

14. Sanderson M., Croft B.. Deriving concept hierarchies from text. In Research and Development in Information Retrieval, pages 206–213. 1999.

15. Lin D., Pantel P. Dirt — discovery of inference rules from text. In Proceedings of ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pages 323–328, 2001.

16. Гладкий А. В. Синтаксические структуры естественного языка в автоматизированных системах общения. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 144 с. — (Серия «Проблемы искусственного интеллекта»).

Статтю подано до редакції 09.02.10 р.

УДК 338.47

О. В. Стець, доцент
кафедри математичного
моделювання економічних систем,
С. В. Михайлович, студентка групи УК-41,
факультет менеджменту та маркетингу,
Національний технічний університет України «КПІ»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ АВТОПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ЇХ ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ

Сучасні темпи розвитку міського пасажирського транспорту не відповідають темпам розвитку міської інфраструктури, сучасним потребам населення, рівню урбанізації міста. Тому необхідно уточнення методологічної основи аналізу та удосконалення систем пасажирського транспорту.

Стаття присвячена пошуку оптимального (за часовими характеристиками) маршруту міського пасажирського транспорту при пересуванні з одного транспортного району в інший. В якості критерію оптимізації обрано час, що витрачається пасажиром на дорогу.

При пошуку найраціональнішого маршруту враховується інтервал руху засобів пасажирських перевезень, час у дорозі, пасажиропотоки, можливі ситуації на пунктах зупинки транспортних одиниць та ймовірність їх виникнення.

Методика полягає у застосуванні транспортної моделі пошуку оптимального маршруту (в якості User-equilibrium assignment), наближене імітаційне моделювання процесу функціонування маршруту міського пасажирського транспорту (в якості System-equilibrium assignment) та віднаходження рівноваги між ними.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: міський пасажирський транспорт, пасажиропотоки, імітаційне моделювання, час у дорозі, оптимальний маршрут.

Современные темпы развития городского пассажирского транспорта не отвечают темпам развития городской инфраструктуры, современным потребностям населения, уровню урбанизации города. Поэтому необходимо уточнение методологической основы анализа и усовершенствование систем пассажирского транспорта.

Статья посвящена поиску оптимального (за временными характеристиками) маршрута городского пассажирского транспорта при передвижении с одного транспортного района в другой. В качестве критерия оптимизации избрано время, которое расходуется пассажиром на дорогу.

При поиске самого рационального маршрута учитывается интервал движения средств пассажирских перевозок, время в дороге, пасажиропотоки, возможные ситуации на пунктах остановки транспортных единиц и вероятность их возникновения.

Методика состоит в применении транспортной модели поиска оптимального маршрута (в качестве User-equilibrium assignment), приближенное имитационное моделирование процесса функционирования маршрута городского пассажирского транспорта (в качестве System-equilibrium assignment) и нахождение равновесия между ними.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской пассажирский транспорт, пасажиропотоки, имитационное моделирование, время в дороге, оптимальный маршрут.

The modern rates of development of public passenger transport do not fit the rates of development of city infrastructure, modern necessities of population, level of urbanization of city. It is therefore necessary clarification of methodological basis of analysis and improvement of the systems of passenger transport.

The article is devoted the search of optimum (after sentinel descriptions) route of public passenger transport at a movement from one transport district in other. In quality the criterion of optimization time which is outlaid a passenger on a road is select.

At the search of the most rational route the interval of motion of facilities of passenger transportations is taken into account, time in a road, passenger's stream, possible a situation on the points of stop of transport units that probability of their origin.

A method consists in application of a transport model of search of optimum route (in quality User-equilibrium of assignment), the imitation design of process of functioning of route of public passenger transport (in quality System-equilibrium of assignment) and searching for of equilibrium is close between them.

Вступ. Перспективи стійкого розвитку великих міст Європи пов'язують із стимулюванням транспорту загального користування. Головна мета активізації перевезень міським пасажирським транспортом (МПТ) полягає у переключенні частини пасажиропотоків з індивідуального на транспорт загального користування та у створенні більш збалансованої транспортної системи, що знижує екологічне навантаження на міське середовище, підвищує швидкість і безпеку поїздок.

З розвитком міських перевезень змінюються і критерії їхньої ефективності. Аналізуючи роботу міського транспорту та прагнучи поліпшити її за якими-небудь показниками, було відмічено, що недоліки, які мають місце у роботі міського пасажирського транспорту (МПТ), у даний час призводять до досить значних, на думку більшості компетентних фахівців, невинуватених витрат матеріальних, фінансових і трудових ресурсів, що несприятливо позначаються на наслідках суспільного виробництва.

Незважаючи на практичне застосування усіх відомих методів експресного руху автобусів на маршрутах, до цього часу невинуватеними залишаються раціональні області використання цих методів. На даний момент, майже відсутні методичні рекомендації для їх реалізації, а частина з них зовсім не досліджена. Виходячи з вищезазначеного, стаття присвячена розробці методики раціонального вибору маршруту пасажиром, при цьому буде вра-

ховано узгодження особистісних критеріїв оцінки маршруту із загальним пасажиропотоком, що є досить актуальним на сьогоднішній день.

Постановка задачі. Оскільки функціонування міської мережі перевезень супроводжується різними складнощами, такими як не раціональний вибір маршруту, створення заторів на дорогах тощо, то для комплексного дослідження мережі пасажирських перевезень необхідно спрогнозувати маршрути, які оберуть учасники руху, і на цій основі розрахувати завантаження елементів мережі, середні швидкості й часи поїздки. Основою для такого розрахунку служить наступна гіпотеза: кожен учасник руху обирає маршрут, виходячи з критерію мінімуму часу на дорогу для досягнення кінцевого пункту призначення. Розподіл потоків вважається сталим (рівноважним), якщо жоден з учасників руху не може змінити свій маршрут, поліпшивши свій особистий критерій. Такий розподіл прийнято називати User-equilibrium, на відміну від System-equilibrium, при якому оптимізується загальний критерій для всіх учасників руху. Складність завдання по відшукуванню рівноваги зумовлена тим фактом, що індивідуальна ціна маршруту для кожного з учасників залежить від того, які рішення прийняли всі інші учасники руху.

Задачею дослідження є аналіз та моделювання системи міських автоперевезень з врахуванням рівноваги між User- та System-equilibrium.

Методологія. В роботі проаналізовано та використано математичні методи для вирішення поставленої задачі.

В якості User-equilibrium запропоновано модель вибору маршруту, яка розглядає час поїздки й інтервали руху в сукупності [1]. Крім того, інтервали руху на різних маршрутах вважаються не узгодженими, що є більш реалістичним з поведінкової й операційної точок зору. Основною задачею даної моделі є обчислення часу очікування й розподіли поїздки для сукупності паралельних маршрутів L від початкового вузла.

Для кожного розглянутого маршруту максимально прийнятний час поїздки складається із суми часу поїздки й інтервалу для маршруту з мінімальним інтервалом і часом поїздки. Це необхідно враховувати в силу того, що для пасажирів найбільш важливо мінімізувати витрати, навіть якщо його час очікування складе цілий інтервал, тому що будь-який інший маршрут має час поїздки, що перевищує суму інтервалу й час поїздки для даного маршру-

ту. Таким чином, прийнятними є тільки ті маршрути, час поїздки на які менше максимального.

З урахуванням того, що моменти прибуття автобусів є неузгодженими, пасажери володіють розкладом, а моменти прибуття транспортних засобів розподілені рівномірно, а також того, що пасажери прагнуть мінімізувати середні узагальнені витрати часу, простий імовірнісний аналіз дозволяє одержати наступні основні вираження ймовірностей вибору маршруту (серед k паралельних маршрутів) і розрахункового часу очікування.

Імовірність p вибору маршруту u визначається в такий спосіб:

$$p_u = \int_0^{t_u} \frac{1}{t_u} \prod_{i=1, i \neq u}^k \left(1 - \min \left\{ 1, \max \left\{ \frac{x + r_u - r_i}{t_i} \right\} \right\} \right) dx, \quad (1)$$

а середній час очікування w :

$$w = \sum_{u=1}^k \int_0^{t_u} \frac{1}{t_u} \prod_{i=1, i \neq u}^k \left(1 - \min \left\{ 1, \max \left\{ \frac{x + r_u - r_i}{t_i}, 0 \right\} \right\} \right) dx, \quad (2)$$

де p_u — імовірність вибору маршруту u ;

r — час поїздки, хв.;

t — інтервал руху, хв.;

w — середнє очікування, хв.;

k — кількість паралельних маршрутів.

Час очікування й розподіл поїздок розраховуються методом ітерацій, коли на кожному кроці окремий маршрут порівнюється із групою вже прийнятих маршрутів, що формують діючий «класстер», що і становить «еквівалентний» маршрут.

При використанні методу послідовних ітерацій необхідно виконувати наступні основні умови («еквівалентний» маршрут позначений як m , маршрут, що розглядається, — u):

умова 1: маршрути аналізуються у висхідному порядку за часом поїздки (починаючи із «надшвидкісного»);

умова 2: розглянутий маршрут u приймається тільки в тому випадку, якщо його час поїздки менше, ніж сума інтервалу й часу поїздки для «еквівалентного» маршруту m , складеного із всіх маршрутів з більш коротким часом поїздки, тобто $r_u < r_m + t_m$;

умова 3: частки прийнятих маршрутів при додаванні нового скорочуються (коефіцієнт скорочення $1 - p_u$, де p_u — частка даного маршруту).

Для «еквівалентного» маршруту m призначається час поїздки r_m рівне середнього часу поїздки, і інтервал t_m , рівний подвоєному середньому часу очікування w для групи вже прийнятих маршрутів, у відповідності з наступними виразами:

$$r_m = (1 - p_u) r'_m + p_u r_u; \quad (3)$$

$$t_m = 2w, \quad (4)$$

де r_m — середній час поїздки, хв.;

r'_m — час поїздки для «еквівалентного» маршруту в попередній ітерації, хв.

У результаті розрахунків одержують частки ймовірності вибору пасажиром того чи іншого маршруту [2]. Ці дані є вхідними до другого етапу моделювання (System-equilibrium).

Питання визначення параметрів реальних пасажиропотоків на маршрутах і залежних від них характеристик транспортного обслуговування є головним для визначення параметрів функціонування транспорту.

Потенційні потоки пасажирів на зупинках маршруту задаються матрицею кореспонденції для маршруту, елемент якої λ_{ij} — інтенсивність пасажиропотоку із зупинки i на зупинку j . Сумарну інтенсивність потоку пасажирів, що роблять поїздки в прямому напрямку із зупинки i , позначимо відповідно λ_i :

$$\lambda_i = \sum_{j=i}^n \lambda_{ij}. \quad (5)$$

Для одержання параметрів реальних пасажиропотоків і характеристик транспортного обслуговування необхідно вивчити ці характеристики послідовно для кожної зупинки й перегону маршруту в прямому й зворотному напрямках [3]. Після цього можуть бути отримані сумарні параметри й характеристики, у тому числі такі, як інтенсивність потоку пасажирів, що обслуговуються Π^δ ; пасажирів, що одержали відмову, Π^{oidm} ; витрати часу очікування T^{ou} ; витрати часу на проїзд T^{np} .

Зупинка маршруту МПТ розглядається як система масового обслуговування. Вхідним потоком вимог на обслуговування в цьому випадку є потенційний пасажиропотік на зупинці. Зазвичай цей потік можна вважати пуассонівським. На зупинці з пасажирів, що надходять, формується черга. При цьому вважається, що якщо час очікування пасажирів перевищує деяку величину t_{oc}^M , то настає відмова в обслуговуванні. Обслуговуючим пристроєм є транспортні одиниці, які прибувають на зупинку через випадковий часовий інтервал t , розподілений у загальному випадку за нормальним законом розподілу $b(t)$ з математичним очікуванням m_t . Пасажири, що очікують транспортну одиницю на зупинці i , обслуговуються групами, що не перевищують певного числа s_i , де s_i — випадкова величина, що залежить від місткості засобу пасажирського транспорту й того, наскільки транспортна одиниця завантажена. Позначимо μ_i інтенсивність надходження на зупинку $i = \overline{0, n}$ транзитних пасажирів.

Будемо розглядати процеси обслуговування на зупинці МПТ у чотирьох умовних режимах, визначати параметри цих режимів, а потім середні параметри [4].

Досліджуємо функціонування зупинки маршруту МПТ у чотирьох умовних режимах, розглядаючи її як детерміновану систему масового обслуговування:

- 1-й режим — обслуговування без відмов:

$$t \leq t_{oc}^M; \lambda_i t \leq N - \mu_i t; \quad (6)$$

- 2-й режим — обслуговування з відмовами через постійне переповнення ТО:

$$t \leq t_{oc}^M; \lambda_i t > N - \mu_i t; \quad (7)$$

- 3-й режим — обслуговування з відмовами через великий інтервал між ТО:

$$t > t_{oc}^M; \lambda_i t \leq N - \mu_i t; \quad (8)$$

- 4-й режим — обслуговування з відмовами через великий інтервал між ТО і переповнення:

$$t > t_{oc}^M; \lambda_i t > N - \mu_i t. \quad (9)$$

Шляхом складних математичних перетворень у результаті отримуємо наступні ймовірності виникнення того чи іншого режиму на зупинці:

першого режиму:

$$P_{1i} = \int_0^{t_{оч}^M} \left[\sum_{m=0}^N \frac{(\lambda_i t)^m}{m!} e^{-\lambda_i t} \sum_{S=0}^{N-m} P_i(S) \right] b(t) dt ; \quad (10)$$

другого режиму:

$$P_{2i} = \int_0^{t_{оч}^M} \left[\sum_{m=0}^N \frac{(\lambda_i t)^m}{m!} e^{-\lambda_i t} \sum_{S=\max\{0, N-m\}}^{N-m} P_i(S) \right] b(t) dt ; \quad (11)$$

третього режиму:

$$P_{3i} = \int_{t_{оч}^M}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^N \frac{(\lambda_i t_{оч}^M)^m}{m!} e^{-\lambda_i t_{оч}^M} \sum_{S=0}^{N-m} P_i(S) \right] b(t) dt ; \quad (12)$$

четвертого режиму:

$$P_{4i} = \int_{t_{оч}^M}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^N \frac{(\lambda_i t_{оч}^M)^m}{m!} e^{-\lambda_i t_{оч}^M} \sum_{S=\max\{0, N-m\}}^N P_i(S) \right] b(t) dt . \quad (13)$$

Виконуючи наступні математичні перетворення отримуємо формули для обчислення наступних параметрів [5]. Середній час очікування одного пасажера у випадку, якщо на зупинці маршруту встановився перший режим функціонування, дорівнює:

$$t_{1i}^{оч} = \frac{m_t^1}{2} ; \quad (14)$$

сумарні витрати часу очікування для першого режиму функціонування можна оцінити по формулі:

$$T_{1i}^{оч} = \frac{m_t^1 \lambda_{1i}}{2} . \quad (15)$$

Середній час очікування одного пасажера у випадку, якщо на зупинці маршруту встановився другий режим функціонування, дорівнює:

$$t_{2i}^{oc} = t_{oc}^M - \frac{\aleph - \mu_{2i} m_t^1}{2\lambda_{2i}}. \quad (16)$$

Сумарні витрати часу очікування для другого режиму можна оцінити по формулі:

$$T_{2i}^{oc} = \Pi_{2i}^\delta t_{2i}^{oc} = \left(\frac{\aleph - \mu_{2i} m_t^1}{m_t^1} \right) \left(t_{oc}^M - \frac{\aleph - \mu_{2i} m_t^1}{2\lambda_{2i}} \right). \quad (17)$$

Середній час очікування пасажирів в третьому режимі:

$$t_{3i}^{oc} = \frac{t_{oc}^M}{2}, \quad (18)$$

сумарні витрати часу:

$$T_{3i}^{oc} = \frac{\lambda_{3i} (t_{oc}^M)^2}{2m_t^2}. \quad (19)$$

Для четвертого умовного режиму оцінки середній час очікування і сумарні витрати часу відповідно рівні:

$$t_{4i}^{oc} = t_{oc}^M - \frac{\aleph - \mu_{4i} m_t^2}{2\lambda_{4i}}; \quad (20)$$

$$T_{4i}^{oc} = \frac{\aleph - \mu_{4i} m_t^2}{m_t^2} \left(t_{oc}^M - \frac{\aleph - \mu_{4i} m_t^2}{2\mu_{4i}} \right). \quad (21)$$

Розглянута модель маршруту МПТ дозволяє досить точно визначити параметри реальних пасажиропотоків на маршруті та основні характеристики транспортного обслуговування.

Результати дослідження. Практичною реалізацією даних методів є розробка програмного комплексу, за допомогою якого можна досягти рівноваги між User-equilibrium assignment міського пасажирського транспорту та System-equilibrium assignment і запропонувати найраціональніший маршрут з точки зору економії часу на дорозі.

Вхідними даними до програми на першому етапі є кількість можливих маршрутів для досягнення потрібного місця призначення, час очікування транспортного засобу та час у дорозі (рис. 1). Після введення цих даних програма вираховує ймовірність вибору пасажиром того чи іншого маршруту.

Ввод входящих данных Сервис Промежуточные результаты

Входящие данные

Введите количество маршрутов 4 OK

Для маршрута № 1

Введите интервал движения 8

Время в пути 24 OK

Схема Результат Рассчитать

Рис. 1. Введення даних про інтервал руху транспортних одиниць та часу у дорозі

На другому етапі найраціональніші для пасажирів маршрути розглядаються в системі міського пасажирського транспорту з урахуванням можливих ситуацій на зупинках. Користувач може самостійно ввести кількість зупинок на кожному з маршрутів, місткість автобуса, приблизну швидкість транспортної одиниці, довжину кожного маршруту, оскільки кожен з цих параметрів може суттєво вплинути на результати досліджень. Залежно від імовірності виникнення певної ситуації розраховується час очікування транспортного засобу та загальний витрачений час на дорогу, що досить точно наближається до реального (рис. 2). Таким чином можна визначити який саме маршрут дозволить швидше досягти місця призначення, що є досить актуальним на сьогодні, зважаючи на переповнення транспортних засобів та затори на дорогах.

Ввод входящих данных Сервис Промежуточные результаты

Наиболее благоприятный маршрут №2 с суммарным затраченным временем T= 39 минут с вероятностью возникновения режима 3 равной 0,60397

Схема Результат Рассчитать

Рис. 2. Визначення остаточного маршруту

Висновки. В статті розглянуто кілька економіко-математичних транспортних моделей, зокрема, транспортна модель пошуку оптимального маршруту та наближене імітаційне моделювання процесу функціонування маршруту МПТ. Досягнута рівновага між User-equilibrium assignment МПТ та System-equilibrium assignment і запропонований найраціональніший маршрут з точки зору витрати мінімуму часу на дорогу. При пошуку найраціональнішого маршруту враховується інтервал руху засобів пасажирських перевезень, час у дорозі, пасажиропотоки, можливі ситуації на пунктах зупинки ТО та ймовірність їх виникнення. Таким чином, пасажир обиратиме оптимальніший маршрут, економлячи при цьому час та уникаючи транспортної втоми, що негативно позначається на суспільному виробництві. Розроблено програмний комплекс реалізації транспортної моделі пошуку оптимального маршруту та імітаційного моделювання процесу функціонування маршруту МПТ, який може широко застосовуватися на практиці, особливо у великих містах, де, з одного боку, велика щільність населення, з іншого — до одного і того ж кінцевого пункту можна дістатися кількома способами.

Література

1. *Кутах О. П.* Моделювання транспортних систем. [Текст] / О. П. Кутах / — К.: Либідь, 2004 — 335 с.
2. *Кутах А. П.* Модульные принципы имитационного моделирования транспортного процесса. [Текст] // Экономика и мат. методы. — К.: Техника, 2003 — 541 с.
3. *Ольховський С. Ю., Яворський В. В.* Моделювання функціонування розвитку маршрутизованих систем міського пасажирського транспорту. [Текст] / В. В. Яворський / — Омськ: Видавництво СибАДІ, 2001 — 136 с.
4. *Миротин Л. Б., Ташибаев Н. Е., Геррами В. Д.* Логистика: городской пассажирский транспорт. [Текст] // Учебное пособие для вузов. — М.: Экзамен, 2003 — 222 с.
5. *Юдин В. А., Сомойлов Д. С.* Городской транспорт. [Текст] — М.: Стройиздат, 1975 — 342 с.

Статтю подано до редакції 30.12.09 р.