

УДК 656.072

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА МІНІМАЛЬНИХ ТА МАКСИМАЛЬНИХ ВИТРАТ ЧАСУ ПАСАЖИРІВ НА ЗУПИНЦІ МІСЬКОГО МАРШРУТУ

**П.Ф. Горбачов, професор, д.т.н., О.В. Макарічев, доцент, к.ф.-м.н.,
О.В. Россолов, доцент, к.т.н., Є.В. Любий, доцент, к.т.н.,
В.М. Чижик, аспірант, ХНАДУ**

Анотація. Наведено постановку задачі визначення середнього часу очікування пасажирів транспортних засобів на міських зупинках та результати аналітичного моделювання цієї величини при невідомому пасажирам розкладі руху та двох варіантах організації роботи рухомого складу на маршруті.

Ключові слова: час очікування, інтервал руху, аналітична модель, зупиночний пункт, транспортний засіб, маршрут.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ ПАССАЖИРОВ НА ОСТАНОВКЕ ГОРОДСКОГО МАРШРУТА

**П.Ф. Горбачев, профессор, д.т.н., А.В. Макаричев, доцент, к.ф.-м.н.,
А.В. Россолов, доцент, к.т.н., Е.В. Любый, доцент, к.т.н.,
В.М. Чижик, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. Приведена постановка задачи определения среднего времени ожидания пассажиров транспортных средств на городских остановках и результаты аналитического моделирования этой величины при неизвестном пассажирам расписании движения и двух вариантах организации работы подвижного состава на маршруте.

Ключевые слова: время ожидания, интервал движения, аналитическая модель, остановочный пункт, транспортное средство, маршрут.

ANALYTICAL ESTIMATION OF MINIMUM AND MAXIMUM TIME EXPENDITURES OF PASSENGERS AT AN URBAN ROUTE STOP

P. Gorbachov, Professor, Doctor of Technical Science, O. Makarychev, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Science, O. Rossolov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, E. Liubyy, Associate Professor, Candidate of Technical Science, V. Chyzyk, postgraduate, KhNAHU

Abstract. This scientific paper deals with the problem related to the definition of average time spent by passengers while waiting for transport vehicles at urban stops as well as the results of analytical modeling of this value at traffic schedule unknown to the passengers and of two options of the vehicle traffic management on the given route.

Key words: waiting time, traffic interval, analytic model, vehicle, route.

Вступ

На початку поїздки та під час пересадки завжди виникає час очікування пасажирами

(ЧОП) маршрутних транспортних засобів. З-поміж всіх складових сумарного часу пересування час очікування особливо негативно оцінюється пасажирами, тому що не викори-

стовується для переміщення і, як наслідок, є втратою особистого часу.

Час очікування є важливою характеристикою якості обслуговування пасажирів, ефективності організації роботи маршруту, включаючи якість диспетчерського управління.

Величина ЧОП має випадковий характер, тому визначення його прогнозних значень становить особливий інтерес для інженерів-транспортників.

Аналіз публікацій

Серед радянських учених-транспортників вагомий внесок у дослідження міських транспортних систем зробив видатний ленінградський інженер Хаїм Абрамович Зільберталь [1]. Особливе місце серед поглядів і цінностей класика займало питання витрат часу міського населення на пересування та його вартісна оцінка. У зв'язку з цим існує його вислів, який в ХХІ столітті набув ще більшої актуальності: «вирішення питань пересування не є чисто математичною задачею, а дійсно, залежить від того, як високо суспільство оцінює свій час і свої зручності» [2].

Йому належить найбільш відома у наш час формула для розрахунку середнього ЧОП, яка враховує можливість відхилення графіка руху транспортних засобів (ТЗ) на маршруті від планового

$$M(W) = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_1^2}{2 \cdot I}, \quad (1)$$

де $M(W)$ – математичне очікування випадкової величини ЧОП ТЗ на зупиночному пункті (ЗП); I – плановий інтервал руху ТЗ на маршруті; σ_1 – середньоквадратичне відхилення фактичного інтервалу руху ТЗ на маршруті.

Вищенаведена формула є основою для розрахунку часу очікування у випадку, коли час прибуття ТЗ на ЗП для пасажирів є невідомим.

Задачею пошуку математичної моделі розрахунку ЧОП займалися і зарубіжні вчені [3, 4], при цьому паралельно були спроби врахувати рівень завантаженості маршруту, але вони виявилися малопереконливими.

Німецький вчений Зіґфрід Рюгер створив аналітичну залежність ЧОП, яка враховує нерівномірність інтервалів руху ТЗ, що виникає на загальних ділянках різних маршрутів [5]. У такому випадку середній час очікування пасажирів на ЗП ТЗ одного маршруту розраховується як

$$\overline{W} = \frac{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_i^2 + \dots + z_n^2}{2T}, \quad (2)$$

де z_i – i -й інтервал руху ТЗ в межах часу обертю на маршруті; n – кількість ТЗ на маршруті; T – час обертю на маршруті.

За умови, що на маршруті працює лише один ТЗ, тобто коли $n = 1$, то $z_1 = T$, у результаті залежність (2) спрощується і має вигляд

$$\overline{W} = \frac{z_1}{2}. \quad (3)$$

Але ситуація, пов'язана із нерівномірністю інтервалів руху ТЗ, може виникати і в інших випадках; до того ж в залежності не враховується відхилення від запланованих інтервалів руху ТЗ на міських маршрутах. Автор лише наводить приблизні величини відхилення інтервалів прибуття ТЗ на ЗП, які ґрунтуються на власному досвіді і змінюються від 1–5 хв.

У роботах [6, 7] подано результати імітаційного моделювання ЧОП на ЗП громадського транспорту.

У першому випадку [6] вважалося, що ТЗ рухаються за заданим розкладом з рівним інтервалом. Відхилення від планового часу прибуття моделювалося за допомогою нормального закону розподілу із математичним очікуванням, рівним нулю, та середньоквадратичним відхиленням, що дорівнює одній третині планового інтервалу руху. У результаті визначено, що випадкову величину ЧОП можна описати гамма-законом розподілу з постійним параметром форми та параметром масштабу, що лінійно залежить від інтервалу руху ТЗ на маршруті.

У другому випадку [7] на основі натурних спостережень за роботою міських маршрутів м. Харкова було визначено, що інтервал руху на них є випадковою величиною із гамма-законом розподілу з параметром масштабу,

залежним від середнього інтервалу руху ТЗ маршруті. Час очікування, за результатами цієї імітації, також описується гамма-законом розподілу із аналогічними параметрами, але, на відміну від попереднього експерименту, з дещо більшим математичним очікуванням.

Обидві роботи [6, 7] мають практичну цінність для дослідження ЧОП на ЗП ТЗ як випадкової величини, але не мають достатнього теоретичного обґрунтування.

Взагалі існуючий аналітичний апарат для розрахунку ЧОП не може вважатися вичерпним, що відображається навіть на сучасних програмних продуктах із транспортного планування. ЧОП на ЗП в них розраховуються за простими залежностями, що не зовсім коректно описують реальний процес очікування пасажирів. Тому необхідна розробка аналітичного апарату для розрахунку ЧОП в різноманітних умовах українських міст.

Мета та постановка задачі

Обслуговування пасажирів міськими маршрутами за рівнем їх інформаційного забезпечення обмежене двома крайніми випадками.

При інтервальному способі обслуговування жодному пасажирові взагалі не відомий розклад руху ТЗ на маршруті. Час очікування при цьому є випадковою величиною.

При обслуговуванні за розкладом руху вважається, що всі пасажирові мають повне уявлення про параметри роботи міських маршрутів. У цьому випадку час очікування визначається виключно пасажиром, за умови чіткого виконання розкладу руху на маршрутах.

У реальності ці випадки є виключенням, а не правилом. Маршрутні системи сучасних міст зазвичай досягають деякого проміжного рівня інформаційного забезпечення пасажирів про можливу транспортну пропозицію. Якість обслуговування пасажирів в цьому сенсі визначається ступенем наближення рівня обізнаності пасажирів до повного знання розкладу руху. За низького рівня інформаційного забезпечення пасажирів час очікування ТЗ на ЗП цілком може вважатися випадковою величиною, яка визначається способом організації роботи ТЗ на маршрутах.

На сьогодні в міському пасажирському транспорті України сформувалася досить велика кількість варіантів організації роботи рухомого складу на маршрутах. Це обумовлено зазвичай неповним виконанням органами місцевого самоврядування функцій замовника перевезень пасажирів міськими маршрутами. Фактично відсутній контроль за додержанням розкладу руху, наведеного в паспортах маршрутів, та навіть за кількістю ТЗ, що на них працюють. Це призводить до занадто великої свободи транспортних підприємств у виборі форми організації руху ТЗ на маршрутах. З урахуванням того, що на цей ринок вийшло багато підприємств, що не є спеціалістами у сфері транспорту, в українських містах виникло багато різних регульованих чи нерегульованих варіантів взаємодій між водіями на маршрутах.

Оскільки рівень інформаційного забезпечення мешканців українських міст є далеким від ідеалу, метою роботи є аналітичне моделювання середнього часу очікування маршрутного транспорту для інтервального способу обслуговування пасажирів та форм організації роботи рухомого складу на маршрутах, що забезпечують мінімальний та максимальний ЧОП ТЗ на ЗП.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити форми організації роботи транспортних засобів на маршруті, які забезпечують мінімальне та максимальне значення ЧОП ТЗ на ЗП при інтервальному способі обслуговування пасажирів міськими маршрутами, та аналітично описати залежність середнього ЧОП від інтервалу руху для визначених способів організації роботи маршруту.

Теоретичні дослідження часу очікування пасажирів

Найліпші умови руху ТЗ маршрутом, з точки зору якості обслуговування пасажирів, створюються, коли ТЗ прибувають на ЗП через рівні інтервали часу, тобто

$$\begin{cases} I_{\phi} = I; \\ \sigma_1 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де I_{ϕ} – фактичний інтервал руху ТЗ на маршруті; I – середній інтервал руху ТЗ на маршруті.

Такий спосіб організації роботи МПТ забезпечує мінімум витрат часу очікування пасажирів на ЗП. Процес прибуття ТЗ на ЗП відповідає умовам стаціонарного потоку (рис. 1).

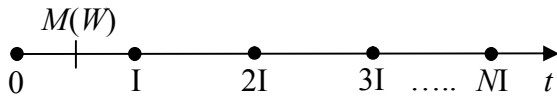


Рис. 1. Графік прибуття ТЗ на ЗП, що описується стаціонарним потоком

Відповідно до стаціонарного потоку, ЧОП на зупинці рівномірно розподіляється в межах від 0 до I. Тоді математичне очікування цієї випадкової величини завжди буде дорівнювати половині середнього інтервалу руху ТЗ

$$M(W) = \frac{1}{I} \int_0^I t \, dt = \frac{I}{2}. \quad (5)$$

Інтерпретація загальної формули для розрахунку дисперсії та середньоквадратичного відхилення випадкової величини ЧОП від її середнього значення має такий вигляд

$$D(W) = M(W - m)^2 = M(W^2) - m^2, \quad (6)$$

$$\sigma_W = \sqrt{D(W)}, \quad (7)$$

де $D(W)$ – дисперсія випадкової величини ЧОП; m – середнє значення ЧОП ТЗ на ЗП; σ_W – середньоквадратичне відхилення ЧОП.

Другий момент величини ЧОП на зупинці МПТ розраховується як

$$M(W^2) = \int_0^I t^2 \cdot \frac{dt}{I} = \frac{I^2}{3}. \quad (8)$$

Якщо підставимо отримане значення другого моменту величини ЧОП у вираз (6), то отримаємо наступні значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення

$$D(W) = \frac{I^2}{12} \text{ та } \sigma = \frac{I}{2\sqrt{3}}. \quad (9)$$

Тобто найкращий спосіб організації роботи маршруту забезпечує середнє значення випадкової величини ЧОП, що дорівнює половині

середнього інтервалу руху транспортних засобів із середньоквадратичним відхиленням, рівним $\frac{I}{2\sqrt{3}}$.

З іншого боку, найгіршим варіантом організації роботи маршруту слід вважати спосіб, коли час відправлення ТЗ із кінцевого ЗП є випадковим та не залежить від часу відправлення інших ТЗ. Звичайно, такий спосіб роботи транспорту є малоймовірним в реальному житті, але він являє собою теоретичний інтерес, оскільки дозволяє отримати значення найбільшого часу очікування при інтервальному способі обслуговування пасажирів міськими маршрутами. Слід відзначити одне важливе обмеження, яке використовувалося при формуванні цього способу. Воно полягає в тому, що спарювання ТЗ на маршрутах можливе лише випадково. Без цього обмеження найгіршим варіантом організації руху було б одночасне прибуття на ЗП усіх ТЗ, тобто рух цугом.

Припустімо, що в момент підходу пасажирів до ЗП, ТЗ рівномірно розподілені на маршруті (рис. 2).

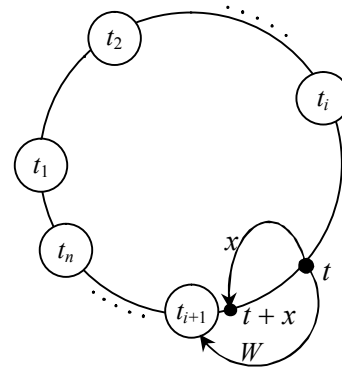


Рис. 2. Рівномірний розподіл ТЗ на маршруті: t_i, t_n – моменти часу, на яких знаходяться ТЗ; t – момент підходу пасажирів до ЗП; x – невід'ємний аргумент функції розподілу ймовірності ЧОП наступного ТЗ

Рисунок 2 пояснюється таким чином: якщо пасажир з'явився на маршруті у момент часу t і до моменту $t+x$ не з'явився жоден ТЗ, тоді це означає, що усі n ТЗ розташовані на проміжку часу довжиною $T-x$. Ймовірність цієї події для кожного ТЗ буде становити $\left(\frac{T-x}{T}\right)$. Оскільки на маршруті може працю-

вати деяка кількість ТЗ, то ймовірність того, що час очікування буде більшим, ніж x , визначається з умови рівномірності та незалежності розподілу ТЗ на маршруті за такою залежністю

$$P\{W > x\} = \left(1 - \frac{x}{T}\right)^n. \quad (10)$$

Математичне очікування визначається шляхом інтегрування виразу (10)

$$M(W) = \int_0^T \left(1 - \frac{x}{T}\right)^n \cdot dx = \frac{T}{n+1}. \quad (11)$$

Тобто найгірший спосіб організації роботи маршруту забезпечує середнє значення випадкової величини ЧОП, яке майже дорівнює середньому інтервалу руху, при реальній їх кількості.

Другий момент випадкової величини ЧОП буде дорівнювати

$$\begin{aligned} M(W)^2 &= 2 \int_0^T x \left(1 - \frac{x}{T}\right)^n \cdot dx = \\ &= 2T^2 \cdot \frac{1}{(n+1) \cdot (n+2)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Дисперсія випадкової величини ЧОП на ЗП становить

$$D(W) = T^2 \cdot \frac{n}{(n+1)^2 \cdot (n+2)}. \quad (13)$$

Із залежності (13) можна зробити висновок, що при $n \rightarrow \infty$, $M(W) \sim \sqrt{D(W)}$.

Висновки

Для інтервального способу обслуговування пасажирів міськими маршрутами, при оцінці витрат часу очікування пасажирів необхідно враховувати технологію організації роботи рухомого складу на маршрутах, оскільки навіть без спарювання ТЗ ЧОП може коливатися в широких межах: від половини інтервалу до величини, майже рівної інтервалу руху ТЗ на маршруті.

У результаті проведеного аналітичного моделювання середнього ЧОП на ЗП МПТ розглянуто лише два випадки організації роботи рухомого складу. Необхідна подальша формалізація та аналітичне моделювання можливих проміжних варіантів організації роботи рухомого складу на міських маршрутах.

Література

1. Блинкин М.Я. Модифицированная схема Зильберталя: анализ, обобщение, применение / М.Я. Блинкин, Г. Гуревич // Совершенствование перевозок пассажиров автомобильным транспортом: сб. тр. НИИАТ. – 1981. – №.5. – С. 16–32.
2. Зильберталь Х.А. Трамвайное хозяйство / Х.А. Зильберталь. – Ленинград: Огиз, Гострансиздат, 1932. – 304 с.
3. Bowman L. Service frequency, schedule reliability and passenger wait time at transit stops / L. Bowman, M. Turnquist // Transportation Research. – 1981. – № 15A. – P. 495–471.
4. Hendrikson T. Travel time and volume relationships in scheduled, fixed-routed public transportation / T. Hendrikson // Transportation Research. – 1981. – № 15A. – P. 173–182.
5. Рюгер З. Эксплуатация городского пассажирского транспорта / Зигфрид Рюгер ; пер. с нем. Ю. Ваклер, В. Феоктистова, Э. Шабарова. – М.: Транспорт, 1977. – 462 с.
6. Горбачев П.Ф. Параметры плотности распределения времени ожидания пассажирами городских маршрутов / П.Ф. Горбачев // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2007. – Вып. 37. – С. 90–95.
7. Горбачов П.Ф. Дослідження часу очікування пасажирів на зупиночних пунктах міського пасажирського транспорту / П.Ф. Горбачов, В. М. Чижик // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – № 30. – С. 134–138.

Рецензент: Є.В. Нагорний, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 20 травня 2013 р.