостереження дозволяють запропонувати таку графічну модель для формалізації цього процесу (рис. 4).

Ця модель є узагальненою для надходження пасажирів із будь-яким інтервалом між поїздами. Враховуючи наведені вище дані та графік, будемо аналітичну залежність моделі. Для кожного з етапів визначається інтенсивність підходу пасажирів за формулою:

$$\lambda = \frac{A_i - A_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (1)$$

де i — номер етапу.

Порядок застосування формули (1) такий.

Наприклад, для першого етапу —

$$\lambda_1 = \frac{A_1 - A_0}{t_1 - t_0} = \frac{7,8 - 0}{60 - 0} = 0,13;$$

для другого етапу —

$$\lambda_2 = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} = \frac{30 - 7,8}{85 - 60} = 0,88;$$

для третього етапу —

$$\lambda_3 = \frac{A_3 - A_2}{t_3 - t_2} = \frac{100 - 30}{100 - 85} = 4,68.$$

Далі будемо узагальнені формули для математичної моделі:

$$A = \begin{cases} 0,13t, & \text{якщо } t = t_n, \text{ де } 0 < t_n < 60\%, \\ 0,88t, & \text{якщо } t = t_{\text{сеп}}, \text{ де } 60 < t_n < 85\%, \\ 4,68t, & \text{якщо } t = t_{\text{max}}, \text{ де } 85 < t_n < 100\%. \end{cases} \quad (2)$$

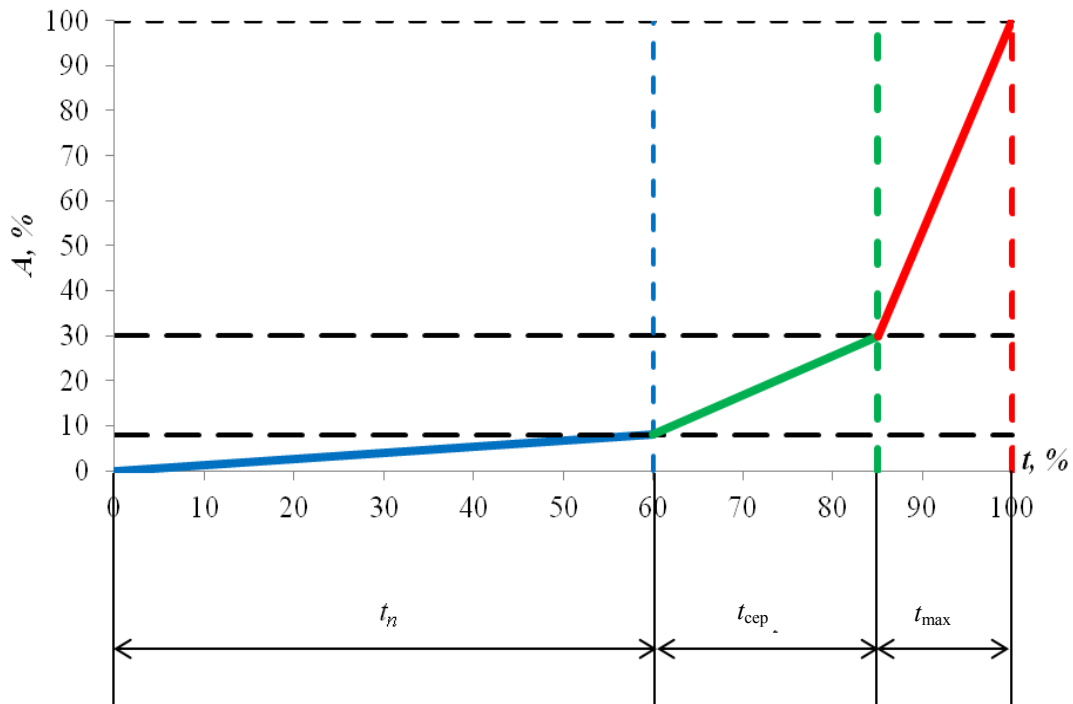


Рис. 4. Графічна модель підходу пасажирів на платформу

Таким чином, побудовано узагальнену лінійну модель підходу пасажирів на платформу для будь-якого пасажиропотоку та інтервалу між поїздами по трьох періодах.

Ця модель дозволяє просто та швидко розрахувати пасажиропотік у будь-який проміжок часу та оцінити заповнення поїзда пасажирями в заданий час t .

Подальші перетворення формул із застосуванням наведеної графічної моделі показують, що інтегральна крива заповнення поїзда пасажирями може бути апроксимована такою формулою:

$$A = \frac{t}{3Te^{((5,7t)/T)}} \quad (3)$$

де A — заповнення поїзда пасажирями (фактична завантаженість), %; T — інтервал між поїздами; t — поточний час.

На рис. 5 показано зіставлення реальної кривої розподілу та апроксимованої теоретичної кривої інтенсивності підходу пасажирів і заповнення поїзда. Як видно з рис. 5, задовільний збіг цих двох кривих дає змогу говорити про універсальну графіко-аналітичну модель розподілу інтервалів підходу пасажирів на платформу.

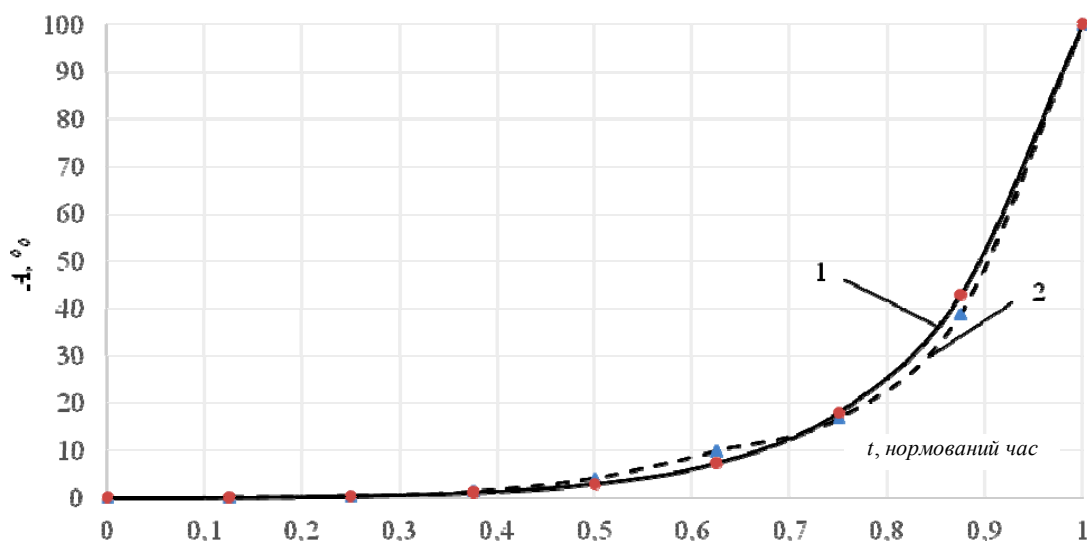


Рис. 5. Універсальна графіко-аналітична модель розподілу інтервалів підходу приміських пасажирів на платформу:

1 — крива експоненціального розподілу інтервалів підходу пасажирів;
2 — крива фактичного розподілу інтервалів підходу пасажирів

Із формули (3) можна одержати узагальнену модель, яка описує заповнення платформи для будь-якого інтервалу між поїздами T :

$$n = \frac{N(t, T)t}{300Te^{((5,7t)/T)}} \quad (4)$$

де n — кількість пасажирів, які прийшли на платформу за час t ; $N(t, T)$ — наповненість поїзда, пасажирів для відповідної пари значень часу (t, T) .

Слід зазначити, що на величину $N(t, T)$ впливає також пора доби (внутрішньодобова нерівномірність перевезень пасажирів), сезонність перевезень.

Таким чином, побудована універсальна аналітична модель дозволяє описати заповнення платформи пасажирями для будь-якої завантаженості поїзда та інтервалу між поїздами, що є дуже важливим для організації процесу перевезення пасажирів.

Дослідження показали, що на головній станції основна маса пасажирів (70–90 %) заповнює приміський поїзд протягом 15–20 хв до відправлення. Цей час включає в себе очікування обслуговування в касі, тривалість придбання квитка і час проходження від квиткових кас до посадки пасажирів в поїзд, причому пасажир може зайняти місце для інших (своїх знайомих), які підійдуть згодом, зазвичай, перед самим відправленням.

Ще 20–40 % пасажирів приходять на платформу за 5–10 хв до відправлення, а в останні хвилини (буває й секунди) займають місце ті пасажирів, для яких вони були «притримані» їх знайомими.

Підхід (потік) пасажирів — це випадкова величина, яка коливається в значних межах протягом періоду руху приміських поїздів і залежить від розкладу їх руху, роботи наземного транспорту, метро, їх місткості. [4; 6]. Кількість надходження пасажирів на пасажирську платформу є змінною випадковою величиною.

Якщо інтенсивність приходу пасажирів на платформу, швидкість її заповнення перевищують інтенсивність відправлення пасажирів поїздами, то на платформі створюється скупчення, тіснява, погіршуються умови перебування там пасажирів, виникає загроза їх безпеці. Спостереження показують, що максимуму ці скупчення і тіснява сягають саме перед прибуттям (подачею) поїзда на посадку, що загрожує падінням пасажирів чи предметів на колії. Як цьому запобігти? Привести у відповідність інтенсивність прибуття пасажирів на платформу та інтенсивність їх відправлення поїздами з платформи. Розглянемо, від чого залежить інтенсивності цих процесів.

Тривалість періоду заповнення платформи пасажирями, що будуть відправлятися найближчим поїздом о певній порі доби t (очікування поїзда на платформі), T_t , дорівнює:

$$T_t = \frac{a_F F}{\Lambda_t}, \quad (5)$$

де a_F — кількість пасажирів на 1 м^2 пасажирської платформи (максимально $a_F \approx 3\text{--}4$ пасажирів на 1 м^2); F — площа пасажирської платформи, м^2 ; Λ_t — інтенсивність пасажиропотоку, що надходить на платформу о порі доби t (ця інтенсивність є максимальною в години «пік»);

$$\Lambda_t = \frac{A_t k}{J_t - t_0}, \quad (6)$$

де A_t — середня інтенсивність пасажиропотоку о порі доби t , пасажирів за год; J_t — інтервал між поїздами, год; t_0 — неінтенсивний період підходу пасажирів, що включає «повільний» та «помірний» періоди (див. рис. 4), год; k — коефіцієнт, що враховує допустиму перевантаженість вагонів порівняно з їх номінальною пасажиромісткістю (до 1,4).

Площу пасажирської платформи F необхідно пов'язати з параметрами рухомого складу таким чином.

$$F = LB \quad (7)$$

де L — довжина платформи, м; B — ширина платформи, м.

У свою чергу,

$$L \geq m_b l_b, \quad (8)$$

де m_b — кількість вагонів в складі поїзда; l_b — довжина вагона по осях автозчеплення, м;

Після цього можна визначити середній час очікування поїзда τ_{0t} пасажиром о порі доби t , якщо пасажир не знає розкладу і прийшов на платформу навмання:

$$\tau_{0t} = \frac{J_t}{2}. \quad (9)$$

де J_t — інтервал між поїздами;

$$J_t \leq T_t \quad (10)$$

T_t — тривалість періоду заповнення платформи

$$J_t \leq \frac{a_F F}{A_t k} (J_t - t_0). \quad (11)$$

Після перетворень отримаємо

$$J_t \leq \frac{1}{1 - \frac{a_F m_b l_b B}{A_t k}}, \quad (12)$$

причому повинна виконуватись умова $A_t < a_F F$,

звідки $F > \frac{A_t}{a_F}$ (що очевидно).

Для практичного застосування формули (12) слід врахувати, що фактична площа платформи, як правило, менша за розрахункову F , зокрема через те, що на платформі можуть розміщуватися не тільки лавки для сидіння, але й турнікети для проходу пасажирів, кіоски, інші комерційні об'єкти. Тому, у разі браку площі для безпечного та зручного перебування пасажирів при посадці в поїзди та в його очікуванні, кількість таких об'єктів слід обмежувати.

Висновок

Отримані результати досліджень дають можливість здійснювати комплексні, системно пов'язані розрахунки важливих техніко-технологічних параметрів приміських перевезень пасажирів, а саме параметрів графіка руху поїздів, їх складу та характеристик вагонів, з параметрами інфраструктури приміського господарства, зокрема розмірами пасажирських платформ, кількістю та розташуванням на них турнікетів, обмеженнями на комерційне використання їх площ, за умов забезпечення зручної та безпечної посадки пасажирів у поїзди.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки від 16 грудня 2009 року №.* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: 1390 <http://www.uz.gov.ua/>.
2. *Артынов А. П.* Пригородные пассажирские перевозки / А. П. Артынов, Н. У. Дмитриев. — М. : Транспорт, 1985. — 161 с.
3. *Совершенствование* пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте / А. А. Колесов, Б. А. Таулин, И. Н. Шапкин, В. Г. Шубко. — М. : Транспорт, 1991. — 142 с.
4. *Боровикова М. С.* Организация движения на железнодорожном транспорте / М. С. Боровикова. — М. : Маршрут, 2003. — 368 с.
5. *Буцько Т. В.* Удосконалення технології організації приміських перевезень / Т. В. Буцько, Д. В. Константинов // зб. наук. праць. — Харків : УкрДАЗТ, 2009. — Вип. 102. — С. 15–23.
6. *Пазойский Ю. О.* Организация пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте (в примерах и задачах) / Ю. О. Пазойский, Л. С. Рябуха, В. Г. Шубко. — М. : Транспорт, 1991. — 240 с.
7. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М. : Высш. шк., 2002. — 575 с.
8. *Вентцель Е. С.* Задачи и упражнения по теории вероятностей: учеб. пособие для студ. ВУЗ / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 5-е изд., испр. — М. : Академия, 2003. — 448 с.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2014.