

3. Fairclough, N. Krytyczna analiza dyskursu, interdyscyplinarne podejście do komunikacji społecznej [Text] / N. Fairclough, A. Duszak. – Kraków, 2008. – 8 p.
4. Kowalik-Kaleta, Z. Interdyskursywnosc w medialnych tekstach perswazyjnych – analiza w ramach KAD [Text] / Z. Kowalik-Kaleta // Media i Społeczeństwo. – 2011. – Vol. 1. – P. 103–111.
5. Małyska, A. Językowe sygnały delimitacji tekstu w interakcjach społecznych [Text] / A. Małyska; M. Krauz, S. Gajda (Eds.). – Współczesne analizy dyskursu. – Rzeszów, 2005. – 365 p.
6. Kurcz, I. Psychologia języka i komunikacji [Text] / I. Kurcz. – Warszawa: Wyd-wo Scholar, 2001. – P. 27–28.
7. Wojtak, M. Gatunki prasowe [Text] / M. Wojtak. – Lublin, 2004. – 16 p.
8. Lemert, Ch. C. Teoria społeczna i transgresja [Text] / Ch. C. Lemert, G. Gillan, M. Foucault. – Warszawa, 1999. – 162 p.
9. Labocha, J. Tekst, wypowiedz, dyskurs w procesie komunikacji językowej [Text] / J. Labocha. – Kraków, 2008. – 60 p.
10. Nierenberg, B. Zarządzanie mediami. Ujęcie systemowe [Text] / B. Nierenberg. – Kraków: Wyd-wo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 2011. – P. 92–94.
11. Mierzejewska, B. I. Theoretical Approaches in Media Management Research [Text] / B. I. Mierzejewska, C. A. Hollifeild; A. B. Albarran, S. M. Chan-Olmsted, M. O. Wirth (Eds.). – Handbook of Media Management and Economics. – New York: Lawrence Erlbaum Associates, 2006. – P. 40–58.
12. Bielski, M. Organizacje: istota, struktury, procesy [Text] / M. Bielski. – Łódź: Wyd-wo Uniwersytetu Łódzkiego, 1997. – P. 82–85.
13. Jakubowicz, K. Media publiczne. Początek końca czy nowy początek [Text] / K. Jakubowicz. – Warszawa: Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, 2007. – 252 p.
14. Nijakowski, L. Analiza dyskursu na temat mniejszości narodowych i etnicznych w polskich mediach [Electronic resource] / L. Nijakowski. – Available at: <http://www.racjonalista.pl/>

*Досліджено регулярність руху маршрутних таксі на зупинках з високою частотою руху м. Запоріжжя (Україна) у пікові години доби. Визначені оцінки відносної нерегулярності руху та середньої тривалості очікування пасажирів на зупинці для окремих маршрутів. Запропоновано теоретичний підхід до розрахунку цих оцінок з урахуванням можливого прибуття транспортних засобів групами*

*Ключові слова: автобусна зупинка, тривалість очікування, висока частота руху, групове прибуття автобусів*

*Исследована регулярность движения маршрутных такси на остановках с высокой частотой движения г. Запорожья (Украина) в пиковые периоды суток. Определены оценки относительной нерегулярности движения и средней продолжительности ожидания пассажира на остановке для отдельных маршрутов. Предложен теоретический подход к расчету этих оценок с учетом возможного прибытия транспортных средств группами*

*Ключевые слова: автобусная остановка, время ожидания, высокая частота движения, групповое прибытие автобусов*

УДК 656.072

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51361

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯРНОСТІ РУХУ МАРШРУТНИХ ТАКСІ У ПІКОВІ ГОДИНИ ДОБИ

О. Ф. Кузькін

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра транспортних технологій  
Запорізький національний  
технічний університет  
вул. Жуковського, 64,  
м. Запоріжжя, Україна, 69063  
E-mail: kuzkin@zntu.edu.ua

### 1. Вступ

Регулярність руху на пасажирському автомобільному транспорті загального користування є одним з найважливіших показників, який характеризує рівень якості надання транспортних послуг пасажирів і ефективності експлуатації рухомого складу автотранспортних підприємств. Під регулярністю руху зазвичай розуміють таку організацію роботи транспортних засобів на маршрутах перевезень, за якої вони відправляються з кожного (початкового або проміжного) зупиночного пункту згідно встановле-

ного розкладу руху. Якщо ця умова не виконується, то має місце нерегулярність руху, яка виражається у відхиленні моментів відправлень транспортних засобів з зупиночних пунктів від розкладу руху у більший або менший бік [1].

У дотриманні регулярності зацікавлені як пасажирів, так і автотранспортні підприємства-перевізники, оскільки при нерегулярному русі збільшується тривалість очікування транспорту пасажирів на зупиночних пунктах, спостерігається нерівномірне наповнення маршрутних транспортних засобів, виникають відмови пасажирів у перевезеннях. Наслідками цього

є збільшення складності сполучення у пересуваннях, нерівномірне зношування рухомого складу і збільшення його необхідної кількості для забезпечення заданих обсягів перевезень. Надмірне очікування та відмови у посадці суттєво знижують привабливість маршрутного транспорту загального користування для пасажирів, призводять до зменшення обсягів перевезень і доходів автотранспортних підприємств.

Негативний вплив нерегулярності найбільше проявляється при маршрутних перевезеннях з відносно високою частотою руху. Саме до таких відносяться перевезення пасажирів у містах, особливо у пікові періоди доби. Виникнення нерегулярності руху на міських маршрутах пасажирського транспорту спричиняється низкою факторів, які мають імовірнісний або невизначений характер. Це, зокрема, відноситься до характеристик потоку пасажирів, що надходять до зупинок, тривалості руху автобусів перегонами маршруту, вибування частини рейсів, передбачених розкладом, через технічні причини.

Крім того, як показали дослідження [2], через випадковий характер підходу пасажирів до зупинок та розподілу їх поїздок на маршрутній мережі, міським маршрутним перевезенням властива внутрішня нестабільність, що у наслідку неминуче призводить до нерегулярності руху транспортних засобів.

Таким чином, уникнути нерегулярності руху на міських маршрутах пасажирського транспорту практично неможливо. Для зменшення нерегулярності застосовують оперативну диспетчеризацію перевезень на кінцевих та контрольних зупиночних пунктах маршрутів [3]. Застосування на зупинках електронних табло чи додатків для мобільних пристроїв, які у режимі реального часу інформують про час прибуття чергового транспортного засобу, дозволяє зменшити негативний психологічний вплив нерегулярності руху на пасажирів, зумовлений невизначеністю тривалості очікування транспорту [4].

Оскільки нерегулярність руху безпосередньо впливає на тривалість очікування пасажирів транспорту, остання є однією з складових критерію оптимізації при проектуванні і удосконаленні маршрутних мереж міського пасажирського транспорту [5] та використовується при рішенні задач розподілу пасажиропотоків на маршрутних мережах [6], оцінювання регулярності руху маршрутного транспорту за різних умов виконання перевезень є актуальною задачею.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Для оцінки регулярності руху на маршрутах пасажирських перевезень науковцями запропоновано низку показників, побудованих на кількісній оцінці точності дотримання водіями транспортних засобів розкладу руху або встановленого розкладом інтервалу руху [7]. В умовах міських пасажирських перевезень найбільше розповсюдження знайшов другий підхід, що зумовлено відносно великою частотою руху на міських маршрутах. При цьому більш важливим є не точність дотримання розкладу руху (який взагалі може бути невідомим пасажирі), а забезпечення прибуття транспортних засобів на зупиночні пункти через рівні за величиною інтервали часу [8].

Ступінь нерівномірності інтервалів прибуття транспорту на зупинку може бути оцінена за показниками абсолютної  $\sigma_H$  та відносної нерегулярності  $v_H$ , вперше запропонованими у [9]:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m_H)^2}{n}}; \quad v_H = \frac{\sigma_H}{m_H}, \quad (1)$$

де  $h_i$  – інтервал часу між прибуттям транспортних засобів на зупиночний пункт, зафіксований у  $i$ -му спостереженні в серії з  $n$  послідовних інтервалів;  $m_H$  – математичне очікування величини  $h_i$ , яке визначається як середнє арифметичне значень фактично спостережуваних інтервалів, тобто

$$m_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i. \quad (2)$$

Як видно з наведених вище формул, величини абсолютної і відносної нерегулярності є не що інше, як *стандартне відхилення* та *коефіцієнт варіації* випадкової величини інтервалу руху. Важливість цих показників полягає у тому, що вони безпосередньо зв'язані з середньою тривалістю очікування пасажирів транспорту  $\bar{T}_w$  наступною залежністю [9]:

$$\bar{T}_w = \frac{m_H}{2} + \frac{\sigma_H^2}{2m_H} = \frac{m_H}{2} (1 + v_H^2) = \frac{1}{2} H_e, \quad (3)$$

де  $H_e = m_H (1 + v_H^2)$  – ефективний інтервал руху на маршруті.

Необхідно зауважити, що формула (3) буде справедливою тільки за умови рівномірного у часі підходу пасажирів до зупинки та припущення, що поїздка пасажирів починається у момент прибуття найближчого транспортного засобу.

Таким чином, ступінь нерегулярності та її вплив на розподіл випадкової величини тривалості очікування пасажирів транспорту можуть бути вичерпно характеризовані встановленням виду функції розподілу випадкової величини інтервалу руху і значеннями її параметрів.

У роботі [10] досліджено інтервали прибуття автобусів на зупинку, що є спільною для шести маршрутів. На підставі проведених обстежень у міжпіковий період часу встановлено, що інтервали прибуття автобусів розподілені за нормальним законом, для якого побудована емпірична функція щільності розподілу та визначені математичне очікування та стандартне відхилення. Втім, отримані результати відносяться до конкретної обстежуваної зупинки і періоду обстеження, не встановлено їх зв'язку з частотою та регулярністю руху окремих маршрутів та на ділянці мережі в цілому, що унеможливує їх узагальнення.

Дослідженню закономірностей інтервалів руху на зупинці міського автобусного маршруту присвячена робота [11]. Проведені обстеження у м. Харків у пікові та міжпікові періоди доби гіпотезу про нормальний закон розподілу інтервалів руху не підтвердили, при цьому виявлено суттєвість впливу періоду часу на

величину інтервалів руху навіть у разі відносно невеликих коливань значень цих інтервалів у межах 13 ... 20 хв протягом доби.

Використання гамма-розподілу для опису випадкової величини інтервалів руху на автобусних маршрутах запропоновано у роботі [12]. Висновки ґрунтуються на результатах спостережень 18 міських маршрутів у м. Харкові. Авторами визначені параметри форми і масштабу закону для кожного з маршрутів та встановлено характер та ступінь тісноти їх зв'язку з величиною інтервалу руху, який знаходився у межах 3,7...29,5 хв., у вигляді регресійних залежностей. У подальших дослідженнях [13] обґрунтовано можливість застосування гамма-розподілу для опису випадкової величини інтервалу відправлення автобусів з початкової зупинки за умови їх наповнення до певного заданого рівня.

Метод імітаційного моделювання для дослідження регулярності руху автобусів на маршруті, що налічує 11 зупинок, застосовано у роботі [14]. Результати показали, що за певних теоретичних припущень щодо тривалості руху автобусів по перегонах маршруту, розподілу і параметрах інтенсивності підходу пасажирів до зупинок та регулярного відправлення з початкової зупинки, зі збільшенням номеру зупинки середній інтервал руху збільшується, а коефіцієнт варіації інтервалу руху досягає найбільшого значення ближче до середини маршруту.

У роботі [8] на підставі спостережень за рухом автобусів у ранковій годині «пік» у м. Чикаго (США) встановлено, що інтервали руху найкраще описуються законом гамма-розподілу зі зсувом. В якості альтернативи розглядалися інші закони розподілу, зокрема Вейбула. Цей висновок підтверджується у [15], де досліджувалась регулярність руху на автобусному маршруті у м. Бостон (США). При цьому встановлено, що при віддаленні від початкової зупинки параметр форми розподілу нелінійно зменшується, а параметри масштабу і зсуву – нелінійно збільшуються. Коефіцієнт варіації інтервалу руху коливається у межах 0,60...0,85 і не залежить від порядкового номеру зупинки на маршруті.

Низка попередніх досліджень також були присвячені встановленню емпіричного зв'язку між математичним очікуванням випадкової величини інтервалу руху  $M[H]$  та його коефіцієнтом варіації  $v_H$ . Так, у роботі [16] на підставі спостережень за рухом автобусів, які обслуговують студентське містечко університету м. Колумбус (штат Огайо, США), пропонується регресійна залежність

$$v_H = 1,296 \cdot m_H^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

У роботі [17] на підставі даних про інтервали руху автобусів у міжпіковий період доби встановлено залежність

$$v_H = \sqrt{\frac{A}{A + m_H^2}}, \quad (5)$$

де  $A$  – константа з розмірністю квадрату часу, що визначається за даними обстежень. При цьому значення  $A=0$  відповідає регулярному руху ( $v_H=0$ ), а  $A \rightarrow \infty$  відповідає пуассонівському потоку прибуття автобу-

сів з інтервалами між ними, розподіленими за експоненціальним законом ( $v_H \rightarrow 1$ ).

Підсумовуючи аналіз літературних джерел, можна зробити висновок, що основну увагу у них приділено дослідженню регулярності руху на зупинках окремих автобусних маршрутів у міжпіковій годині доби або у години «пік» з середнім інтервалом руху від 3,5 хв. та більше. За таких умов прибуття на зупинку двох або більше автобусів одночасно є малоймовірною подією. При подальшому зменшенні інтервалу руху, яке є характерним для годин «пік» на спільних зупинках декількох маршрутів, потік прибуваючих на зупинку автобусів втрачає властивість ординарності, що не враховано у попередніх роботах науковців і зумовлює необхідність проведення досліджень у цьому напрямку.

### 3. Ціль та задачі дослідження

Метою проведених досліджень є аналіз регулярності руху та оцінка тривалості очікування пасажирами транспорту на зупинках, які є спільними для декількох міських маршрутів транспорту загального користування, в умовах високої частоти руху. Для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

- розробити і обґрунтувати теоретичний підхід до оцінки регулярності руху та середньої тривалості очікування пасажирів на рівні як окремого маршруту так і сукупності усіх маршрутів, що обслуговують зупинку, з урахуванням можливого прибуття транспортних засобів групами;

- перевірити положення розробленого теоретичного підходу та можливість його застосування для оцінки регулярності руху і середньої тривалості очікування пасажирів в умовах зупиночних пунктів маршрутної мережі міського маршрутного таксі м. Запоріжжя.

### 4. Теоретичний підхід до визначення нерегулярності руху і оцінки середнього часу очікування пасажирами транспорту

Середня тривалість очікування пасажирами транспорту на зупинці, що визначається за формулою (3), визначається математичним очікуванням інтервалу руху на зупинці  $m_H$  та коефіцієнтом відносної нерегулярності руху  $v_H$ . Тобто ця залежність є вільною від закону розподілу випадкової величини інтервалу руху.

У випадку, коли пасажир може скористатися більш ніж одним маршрутом, підхід до оцінки відносної нерегулярності руху та тривалості очікування буде дещо іншим. Як відомо [18], у випадку проходження через зупинку  $s$  маршрутів, сумарна частота руху транспорту (*мережева частота*)  $F_N$  дорівнює

$$F_N = F_{R1} + F_{R2} + \dots + F_{Rs} = \sum_{i=1}^s F_{Ri}, \quad (6)$$

де  $F_{Ri}$  – частота руху транспорту на  $i$ -му маршруті (маршрутна частота).

Якщо графіки руху на окремих маршрутах є неузгодженими один з одним, потік прибуваючих на зупинку

автобусів можна вважати таким, що наближається до найпростішого (пуассонівського), у якому імовірність  $P_k(\tau)$  надходження за проміжок часу  $\tau$  рівно  $k$  автобусів визначається за формулою Пуассона [19]:

$$P_k(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau}, \quad (7)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність потоку, тобто, середня кількість подій (які у даному випадку полягають у прибутті на зупинку автобусів), яка припадає на одиничний відрізок часу.

Відомо [19], що проміжки часу між відбуванням послідовних подій у пуассонівському потоці розподілені за експоненціальним законом розподілу зі щільністю імовірності

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

таким чином, коефіцієнт відносної нерегулярності та середній час очікування пасажирів мають дорівнювати відповідно

$$v_H = 1; \quad \bar{T}_w = m_H. \quad (9)$$

Значення  $\bar{T}_w$ , визначене таким чином, насправді буде заниженим. Причиною цього є те, що при неузгоджених графіках руху окремих маршрутів і великій мережевій частоті руху нерідко спостерігаються випадки одночасного прибуття на зупинку декількох автобусів різних маршрутів. З точки зору пасажирів, який може скористатися будь-яким з них, це є прибуття *одного* автобуса. Згідно (7), імовірність того, що за проміжок часу  $\tau$  на зупинку прибуде один чи більше автобусів дорівнює

$$P_{k>0}(\tau) = 1 - P_0(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}, \quad (10)$$

де  $P_0(\tau)$  – імовірність того, що за проміжок часу  $\tau$  на зупинку не надійде жодного автобуса.

Таким чином, очікувана з точки зору пасажирів інтенсивність прибуття транспортних засобів  $\tilde{\lambda}$ , яку назвемо *приведеною інтенсивністю*, дорівнюватиме

$$\tilde{\lambda} = \frac{P_{k>0}(\tau)}{\tau} = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\tau}. \quad (11)$$

Враховуючи, що  $m_H = \lambda^{-1}$ , математичне очікування приведенного інтервалу прибуття автобусів на зупинку  $\tilde{m}_H$  дорівнюватиме

$$\tilde{m}_H = \frac{\tau}{1 - e^{-\lambda\tau}}. \quad (12)$$

Визначимо також дисперсію та стандартне відхилення приведенного інтервалу руху з таких міркувань. Як відомо, закон розподілу Пуассона є граничним випадком (при  $n \rightarrow \infty$ ) біноміального розподілу

$$f(x, n, p) = C_n^x \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x}, \quad (0 \leq x \leq n), \quad (13)$$

що виражає імовірність появи події  $x$  разів у серії з  $n$  випробувань за умови, що у одиничному випробуванні імовірність її появи дорівнює  $p$ . У нашому випадку

будемо розглядати в якості події прибуття на зупинку протягом проміжку часу  $\tau$  одного чи більше автобусів. Імовірність відбування цієї події, з урахуванням (10), дорівнює

$$p = P_{k>0}(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}. \quad (14)$$

Таким чином, можна розглядати надходження автобусів на зупинку як випадковий процес, реалізації якого відбуваються протягом кожного з послідовних проміжків часу величиною  $\tau$  і полягають у настанні події прибуття одного чи більше автобусів з імовірністю  $p = 1 - e^{-\lambda\tau}$ , чи не настанні цієї події (прибуття жодного автобуса) з імовірністю  $q = 1 - p = e^{-\lambda\tau}$ . Інтервали між прибуттям автобусів на зупинку у такому випадку можна розглядати як величини, що представляють собою довжину ланцюжків з послідовних проміжків часу  $\tau$ , у які ця подія не відбулась, обмежених проміжками часу, у які ця подія відбулась. Кожен з таких ланцюжків є послідовністю реалізації випробувань, у кожному з яких імовірність настання події дорівнює  $p$ , до появи «успіху» – проміжку часу, у якому на зупинку прибуває один чи більше автобусів. Довжина кожного з цих ланцюжків, вимірювана у кількості проміжків часу  $\tau$ , є випадковою величиною, розподіленою за геометричним законом розподілу [19], з дисперсією

$$\tilde{D}_H = \frac{q \cdot \tau^2}{p^2} = \frac{\tau^2 e^{-\lambda\tau}}{(1 - e^{-\lambda\tau})^2}. \quad (15)$$

Виходячи з (12) та (15), отримуємо формули для визначення коефіцієнта відносної нерегулярності та середнього часу очікування пасажирів (3), який може скористатися для поїздки будь-яким з маршрутів:

$$\tilde{v}_H = \sqrt{\tilde{D}_H} = \frac{\tau \cdot e^{-\frac{\lambda\tau}{2}}}{1 - e^{-\lambda\tau}}, \quad (16)$$

$$\tilde{T}_w = \frac{\tau}{2 \cdot (1 - e^{-\lambda\tau})} + \frac{\tau^2 e^{-\lambda\tau}}{2 \cdot (1 - e^{-\lambda\tau})^2} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\tau} = \frac{1}{2} \tau \cdot \frac{1 + e^{-\lambda\tau}}{1 - e^{-\lambda\tau}}. \quad (17)$$

Формула (17) відбиває той факт, що при збільшенні інтенсивності прибуття автобусів на зупинку ( $\lambda \rightarrow \infty$ ) і можливості пасажирів скористатися будь-яким з них для здійснення поїздки, коефіцієнт відносної нерегулярності  $\tilde{v}_H \rightarrow 0$ , а середній час очікування пасажирів  $\tilde{T}_w \rightarrow (1/2)\tau$ . У випадку  $\lambda \rightarrow 0$  маємо  $\tilde{v}_H \rightarrow \infty$  та  $\tilde{T}_w \rightarrow \infty$ , що цілком відповідає фізичній природі спостережуваного процесу.

В практичних умовах величину одиничного проміжку часу  $\tau$ , протягом якого пасажир сприймає прибуття на зупинку одночасно декількох автобусів як одного, найбільш доцільно прийняти рівною  $\tau = 1$  хв., оскільки з точністю саме до цього значення встановлюються інтервали руху на міських маршрутах та виконується складання розкладів руху транспортних засобів. У такому випадку, формули (16) та (17) набувають такого вигляду

$$\tilde{v}_H = \frac{e^{-\frac{\lambda}{2}}}{1 - e^{-\lambda}}; \quad \tilde{T}_w = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}}. \quad (18)$$

Графічне порівняння залежностей коефіцієнта відносної нерегулярності та середньої тривалості очікування, визначених за формулами (9) та (18), в залежності від інтенсивності прибуття транспортних засобів наведено на рис. 1, а, б.

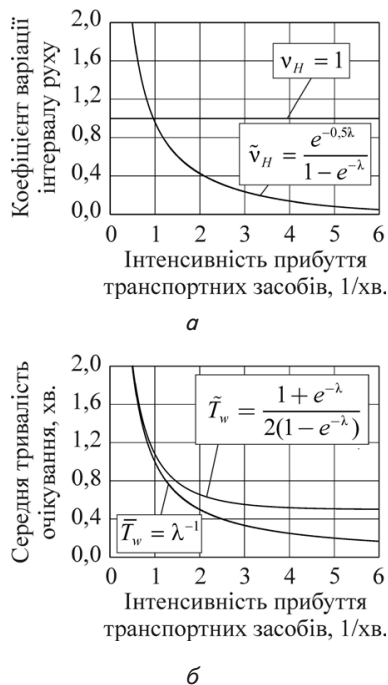


Рис. 1. Залежності значень коефіцієнта відносної нерегулярності та середньої тривалості очікування пасажирів від інтенсивності прибуття автобусів: а – залежність  $v_H = f(\lambda)$ ; б – залежність  $\tilde{T}_w = f(\lambda)$

Як видно з графіків, відмінність між значеннями середньої тривалості очікування, розрахованими за формулами (9) та (18) спостерігається починаючи з інтенсивності приблизно 0,5 одиниць на хвилину (30 одиниць на годину) і надалі поступово збільшується.

### 5. Експериментальні дослідження регулярності руху маршрутних таксі у м. Запоріжжя

Маршрутне таксі на сьогодні є одним з найбільш розповсюджених режимів руху автобусів у містах України. Згідно з Законом України «Про автомобільний транспорт» (в редакції від 30.06.2015 р.), режим руху маршрутного таксі на міському маршруті передбачає рух за розкладом, в якому відзначається час відправлення автобусів з початкового та кінцевого пунктів маршруту. Таким чином, за такого режиму руху на маршруті відсутні контрольні пункти і диспетчерське управління здійснюється, як правило, лише на початковій та кінцевій зупинках.

Регулярні автобусні перевезення у м. Запоріжжя здійснюються за 93 маршрутами, на які щоденно виходять 923 автобуси. З них 643 (69,7%) виконують перевезення у режимі маршрутного таксі та мають пасажиромісткість до 22 пасажирів. Маршрутна мережа міського автобуса характеризується значним дублюванням трас маршрутів, що у поєднанні з використанням для перевезень автобусів малої пасажиро-

місткості, призводить до наявності зупинок з високою частотою руху, регулярність руху автобусів на яких є предметом даного дослідження.

Обстеження інтервалів руху маршрутних таксі виконувалось у м. Запоріжжя протягом ранкових годин «пік» будніх днів тижня на восьми зупинках, розташованих у різних частинах міста. Загальна характеристика зупинок наведена у табл. 1. Жодна з них не є початковою або кінцевою на жодному з маршрутів.

Таблиця 1  
Загальна характеристика обстежуваних зупинок маршрутних таксі

Назва зупинки	Кількість маршрутів	Сумарна частота руху, од./год.
1. Малий ринок	8	69
2. Центральна прохідна (1)	10	62
3. Центральна прохідна (2)	10	55
4. Північне шосе	3	41
5. Інститут ім. Сагайдачного (1)	8	89
6. Інститут ім. Сагайдачного (2)	4	35
7. вул. Чекистів (1)	5	37
8. вул. Чекистів (2)	5	40

В ході обстеження фіксувались моменти прибуття автобусів на зупинки та номери їх маршрутів. На підставі отриманих даних для кожного маршруту були розраховані фактичні інтервали руху, їх математичні очікування  $m_H$ , стандартні відхилення  $\sigma_H$  (рис. 2) та коефіцієнти варіації  $v_H$  (рис. 3).

Таким чином, при збільшенні математичного очікування інтервалу руху, значення його стандартного відхилення має тенденцію до збільшення, однак тісного зв'язку між ними не спостерігається. У той же час, коефіцієнт варіації інтервалу руху  $v_H$  помітно спадає при збільшенні  $m_H$ .

Проведений регресійний аналіз (табл. 2) показав, що найкраще зв'язок між коефіцієнтом варіації та математичним очікуванням інтервалу руху описується дробово-лінійною функцією

$$v_H = \frac{4,33}{4,33 + m_H} \quad (19)$$

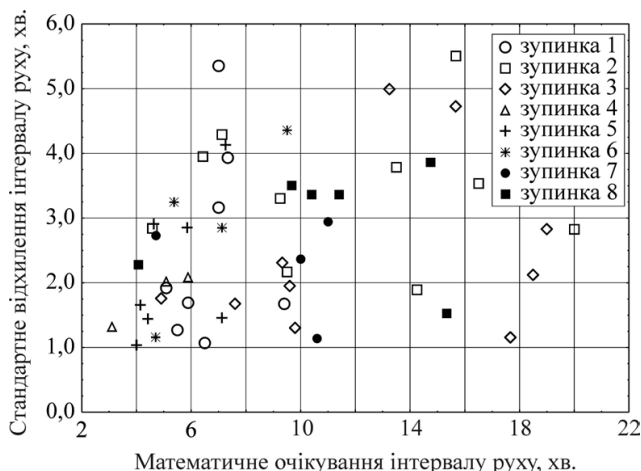


Рис. 2. Залежність стандартного відхилення інтервалу руху  $\sigma_H$  від його математичного очікування  $m_H$

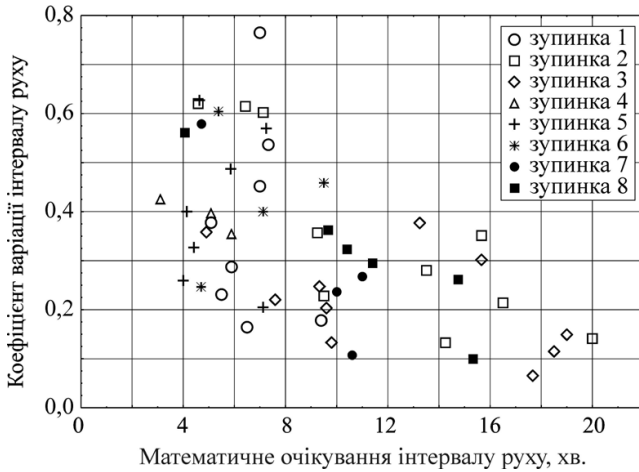


Рис. 3. Залежність коефіцієнта варіації інтервалу руху  $v_H$  від його математичного очікування  $m_H$

дартні відхилення, коефіцієнти варіації на кожному з цих маршрутів наведені у табл. 4.

Таблиця 3

Результати перевірки гіпотези про пуассонівський розподіл кількості автобусів, які прибувають на зупинки за хвилину

Номер зупинки	Параметр $\lambda$ , хв. <sup>-1</sup>	Значення критерію $\chi^2$		Кількість ступенів вільності df	Імовірність згоди p-level
		емпіричне	теоретичне		
1	1,196	2,547	7,815	3	0,467
2	1,081	3,288	7,815	3	0,349
3	0,984	1,947	3,842	1	0,163
4	0,852	2,549	3,842	1	0,110
5	1,475	5,419	9,488	4	0,247
6	0,759	1,460	5,992	2	0,482
7	0,588	0,979	3,842	1	0,322
8	0,672	0,181	3,842	1	0,670

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу визначення залежності  $v_H = f(m_H)$

Вид функції	Значення параметра	Коефіцієнт кореляції R	Стандартна похибка S
$v_H = \frac{a}{\sqrt{m_H}}$	a = 0,99	0,505	0,159
$v_H = \sqrt{\frac{a}{a + m_H^2}}$	a = 7,98	0,427	0,167
$v_H = \frac{a}{a + m_H}$	a = 4,33	0,522	0,157

Відповідно, згідно (3), вираз для оцінки середньої тривалості очікування пасажирів для досліджуваних умов, матиме вигляд

$$\bar{T}_w = \frac{m_H}{2} \left( 1 + \frac{18,75}{18,75 + 8,66m_H + m_H^2} \right), \quad (20)$$

і є верхньою оцінкою величини  $\bar{T}_w$  за припущення, що пасажир для поїздки може скористатися тільки певним маршрутом. Нижньою оцінкою середньої тривалості очікування, очевидно, буде значення  $\bar{T}_w$  для випадку, коли пасажир може скористатися будь-яким з маршрутів, що обслуговують зупинку.

На рис. 4 показані полігони розподілу випадкових величин кількості транспортних засобів, що прибувають на кожну з зупинок за хвилину. Як видно, емпіричні розподіли цих випадкових величин, отримані в результаті спостереження на зупинках, добре узгоджуються з теоретичним пуассонівським законом розподілу (7). Це підтверджують результати перевірки гіпотез про закони розподілу за критерієм  $\chi^2$  Пірсона на рівні значимості 0,05 (табл. 3).

Підтвердження пуассонівського розподілу потоків автобусів, які прибувають на зупинки, дає можливість застосувати викладений вище теоретичний підхід до оцінки нерегулярності руху і тривалості очікування пасажирів. Розглянемо, наприклад, зупинку «Малий ринок» (№ 1). Вона обслуговується вісьмома маршрутами. Дані про частоти, середні інтервали руху, стан-

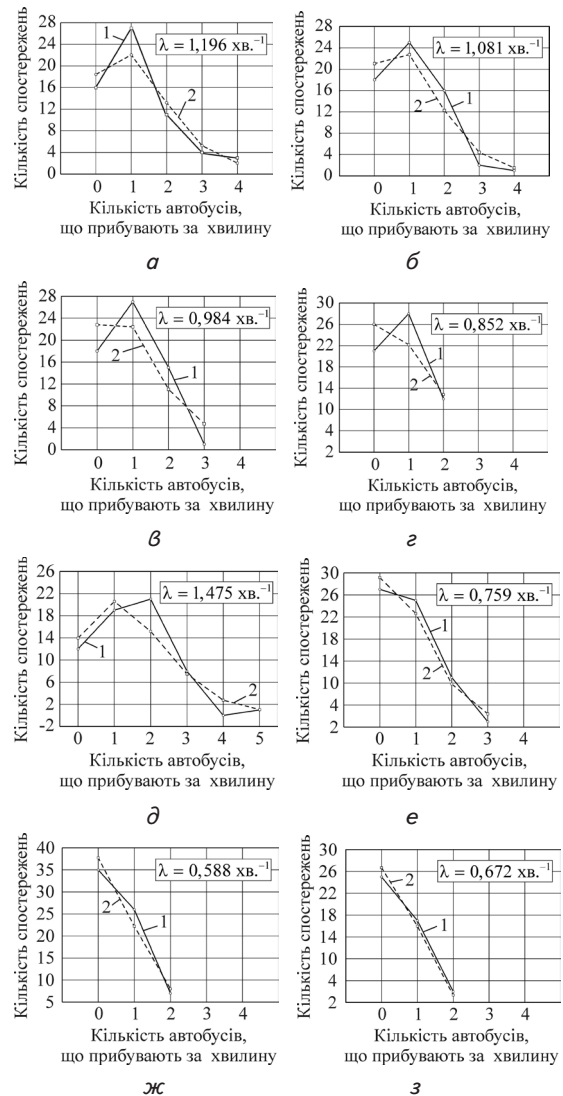


Рис. 4. Емпіричний (1) та теоретичний пуассонівський (2) полігони розподілу випадкової величини кількості автобусів, що прибувають на зупинку за хвилину: а – зупинка 1; б – зупинка 2; в – зупинка 3; г – зупинка 4; д – зупинка 5; е – зупинка 6; ж – зупинка 7; з – зупинка 8

Таблиця 4

Частоти, інтервали і регулярність руху маршрутних таксі на зупинці «Малий ринок» м. Запоріжжя протягом години ранкового «піку»

№ маршруту	Частота руху, од./год.	Статистичні характеристики інтервалу руху		
		математичне очікування $m_H$ , хв.	стандартне відхилення $\sigma_H$ , хв.	коефіцієнт варіації $v_H$
14	7	7,33	3,93	0,536
23	9	6,50	1,07	0,165
40А	11	5,50	1,27	0,231
54	10	5,89	1,69	0,287
63	9	7,00	3,16	0,451
67	12	5,09	1,92	0,377
93	6	9,40	1,67	0,178
99	5	7,00	5,35	0,764

За припущення, що пасажир очікує транспортний засіб тільки одного маршруту, нижня та верхня границі відносної нерегулярності руху дорівнюють

$$v_H^{\min} = \min\{v_H^{(i)}\} = 0,165; v_H^{\max} = \max\{v_H^{(i)}\} = 0,764, \quad (21)$$

а нижньою та верхньою оцінками величини  $\bar{T}_w$ , згідно (3), будуть

$$\bar{T}_w^{\min} = \frac{1}{2} \cdot \min\{H_e^{(i)}\} = \frac{1}{2} \cdot \min\{m_H^{(i)}(1 + v_{H(i)}^2)\} = 2,90 \text{ хв.}; \quad (22)$$

$$\bar{T}_w^{\max} = \frac{1}{2} \cdot \max\{H_e^{(i)}\} = \frac{1}{2} \cdot \max\{m_H^{(i)}(1 + v_{H(i)}^2)\} = 5,54 \text{ хв.} \quad (23)$$

Зауважимо, що найменше значення середньої тривалості очікування транспорту з точки зору пасажирів отримане для маршруту № 40А, який не є маршрутом з найвищою частотою руху.

Значення оцінок відносної нерегулярності руху та середньої тривалості очікування пасажирів, розраховані за тих же умов за формулами (19) та (20) складають  $v_H = 0,315 \dots 0,460$  та  $\bar{T}_w = 3,08 \dots 5,17$  хв., тобто знаходяться у межах отриманих вище значень.

Оцінимо тепер відносну нерегулярність та середню тривалість очікування пасажирів за припущення, що пасажир може скористатися будь-яким з маршрутів на цій зупинці. Мережева частота руху на зупинці складає  $F_N = 69$  од./год. (табл. 4). Враховуючи те, що потік прибуваючих автобусів є пуассонівським ( $v_H = 1$ ) з інтенсивністю  $\lambda = 1,196$  од./хв. (табл. 3), середня тривалість очікування пасажирів, розрахована за формулою (9) дорівнює

$$\bar{T}_w = m_H = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1,196} = 0,836 \text{ хв.} \quad (24)$$

Але з урахуванням прибуття автобусів групами, що сприймається пасажиром як прибуття одного ав-

тобуса, приведена інтенсивність  $\tilde{\lambda}$  (11), приведений інтервал  $\tilde{m}_H$  (12) та приведена частота  $\tilde{F}$  прибуття автобусів дорівнюватимуть

$$\lambda = 1 - e^{-1,196} = 0,698 \text{ од./хв.}; \quad (25)$$

$$\tilde{m}_H = \frac{1}{1 - e^{-1,196}} = 1,433 \text{ хв.}; \quad (26)$$

$$\tilde{F} = 60 \cdot \lambda_{\text{ав}} = 41,88 \text{ од./год.} \quad (27)$$

Отже, з точки зору такого пасажирів, частота руху автобусів на зупинці є меншою у порівнянні з мережевою частотою руху майже на 27 одиниць на годину. При регулярному прибутті поодиноких автобусів або їх груп, теоретична середня тривалість очікування транспорту цим пасажиром дорівнюватиме

$$\bar{T}_w = \frac{1}{2} m_H = \frac{1}{2} \cdot 1,433 = 0,717 \text{ хв.}, \quad (28)$$

а з урахуванням нерегулярності прибуття автобусів за (18) отримуємо

$$\tilde{v}_H = \frac{e^{-0,598}}{1 - e^{-1,196}} = 0,788;$$

$$\tilde{T}_w = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + e^{-1,196}}{1 - e^{-1,196}} = 0,933 \text{ хв.} \quad (29)$$

Таким чином, в умовах, коли зупинка громадського транспорту обслуговується декількома маршрутами, розклади руху на яких не узгоджені, виникають ситуації, коли автобуси різних маршрутів прибувають на зупинку одночасно. Це необхідно враховувати при оцінці нерегулярності руху транспорту і середнього часу очікування з точки зору пасажирів, що можуть скористатися для поїздки декількома з маршрутів. Фактична (приведена) частота руху транспорту на зупинці для таких пасажирів буде меншою, ніж сума частот руху на маршрутах, якими ці пасажирів можуть скористатися. Цей факт ілюструє рис. 5, а.

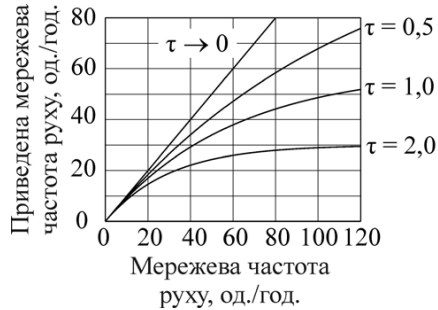
Дійсно, якщо годинна мережева частота руху автобусів на маршрутах, що задовольняють пасажирів, дорівнює  $F_N$  од./год. (16), то приведена мережева частота прибуття транспорту на зупинку  $\tilde{F}$  визначається з урахуванням (22) як

$$\tilde{F} = 60 \cdot \tilde{\lambda} = \frac{60 \cdot (1 - e^{-\lambda \tau})}{\tau} = \frac{60 \cdot (1 - e^{-\frac{F_N \tau}{60}})}{\tau}. \quad (30)$$

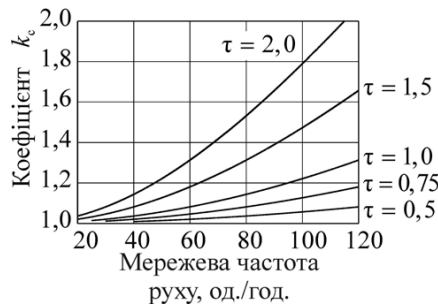
Тут параметр  $\tau$  є інтервалом часу, протягом якого пасажир сприймає прибуття одночасно декількох автобусів як одного. З виразу (30) видно, що  $\tilde{F} \leq F_N$ . Строга рівність має місце при зменшенні  $\tau$  у граничному випадку до нуля

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \tilde{F} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{60 \cdot (1 - e^{-\frac{F_N \tau}{60}})}{\tau} = \left[ \frac{0}{0} \right] = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{60 \cdot \frac{F_N}{60} e^{-\frac{F_N \tau}{60}}}{1} = F_N. \quad (31)$$

Наприклад, якщо  $\tau = 0,5$  хв., то мережева частота руху  $F_N = 40$  од./год. буде сприйнята пасажиром фактично як  $\tilde{F} \approx 35$  од./год. (рис. 5, а). Це фактично призводить до збільшення інтервалу руху транспорту, яким користуються ці пасажир, і, відповідно, до збільшення середньої тривалості їх очікування.



а



б

Рис. 5. Залежності приведеної мережевої частоти руху  $\tilde{F}$  та коефіцієнта  $k_c$  від мережевої частоти руху  $F_N$  за різних значень  $\tau$  (хв.): а – залежності  $\tilde{F} = f(F_N; \tau)$ ; б – залежності  $k_c = f(F_N; \tau)$

Таким чином, середню тривалість очікування можна визначити, з урахуванням нерегулярного прибуття поодиноких автобусів та їх груп, за формулою (17). Однак, як видно з рис. 1, б, суттєва різниця у розрахунках з припущенням групового надходження автобусів за формулою (17) та без нього за формулою (24) виявляється при інтенсивності прибуття автобусів  $\lambda > 0,5$  од./хв., що відповідає мережевій частоті руху  $F_N > 30$  од./год. Виходячи з цього, більш зручним буде розрахунок середньої тривалості очікування пасажирів за формулою

$$\bar{T}_w = \frac{k_c}{\lambda} = \frac{60 \cdot k_c}{F_N}, \quad (32)$$

де  $k_c$  – коефіцієнт співвідношення, що визначається за формулою

$$k_c = f(\lambda, \tau) = \frac{\frac{1}{2} \cdot \tau \cdot \frac{1 + e^{-\lambda\tau}}{1 - e^{-\lambda\tau}}}{\frac{1}{\lambda}} = \frac{\lambda\tau}{2} \cdot \frac{1 + e^{-\lambda\tau}}{1 - e^{-\lambda\tau}} = \frac{F_N \cdot \tau}{120} \cdot \frac{1 + e^{-\frac{F_N \tau}{60}}}{1 - e^{-\frac{F_N \tau}{60}}}. \quad (33)$$

Залежність  $k_c = f(F_N, \tau)$  наведена на рис. 5, б. При збільшенні мережевої частоти руху  $F_N$  коефіцієнт  $k_c$  нелінійно збільшується. При зменшенні  $F_N$  коефі-

цієнт  $k_c$  зменшується та у граничному випадку при  $F_N \rightarrow 0$  прагне до

$$\begin{aligned} \lim_{F_N \rightarrow 0} k_c &= \lim_{F_N \rightarrow 0} \frac{F_N \cdot \tau}{120} \cdot \frac{1 + e^{-\frac{F_N \tau}{60}}}{1 - e^{-\frac{F_N \tau}{60}}} = \left[ \frac{0}{0} \right] = \\ &= \frac{\tau}{120} \cdot \lim_{F_N \rightarrow 0} \frac{1 + e^{-\frac{F_N \tau}{60}} - \frac{F_N \tau}{60} \cdot e^{-\frac{F_N \tau}{60}}}{\frac{\tau}{60} \cdot e^{-\frac{F_N \tau}{60}}} = 1. \end{aligned} \quad (34)$$

Наприклад, якщо мережева частота руху складає  $F_N = 80$  автобусів на годину, а  $\tau = 2,0$  хв., то середня тривалість очікування пасажирів на зупинці, згідно (32), дорівнюватиме

$$\bar{T}_w = \frac{60 \cdot 1,55}{80} = 1,16 \text{ хв.}, \quad (35)$$

де значення коефіцієнта  $k_c = k_c(80; 2) \approx 1,55$  визначене за графіком на рис. 5, б.

## 6. Висновки

В результаті проведених досліджень:

1. Отримані, обґрунтовані і представлені у аналітичному та графічному вигляді залежності для оцінки відносної нерегулярності руху і середньої тривалості очікування пасажирів в умовах високої частоти руху з урахуванням одночасного прибуття на зупинку транспортних засобів різних маршрутів. Вони дозволяють визначити час, який пасажир витрачає на очікування транспорту, на підставі даних про мережеву частоту руху за умови, що потік прибуваючих на зупинку автобусів є найпростішим.

2. Проведено обстеження регулярності руху маршрутних таксі у м. Запоріжжя у години «пік», на підставі яких встановлено, що потік прибуваючих на зупинку автобусів розподілений за законом Пуассона. Це робить можливим застосування розробленого теоретичного підходу до оцінки середньої тривалості очікування пасажирів, що можуть скористатися для поїздки будь-яким з маршрутів на зупинці. На підставі статистичної обробки результатів спостережень за інтервалами руху автобусів розроблені регресійні моделі для визначення відносної нерегулярності руху і середньої тривалості очікування пасажирів, що можуть скористатися для поїздки одним з наявних маршрутів.

3. Проаналізовано поведінку функції залежності середньої тривалості очікування пасажирів від величини мережевої частоти руху на зупинці і запропоновано рекомендації до її практичного застосування. Аналіз показав, що тривалість очікування нелінійно спадає зі збільшенням мережевої частоти і у граничному випадку безкінечності останньої прагне до величини половини інтервалу часу, протягом якого пасажир сприймає прибуття одночасно декількох автобусів як прибуття одного. При цьому суттєва відмінність між традиційним і запропонованим у роботі підходами до оцінки тривалості очікування пасажирів спостерігається при мережевій частоті руху, що перевищує 30 транспортних засобів на годину.



## Література

1. Strathman, J. G. Empirical analysis of bus transit on-time performance [Text] / J. G. Strathman, J. R. Hopper // *Transportation Research Part A : Policy and Practice*. – 1993. – Vol. 27, Issue 2. – P. 93–100. doi: 10.1016/0965-8564(93)90065-s
2. Gershenson, C. Why does public transport not arrive on time? The pervasiveness of equal headway instability [Text] / C. Gershenson, L. A. Pineda // *PloS one*. – 2009. – Vol. 4, Issue 10. – P. 10. doi: 10.1371/journal.pone.0007292
3. Adamski, A. Simulation support tool for real-time dispatching control in public transport [Text] / A. Adamski, A. Turnau // *Transportation Research Part A : Policy and Practice*. – 1998. – Vol. 32, Issue 2. – P. 73–87. doi: 10.1016/s0965-8564(97)00019-0
4. Dziekan, K. Dynamic at-stop real-time information displays for public transport: effects on customers [Text] / K. Dziekan, K. Kottenhoff // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2007. – Vol. 41, Issue 6. – P. 489–501. doi: 10.1016/j.tra.2006.11.006
5. Kepaptsoglou, K. Transit route network design problem: review [Text] / K. Kepaptsoglou, M. Karlaftis // *Journal of transportation engineering*. – 2009. – Vol. 135, Issue 8. – P. 491–505. doi: 10.1061/(asce)0733-947x(2009)135:8(491)
6. Liu, Y. Transit Users' Route-Choice Modelling in Transit Assignment: A Review [Text] / Y. Liu, J. Bunker, L. Ferreira // *Transport Reviews*. – 2010. – Vol. 30, Issue 6. – P. 753–769. doi: 10.1080/01441641003744261
7. Chen, X. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels [Text] / X. Chen, Y. Lei, Z. Yushi, G. Jufu // *Transportation research part A: policy and practice*. – 2009. – Vol. 43, Issue 8. – P. 722–734. doi: 10.1016/j.tra.2009.07.006
8. Ruan, M. An investigation of bus headway regularity and service performance in Chicago bus transit system [Text] / M. Ruan, J. Lin // *Transport Chicago, Annual Conf., 2009*. – 14 p.
9. Зильберталь, А. Х. Трамвайное хозяйство: руководство для работников трамвая и учащихся [Текст] / А. Х. Зильберталь. – М.-Л. : ОГИЗ-Гострансиздат, 1932. – 304 с.
10. Василенко, Т. Є. Дослідження розподілу часу очікування пасажирями на автобуси на сумісній ділянці маршрутів [Текст] / Т. Є. Василенко, Д. В. Фесенко, О. Й. Дульнявка // *Вісті автомобільно-дорожнього інституту*. – 2009. – № 2 (9). – С. 206–214.
11. Горбачов, П. Ф. Дослідження інтервалу руху на міському автобусному маршруті [Текст] / П. Ф. Горбачов, Д. М. Копитков // *Комунальне господарство міст : науково-технічний збірник*. – 2007. – № 76. – С. 336–343.
12. Горбачов, П. Ф. Дослідження часу очікування пасажирів на зупиночних пунктах міського пасажирського транспорту [Текст] / П. Ф. Горбачов, В. М. Чижик // *Автомобільний транспорт*. – 2012. – № 30. – С. 134–138.
13. Горбачев, П. Ф. Оценка времени ожидания при различных способах организации движения транспортных средств на маршруте [Текст] / П. Ф. Горбачев, О. В. Макаричев, В. М. Чижик // *Автомобильный транспорт*. – 2013. – № 33. – С. 82–86.
14. Chen, W. An Improved Model for Headway-Based Bus Service Unreliability Prevention with Vehicle Load Capacity Constraint at Bus Stops [Text] / W. Chen, C. Yang, F. Feng, Z. Chen // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 13. doi: 10.1155/2012/313518
15. Yang, Y. Potential of Low-Frequency Automated Vehicle Location Data for Monitoring and Control of Bus Performance [Text] / Y. Yang, D. Gerstle, P. Widhalm, D. Bauer, M. Gonzalez // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2013. – Vol. 2351. – P. 54–64. doi: 10.3141/2351-07
16. Mishalani, R. G. Passenger wait time perceptions at bus stops: Empirical results and impact on evaluating real-time bus arrival information [Text] / R. G. Mishalani, M. M. McCord, J. Wirtz // *Journal of Public Transportation*. – 2006. – Vol. 9, Issue 2. – P. 89–106. doi: 10.5038/2375-0901.9.2.5
17. Ceder, A. *Public transit planning and operation: theory, modeling and practice* [Text] / A. Ceder. – Elsevier: Butterworth-Heinemann, 2007. – 626 p.
18. Ефремов, И. С. Теория городских пассажирских перевозок [Текст] / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – М.: Высшая школа, 1980. – 535 с.
19. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.