

Василенко Т.Є., к.е.н., Фесенко Д.В., Гулак Д.В.

АДІ ДВНЗ «ДонНТУ», м. Горлівка

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗУПИННОГО ПУНКТУ

*Проведено аналіз існуючих методів оцінки пропускної здатності зупинних пунктів. Виявлено чинники, що впливають на пропускну здатність зупинного пункту: очікування в черзі на обслуговування перед зупинним пунктом, обслуговування та звільнення зупинного пункту, які будуть оцінюватися за допомогою регресійного аналізу та моделювання часу знаходження автобуса на зупинному пункті.*

### Вступ

Збільшена інтенсивність руху транспортних засобів, різних за місткістю і технічним станом, спричиняє виникнення затримок як на вулично-дорожній мережі, так і в районі зупинних пунктів. Пов'язано це з тим, що рівень пропускної здатності зупинних пунктів закладався при формуванні вулично-дорожньої мережі міст і не відповідає фактичній інтенсивності руху. У зв'язку з цим, оцінка реальної пропускної здатності зупинного пункту і розробка заходів щодо її оптимізації є актуальним завданням.

### Аналіз останніх публікацій

Аналіз вітчизняної і закордонної літератури дозволив встановити, що існують три методи визначення пропускної здатності [1, 2, 3].

У роботі І.Н. Пугачова [1] представлено метод, який дозволяє визначити пропускну здатність (ПЗ) зупинного пункту (ЗП) протягом години, *од./год.*:

$$P_o = \frac{3600}{\sum t_1 + \sum t_2 + \sum t_3 + \sum t_4}, \quad (1)$$

де  $\sum t_1$  — час, що витрачається на розгін транспортного засобу з початком руху із зупинки, *с.*;

$\sum t_2$  — час гальмування перед зупинкою, *с.*;

$\sum t_3$  — час простою на зупинному пункті, необхідний для входу та виходу пасажирів, *с.*;

$\sum t_4$  — час необхідний для відкриття і закриття дверей, *с.* (для системи з пневматичним приводом приймається 1,5-2 *с.*).

Перевагою цього методу є простота розрахунків, недоліком — відсутність обліку декількох місць для зупинки автобусів і впливу світлофорного об'єкта (за його наявності) на час звільнення ЗП. Також слід зазначити, що велика частина параметрів, які визначають пропускну здатність ( $t_4$  — час необхідний для відкриття і закриття дверей,  $l_b$  — відстань безпеки між транспортними засобами, що під'їжджають до зупинного пункту,  $j$  — прискорення під час розгону,  $i$  — уповільнення під час гальмування,  $K_{cm}$  — коефіцієнт змінності пасажирів на зупинному пункті,  $t_{пв}$  — час, що витрачається одним пасажиром на вхід і вихід), мають нормативні і рекомендовані значення і не відповідають змінним умовам перебування автобуса на ЗП.

Визначення пропускної здатності також можливо за допомогою системи масового обслуговування СМО [2]. У цьому випадку зупинний пункт слід розглядати як одноканальну СМО з обмеженою чергою, а автобуси як заявки. Черга може утворюватися до найближчого

перехрестя і тому число постів очікування обмежене. Зупинний пункт може знаходитися в станах  $S_0$  (ЗП вільний, немає жодного автобуса),  $S_1$  (ЗП зайнятий, черги немає),  $S_2$  (ЗП зайнятий, у черзі один автобус),  $S_3$  (ЗП зайнятий, у черзі два автобуси) і так далі. Граф станів показано на рисунку 1.

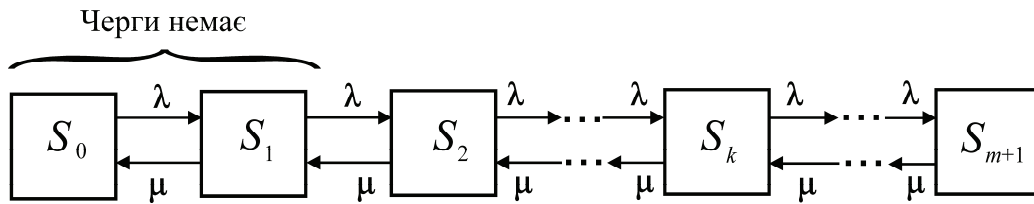


Рис. 1. Граф станів системи:

$\lambda$  — інтенсивність потоку заявок,  $од/год$ ;  $\mu$  — інтенсивність потоку обслуговування,  $од/год$ ;  $m$  — кількість постів очікування

Відносна пропускна здатність ЗП  $Q$  — це відношення середньої кількості автобусів, що обслуговуються в одиницю часу, до середньої кількості автобусів, що прибули на ЗП за цей час. Згідно цього методу вона визначається за формулою:

$$Q = 1 - P_{отк}, \quad (2)$$

де  $P_{отк}$  — вірогідність відмови в обслуговуванні автобуса, яка визначається за формулою:

$$P_{отк} = \rho^{1+m} \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}}. \quad (3)$$

Абсолютна пропускна здатність ЗП — це середня кількість автобусів, що можуть бути обслуговані за певний час. Визначається за формулою (4):

$$A = \lambda \cdot Q. \quad (4)$$

Переваги і недоліки другого методу, заснованого на (2), (4), такі як у першого, за винятком того, що значення параметрів часу обслуговування приймають фактичними, тобто відповідними реальним умовам перебування автобуса на ЗП.

За методикою, запропонованою в керівництві НСМ 2000 [3], пропускна здатність ЗП розраховується за формулою:

$$B_s = N_{eb} \cdot B_{bb} = N_{eb} \cdot \frac{3600 \cdot \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\frac{g}{C}\right) \cdot t_d + z_a \cdot c_v \cdot t_d}, \quad (5)$$

де  $B_s$  — пропускна здатність усього зупинного пункту,  $од/год$ ;

$N_{eb}$  — кількість місць для зупинки транспорту;

$B_{bb}$  — пропускна здатність одного зупинного місця,  $од/год$ ;

$g$  — тривалість горіння зеленого сигналу для руху,  $с$ ;

$C$  — тривалість циклу регулювання,  $с$ ;

$t_c$  — час звільнення зупинного пункту,  $с$ ;

$t_d$  — час перебування на зупинному пункті,  $с$ ;

$z_a$  — коефіцієнт вірогідності зростання черги перед зупинним пунктом. Визначається за формулою:

$$z_a = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_d - \bar{t}_d)}{c_v \cdot \bar{t}_d}, \quad (6)$$

де  $\bar{t}_d$  — середній час перебування на зупинному пункті, с;

$n$  — кількість спостережень часу перебування на ЗП;

$c_v$  — коефіцієнт варіації інтервалів прибуття. Визначається за формулою:

$$c_v = \frac{1}{\bar{I}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(I_i - \bar{I})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

де  $I_i$  — інтервал часу між прибуттям автобусів на ЗП, хв.;

$\bar{I}$  — середній інтервал, хв.

Перевагою цього методу, в порівнянні з першим (1), є те, що він враховує більшу кількість чинників таких як: варіацію інтервалів прибуття автобусів (оцінюється коефіцієнтом варіації) і світлофорне регулювання (оцінюється параметрами циклу світлофорного регулювання). При цьому значення параметрів приймаються не нормативні, а розраховуються для конкретного ЗП, який розташований перед світлофорним об'єктом. Також цей метод враховує наявність декількох місць для зупинки транспорту.

Недоліком є те, що пропускна здатність щодо цієї залежності виходить не годинна (як вказано у визначенні), а скорегована на час фактичної можливості здійснювати рух (за наявності світлофорного об'єкта).

Для порівняння було проведено розрахунок пропускної здатності ЗП за допомогою вищеперелічених методів. З цією метою було обстежено ЗП «ГД Веста», на якому були отримані вихідні дані для проведення розрахунків. Спостереження за параметрами вказаних залежностей здійснювалися протягом трьох днів з 9 до 10 години.

Під час розрахунку пропускної здатності за першим методом отримали:

$$P_o = \frac{3600}{\sum t_1 + \sum t_2 + \sum t_3 + \sum t_4} = \frac{3600}{5,66 + 2,08 + 3,54 + 1,5} = 282 \text{ од/год.}$$

Пропускна здатність ЗП, розрахована за першим методом складає 282 од/годину, коли фактичне значення, отримане під час спостереження, дорівнює 58 од/годину. Набуте значення ПЗ значно перевищує реальне, оскільки більшість параметрів, які використовуються для розрахунків, мають не фактичне значення, а нормативне. Внаслідок чого виникає завищення значення ПЗ.

Під час розрахунку пропускної здатності ЗП за другим методом отримали:

$$P_{omk} = \rho^{1+m} \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}} = 1,25^{1+4} \frac{1-1,25}{1-1,25^{4+2}} = 0,271;$$

$$Q = 1 - P_{omk} = 1 - 0,271 = 0,729;$$

$$A = \lambda \cdot Q = 44 \cdot 0,729 = 32 \text{ од / год.}$$

Пропускна здатність, розрахована за другим методом, має значення менше, ніж отримане в результаті обстеження ЗП. Це пов'язано з тим, що автобуси не чекаючи черги, виконують посадку та висадку пасажирів поза зупинним пунктом, що у свою чергу є порушенням правил дорожнього руху.

Під час розрахунку за третім методом ПЗ дорівнює:

$$B_{bb} = \frac{3600 \cdot \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\frac{g}{C}\right) \cdot t_d + z_a \cdot c_v \cdot t_d} = \frac{3600 \cdot \left(\frac{30}{50}\right)}{8 + \left(\frac{30}{50}\right) \cdot 103 + 2,77 \cdot 0,091 \cdot 103} = 23 \text{ од/год.}$$

Причиною невеликого значення пропускної здатності даного ЗП є те, що автобус, який завершив посадку-висадку пасажирів, не залишає ЗП, а чекає «випадкового» пасажирів. Фактично, за результатами спостережень, час знаходження автобуса на ЗП знаходиться в інтервалі 20-40 секунд.

Встановлено, що існуючі методи оцінки за часом обслуговування на зупинному пункті, не відповідають реальним умовам знаходження автобусів на ЗП, а результати не порівнянні між собою.

Тому *метою статті* є вдосконалення існуючих методів оцінки пропускної здатності зупинного пункту.

### **Основний матеріал**

Для вирішення поставленого завдання, наведемо визначення пропускної здатності і проаналізуємо існуючі методи її визначення.

Пропускна здатність ЗП — це максимальна кількість транспортних засобів, яку може пропустити ЗП за одиницю часу (зазвичай за 1 годину)[1].

Тому постає необхідність запропонувати оцінку ПЗ ЗП, яка відображала б реальні час і умови знаходження автобусів на зупинних пунктах.

У даний час враховуються наступні чинники, які впливають на пропускну здатність зупинного пункту: гальмування перед зупинним пунктом, відкриття дверей, висадка пасажирів, посадка пасажирів, закриття дверей і розгін. Ці чинники можна об'єднати в дві групи. До першої групи відносяться чинники, що характеризують знаходження автобуса на зупинному пункті. Це відкриття дверей, висадка пасажирів, посадка пасажирів, закриття дверей. А до другої, чинник, що характеризує звільнення зупинного пункту, — розгін автобуса.

Дамо характеристику кожному чиннику і виконаємо аналіз доцільності їх використання при оцінці ПЗ ЗП:

- час гальмування визначається на основі нормативного уповільнення і безпечної відстані між автобусами. При цьому важко визначити момент початку гальмування автобуса, знаходячись на зупинці. Тому даний чинник враховувати не доцільно;

- час знаходження в черзі перед ЗП залежить від вірогідності зростання черги і варіації інтервалів прибуття. Цей чинник необхідно враховувати, оскільки утворення черг в даний час дуже часто зустрічається перед ЗП;

- час відкриття і закриття дверей залежить від типу їх приводу. Значення його знаходяться в інтервалі 0,8-1,2 секунди. Тому облік даного часу для використання оцінки ПЗ є не доцільним;

- час висадки та посадки пасажирів залежить від пасажирообміну зупинного пункту. Характеризується кількістю пасажирів, що входять та виходять. Даний чинник є дуже важливим, проте показник, що його характеризує, приймається нормативним і не враховує фактичний пасажирообіг. Тому використання даного чинника доцільне, але за умови, що переглядається його показник;

- час розгону автобуса під час відправлення із зупинного пункту залежить від тяговошвидкісних характеристик рухомого складу, який експлуатується на маршруті. Даний чинник враховувати недоцільно, оскільки під час відправлення автобуса з ЗП не завжди є мож-

ливість реалізувати нормативне прискорення через значну інтенсивність на крайній правій смузі. Тому автобусу доводиться поступово вливатися в потік;

– час звільнення автобусом ЗП залежить від інтенсивності по крайній правій смузі. Приймаються нормативні значення часу звільнення, які не апробовані в умовах руху міст України. Даний чинник необхідно враховувати, зважаючи на умови руху по ВДМ міст;

– час затримки автобуса перед світлофором залежить від долі горіння дозволяючого сигналу світлофора. Використання даного чинника недоцільне, оскільки в м. Горлівка налічується лише декілька ЗП (3-4), що задовольняють дані вимоги.

На основі аналізу встановили, що представлених чинників недостатньо для адекватної оцінки пропускну здатності зупинного пункту. Для набуття достовірних значень ПЗ ЗП необхідно враховувати наступні чинники:

– час очікування автобуса в черзі на обслуговування перед ЗП. Цей час залежить від наявності на ЗП іншого автобуса, внаслідок чого витрачається час на чекання в черзі. Характеризується інтенсивністю руху МПТ;

– час висадки та посадки пасажирів. Цей час залежить від фактичної кількості пасажирів, що вийшли та увійшли. Необхідно набувати реальних, а не нормативних значень часу висадки і посадки пасажирів;

– час, що витрачає автобус на вливання в потік. Під час відправлення із зупинки, автобус чекає відповідний інтервал між автомобілями для входження в потік. Цей час залежить від інтенсивності руху по крайній правій смузі. Дані показники будуть використані для оцінки пропускну здатності зупинного пункту.

Пропонується оцінювати пропускну здатність на підставі наступних факторів: знаходження на зупинному пункті й звільнення зупинного пункту.

Якщо вважати, що кожний пасажир витрачає однаковий час на посадку та вихід, а підвищення часу пов'язане із знаходженням на зупинному пункті інших автобусів вважати пропорційним кількості автобусів, то залежність часу знаходження можна оцінити за допомогою наступної лінійної моделі:

$$Y = A + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2, \quad (8)$$

де  $Y$  — час знаходження автобуса на ЗП. Складається з часу очікування в черзі на обслуговування та часу знаходження (обслуговування);  $A$  — вільний член регресії;  $B_{1,2}$  — коефіцієнти регресії;  $X_{1,2}$  — показники, які впливають на функцію відгуку: час очікування в черзі на обслуговування; час обслуговування пасажирів, тобто час з миті повної зупинки транспортного засобу до миті початку руху.

Рівняння регресії оцінюватимуться найбільш поширеними критеріями:  $R$  — множинний коефіцієнт кореляції;  $R^2$  — скорегований коефіцієнт детермінації;  $t$  — критерій Стьюдента;  $F$  — критерій Фішера-Снедекора.

Звільнення зупинного пункту буде оцінюватися на основі моделювання часу звільнення автобусом зупинного пункту, тобто часу з миті початку руху транспортного засобу до миті вливання в загальний транспортний потік.

Оскільки інтервали між автомобілями є випадковими, то час звільнення при кожній фіксованій довжині смуги розгону також буде випадковим.

Уведемо наступні позначення:

$T$  — час очікування — випадкова величина;

$t$  — значення часу очікування;

$t_i$  — інтервал між  $i$ -м та  $(i+1)$ -м автомобілем;

$\tau$  — необхідний інтервал — це час потрібний автобусу для розгону до швидкості транспортного потоку. Оцінюємо на основі статистичних даних для кожного типу автобуса.

Вірогідність того, що час звільнення  $T$  не перевищить деякого значення  $t$  дорівнює:

$$\begin{aligned}
F(t) = P(T < t) = & P(t_1 > \tau) + \\
& + P(t_1 < \tau; t_2 > \tau; t_1 < t) + \\
& + P(t_1 < \tau; t_2 < \tau; t_3 > \tau; t_1 + t_2 < \tau) + \\
& \dots + \\
& + P(t_1 < \tau; t_2 < \tau \dots, t_n < \tau; t_{n+1} > \tau; \sum_{i=1}^n t_i < t).
\end{aligned}
\tag{9}$$

Перший доданок в цій сумі відповідає випадку, коли між першими двома автомобілями інтервал не менше необхідного, другий — коли необхідний інтервал між другим і третім автомобілями і так далі.

Кількість доданків у цій сумі обмежена внаслідок того, що інтервал між автомобілями не може бути менше деякого безпечного, тому:

$$n = \left[ \frac{t}{t_{\min}} \right], \tag{10}$$

де  $t_{\min}$  — мінімальний інтервал між автомобілями допустимий за умовами безпеки руху. Він визначається як проміжок часу необхідний автомобілю для зупинки під час екстреного гальмування:

$$t_{\min} = t_p + t_c + t_n + t_{ycm}, \tag{11}$$

де  $t_p$  — час реакції водія;

$t_c$  — час спрацювання гальмівної системи;

$t_n$  — час наростання уповільнення;

$t_{ycm}$  — проміжок часу, в якому уповільнення постійне.

При вільних умовах руху у транспортному потоці, коли швидкість руху автомобіля визначається не під впливом сусідніх автомобілів, можна припустити, що інтервали є незалежними, тому кожен з доданків у виразі (10) можна представити як множення вірогідності відповідних подій, наприклад:

$$\begin{aligned}
& P(t_1 < \tau; t_2 < \tau \dots, t_n < \tau; t_{n+1} > \tau; \sum_{i=1}^n t_i < t) = \\
& = P(t_1 < \tau) \cdot P(t_2 < \tau) \cdot P(t_n < \tau) \cdot P(t_{n+1} > \tau) \cdot P(\sum_{i=1}^n t_i < t).
\end{aligned}
\tag{12}$$

Якщо з урахуванням [4] припустити, що інтервали мають нормальний розподіл з однаковими математичними очікуваннями  $\mu$  і дисперсіями  $\sigma^2$ , то позначаючи інтегральну функцію нормального розподілу через  $\Psi(t, \mu, \sigma^2)$  і користуючись тим фактом, що сума нормальних величин має також нормальний розподіл з математичним очікуванням і дисперсією рівними сумі відповідних математичних очікувань і дисперсій отримаємо:

$$\begin{aligned}
P(t_1 + t_2 < t) &= \Psi(t, 2\mu, 2\sigma^2), \\
&\dots \\
P(\sum_{i=1}^n t_i < t) &= \Psi(t, n\mu, n\sigma^2).
\end{aligned}
\tag{13}$$

Оскільки, на відміну від нормальної випадкової величини інтервали не можуть бути менше деякого значення, то пропонується використовувати як функцію розподілу інтервалів урізаний нормальний розподіл, при якому виконуються наступні умови:

$$\begin{aligned} 1) \Psi^*(t_{\min}, \mu, \sigma^2) &= 0; \\ 2) \Psi^*(\infty, \mu, \sigma^2) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Як бачимо функція  $\Psi^*$  має ці властивості:

$$\Psi^*(t, \mu, \sigma^2) = \frac{\Psi(t, \mu, \sigma^2) - \Psi(t_{\min}, \mu, \sigma^2)}{1 - \Psi(t_{\min}, \mu, \sigma^2)}, \quad (15)$$

де  $\Psi(t, \mu, \sigma^2)$  — інтегральна функція нормального розподілу із параметрами  $\mu$  та  $\sigma^2$ .

Після заміни усіх вірогідностей у формулі (9) на урізану функцію нормального розподілу, функція розподілу часу звільнення може бути представлена у наступному вигляді:

$$F(t) = a_0 \left( \sum_{i=1}^n a_i(t) \cdot x^i + 1 \right), \quad (16)$$

де  $a_0 = 1 - \Psi^*(\tau, \mu, \sigma^2)$ ;

$$x = \Psi^*(\tau, \mu, \sigma^2);$$

$$a_i = \Psi^*(t, i\mu, i\sigma^2).$$

На основі даної функції можна побудувати різні критерії якості роботи пасажирського транспорту, такі як:

– середній час звільнення:

$$M(\tau, \mu) = \int_0^{\infty} f(t, \tau, \mu) dt, \quad (17)$$

де  $f(t, \tau, \mu)$  — похідна функції  $F(t)$ ;

– долі автобусів  $p$ , час звільнення яких не перевищить деякої величини  $t_{зв}$ , яка визначається шляхом розв'язання рівняння:

$$F(t_{зв}, \tau, \mu) < p.$$

Ці критерії згодом можуть бути використані під час вибору оптимального типу рухомого складу пасажирського транспорту і під час проектування зупинних пунктів.

Визначивши час знаходження автобуса на зупинному пункті та час його звільнення, оцінимо пропускну здатність за наступною формулою:

$$\Pi = \frac{3600}{T_{знах.} + T_{зв.}}, \quad (18)$$

де  $T_{знах.}$  — час знаходження автобуса на зупинному пункті, отриманий за (8);

$T_{зв.}$  — час звільнення автобусом зупинного пункту, отриманий за (17).

### **Висновки**

Таким чином чинники, які впливають на пропускну здатність зупинного пункту (очікування в черзі на обслуговування перед зупинним пунктом, обслуговування та звільнення зупинного пункту), будуть оцінюватися за допомогою регресійного аналізу та моделювання часу знаходження автобуса на зупинному пункті. Результатом роботи є уточнена формула визначення пропускну здатності зупинного пункту.

### *Список літератури*

1. Пугачёв И.Н. Организация и безопасность движения: учеб. пособие/ И.Н. Пугачёв. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. тех. ун-та, 2004. —232 с.
2. Просветов Г. И., Математические методы в логистике: учебно-методическое пособие.— М.: Издательство РДЛ, 2006. — 272 с.
3. Highway Capacity Manual 2000 // Transportation Research Board, National Research Council. — Washington, D.C., 2000. — 1134p.
4. Маркуц В.М. Транспортные потоки автомобильных дорог и городских улиц/ В.М. Маркуц. — Тюмень, 1988. — 103 с. — Режим доступа до книги: <http://markuts-v.narod2.ru>

Рецензент: к.т.н., доц., О.М. Дудніков, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»

Стаття надійшла до редакції 27.09.10

© Василенко Т.Є., Фесенко Д.В., Гулак Д.В., 2010