

Оптимизация городской транспортной системы при различных целях муниципальных органов власти, транспортных операторов и пассажиров

Поступила	15.10.2018
Рецензирование	26.10.2018
Принята к печати	29.10.2018

В последние десятилетия городские транспортные системы в нашей стране стремительно изменяются. В настоящее время спрос на пассажирские перевозки может быть удовлетворен различными способами. Поэтому в транспортной модели города должен учитываться выбор пассажирами способа передвижения. В статье рассматривается система управления городским пассажирским транспортом. Участниками системы являются пассажиропоток, оператор общественного транспорта и муниципальные органы власти. Для каждого определены целевые функции и множество стратегий. Стратегии участников включают: выбор способа передвижения (пассажиропоток), частоту движения общественного транспорта (общественный транспорт) и пропускную способность дорог (муниципальные органы власти). Целевыми функциями являются транспортные расходы, эффективность работы общественного транспорта, затраты на дороги и время передвижения. Выбор способа передвижения основан на логит-распределении. Введена искусственная целевая функция пассажиров, которая использует квадрат отклонения от значения логит-модели. Зависимость между временем передвижения и пропускной способностью дорог описана моделью Бюро общественных дорог (BPR). Достижение цели муниципальными органами власти осложняется тем, что время передвижения и затраты на дороги зависят от пропускной способности дорог.

Для описания системы управления используется теоретико-игровой подход. В статье проверены условия теоремы Нэша о существовании равновесия в бескоалиционной игре многих лиц. Доказана компактность и выпуклость множеств стратегий каждого игрока. Подтверждена квазивогнутость функций выигрыша каждого игрока по собственным стратегиям. Таким образом, обосновано существование равновесия Нэша для бескоалиционной игры трех участников (пассажиропотока, муниципальных органов власти, общественного транспорта).

Ключевые слова: *выбор способа передвижения, пассажирские перевозки, пропускная способность дорог, теория управления, теория игр, равновесие Нэша.*

Введение

Развитие транспортной науки привело к выводу, что увеличение пропускной способности дорог является не единственным возможным способом решения проблем движения в городах.

Многие теоретические и практические примеры показывают, что строительство дополнительных дорог общего пользования не может иметь никакого эффекта или даже оказывает отрицательное влияние на время передвижения. В частности, парадокс Даунса – Томсона указывает на то, что увеличение пропускной способности дорог приводит к снижению скорости передвижения [1]. Механизм этого парадокса состоит в том, что по мере увеличения пропускной способности дорог пассажиры переходят с общественного транспорта на легковой, оператор общественного транспорта теряет пассажиров. В свою очередь дополнительные пассажиры, пересекаясь на легковые автомобили, значительно

увеличивают пробки. Поэтому процесс увеличения пропускной способности дорог может привести к деградации общественного транспорта, увеличению трафика и заторам.

Для решения проблемы органы власти используют ограничения и запреты для владельцев автомобилей, которые уменьшают трафик. Однако такое решение снижает свободу принятия решений и качество жизни. Как правило, предпочитают использовать теорию активной системы [2], когда власти создают условия для принятия пассажирами полезного для города решения (путем повышения качества работы общественного транспорта). В частности, BRT-системы [3] позволяют значительно улучшить работу общественного транспорта и таким образом способствуют его регулярному использованию.

В обзоре [4] рассматривается множество исследований, в которых теоретико-игровые модели, описывающие транспортную систему, классифицируются в соответствии с определен-

ным набором участников: частная компания и пассажиры; муниципальные органы власти и пассажиры; частная компания и муниципальные органы власти; муниципальные органы власти между собой; частные компании между собой. Подобная классификация была предложена для транспортной системы в [5]. В указанной статье представлены участники: потенциальные пассажиры, операторы и публичные власти, но постановка задачи была сформулирована как неигровая модель. Концепция бескоалиционных игр используется для разрешения конфликта интересов между участниками. Система городского транспорта [6] представлена набором частных операторов (которые эксплуатируют набор маршрутов), муниципальными органами власти и набором пассажиропотоков (которые осуществляют выбор способа передвижения). Для этой системы было доказано существование равновесия Нэша. В статье [7] теоретико-игровая модель учитывает зависимость между трафиком и временем передвижения. В [8] использовался следующий набор участников (игроков): участник (пассажир), узел и дуга (пересечение и сегмент дороги).

В настоящей статье математическая модель системы городского транспорта состоит из сегментов: дорог, оператора общественного транспорта и пассажиропотока с определенными стратегиями и целями. Такой подход позволяет строить более сложные модели городской транспортной системы с учетом интересов пассажиров, общественного транспорта

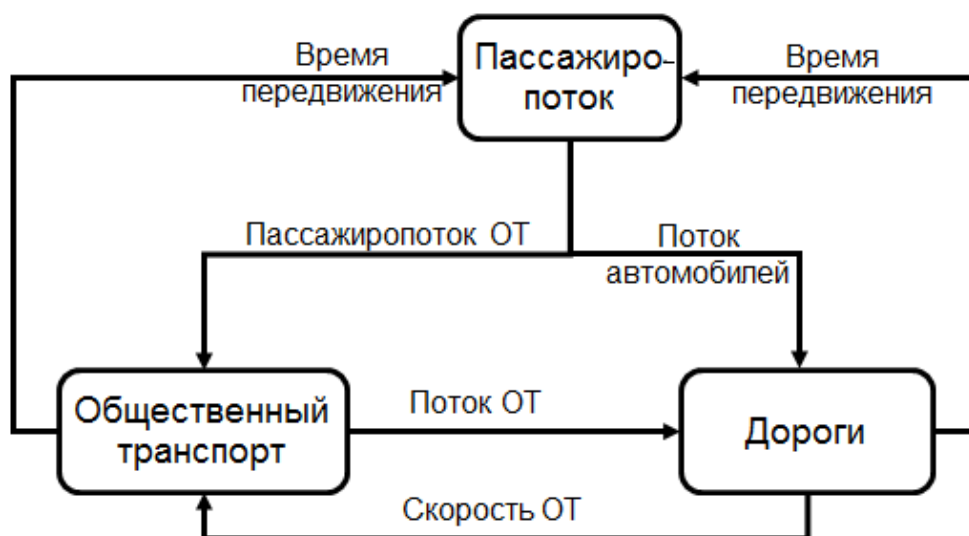
и муниципальных органов власти, управляющих дорогами.

Система общественного транспорта

Как уже было упомянуто, структура системы городского пассажирского транспорта может быть представлена следующими подсистемами: дороги, пассажиропоток и оператор общественного транспорта. Все участники влияют друг на друга, поэтому критерии эффективности принимаемых решений зависят от параметров всех участников.

В опубликованных моделях [6] время передвижения было статичным, т. е. выбор способа передвижения не влиял на время передвижения на личном и общественном транспорте. В настоящей статье такое влияние учитывается путем введения участника «муниципальные органы власти» (власти управляют подсистемой «дорога»). Стратегия этого участника – пропускная способность дорог или время передвижения (которые связаны между собой), цель – сокращение затрат на эксплуатацию дорог и времени передвижения.

Параметры влияния городской системы на ее участников показаны на схеме. Пассажиропоток учитывает время передвижения на личном и общественном транспорте (ОТ) для выбора способа передвижения. Выбор формирует пассажиропоток на общественном транспорте и поток легковых автомобилей. Интервал движения общественного транспорта зависит от скорости движения и интенсивности пассажиропотока. Пропускная способность дорог корректируется



Взаимное влияние параметров транспортной системы

в зависимости от интенсивности потока транспорта, что определяет скорость его движения.

Подсистема «пассажиропоток»

Подсистема «пассажиропоток» определяет интенсивность пассажиропотока на общественном транспорте и интенсивность движения автомобилей. Трудно представить, что каждый пассажир будет выполнять расчеты разных характеристик поездки, строить модель и решать ее численным методом. Но поведение пассажиропотока в целом можно описать математически.

Поток пассажиров ищет баланс между использованием частного автомобиля и общественного транспорта. Поездка на личном автомобиле дороже, чем на общественном транспорте, но требует меньше времени. Поэтому часть пассажиропотока с низкой стоимостью времени будет использовать общественный транспорт.

Основные параметры, которые определяют выбор способа передвижения:

β – тариф на общественном транспорте;

t – время передвижения на личном автомобиле;

Δt – разность времени между поездками на общественном и личном транспорте (исключая время ожидания);

μ – частота движения общественного транспорта (интенсивность пуассоновского потока);

c – финансовые затраты на передвижение на личном автомобиле;

λ – интенсивность пассажиропотока;

γ – средняя стоимость пассажира-часа;

p – вероятность использования личного автотранспорта.

В [9] стоимость времени описывается равномерным распределением, но при высоком социальном неравенстве стоимость времени изменяется в широком диапазоне, тогда используют экспоненциальное распределение [6].

Обычно модели выбора режима движения основаны на логит-моделях [10]. Логит-модель описывает влияние разности времени передвижения Δt и стоимости проезда Δc на вероятность выбора способа передвижения:

$$p(\Delta t, \Delta c) = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_t \Delta t + a_c \Delta c)}, \quad (1)$$

где a_0 , a_t , a_c – параметры логит-функции.

Но обычную логит-функцию нельзя использовать в нашей модели, поэтому вводится фиктивная целевая функция [11]:

$$G(p) = (p - p(\Delta t, \Delta c))^2 = \left(p - \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_t \Delta t + a_c \Delta c)} \right)^2 \rightarrow \min_p. \quad (2)$$

Очевидно, что функция $G(p)$ выпукла вниз по параметру p .

Подсистема «общественный транспорт»

Стратегией общественного транспорта является выбор частоты движения μ . Общественный транспорт может увеличить пассажиропоток, увеличив частоту движения μ (снижение времени ожидания обуславливает рост привлекательности транспорта), но при этом также возрастут расходы.

Критерием эффективности пассажирских перевозок является минимизация потерь времени пассажиров и транспортных расходов:

$$H_1(\mu) = \frac{\gamma(1-p)}{\mu} + \alpha\mu \rightarrow \min. \quad (3)$$

При этом должно быть выполнено ограничение на пассажироместимость q :

$$\lambda(1-p) \leq q\mu. \quad (4)$$

Подсистема «дорога»

Муниципальные органы власти должны найти оптимальные параметры дорожной инфраструктуры, которые зависят от интенсивности движения.

Теория транспортных потоков развита в достаточной степени, многие модели построены на основе фундаментальной диаграммы Гриншилдса [12, 13].

Ширина дороги (связанная с пропускной способностью) влияет на скорость. Основная модель BPR [14] определяет время передвижения

$$t = t_0 \left(1 + \beta \frac{\lambda p}{\lambda_0 w} \right)^\alpha, \quad (5)$$

где t_0 – время свободного движения; λ_0 – пропускная способность на единицу ширины; w – средняя ширина дороги; α и β – параметры BPR-функции, рассчитываемые на основе наблюдений.

Ширина дороги w выражается через время передвижения t :

$$w = \lambda p (\beta)^{\frac{1}{\alpha}} / \lambda_0 \left(\left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right). \quad (6)$$

Формула (6) выпукла вниз по переменной t (доказательство через вторую производную)

$$\frac{\alpha \lambda p (t_0)^{\frac{1}{\alpha}} (t)^{\frac{1}{\alpha}-2} (\beta)^{\frac{1}{\alpha}}}{\lambda_0 \left((t)^{\frac{1}{\alpha}} - (t_0)^{\frac{1}{\alpha}} \right)^3} \left[\frac{1}{\alpha} (t)^{\frac{1}{\alpha}} + (t)^{\frac{1}{\alpha}} - (t_0)^{\frac{1}{\alpha}} + \frac{1}{\alpha} (t_0)^{\frac{1}{\alpha}} \right] > 0.$$

Дополнительные параметры модели:

c_r – расходы на дорогу (увеличение ширины);

d_t – экологический ущерб и расходы на один рейс общественного транспорта;

d_c – экологический ущерб и расходы за одну поездку на личном автомобиле.

Целевая функция муниципальных органов власти состоит в сокращении потерь времени для пассажиров и ограничении расходов на инфраструктуру и обслуживание транспорта:

$$F(t, p, \mu) = p \lambda t \gamma + (1 - p) \lambda \left(t + \Delta t + \frac{1}{\mu} \right) + \frac{(\lambda p + d \mu) \delta t^2 v_0}{(v_0 t - l)} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Общественный транспорт требует меньше обеспеченности дорожной инфраструктурой на одного пассажира, чем автомобиль. Поэтому рассматривается более сложный критерий – сумма времени передвижения, транспортные расходы $\alpha \mu$ и $c \lambda p$, а также расходы на дорогу.

Оптимизация городской транспортной системы

Сначала участник должен определить набор стратегий.

Для пассажиропотока это вероятность использования автомобиля $p \in P$, $P = [0, 1]$. Для общественного транспорта $\mu \in M$, $M = [0, \bar{\mu}]$ (очевидно, что интенсивность движения не может быть бесконечной и ограничена $\bar{\mu}$). Для дороги скорость передвижения $t \in T$, $T = \left[\frac{l}{v_0}, \bar{t} \right]$. Нижняя граница определена максимальной скоростью, а верхняя должна быть

ограничена разумными пределами (транспортный коллапс не рассматривается).

Пассажиропоток минимизирует общие расходы пассажиров на поездку за счет изменения вероятности использования автомобиля. Общественный транспорт сводит к минимуму время ожидания и расходы на общественный транспорт, изменяя частоту движения. Власти сводят к минимуму потери времени для пассажиров и расходы на инфраструктуру и обслуживание транспорта (7) путем изменения времени поездки. Таким образом, построена игра с тремя участниками.

При этом в игре $\langle P, M, T, -G, -H_1, -F_1 \rangle$ существует равновесие Нэша. Для обоснования тезиса необходимо проверить условия теоремы существования равновесия Нэша [15]:

1) набор чистых стратегий игроков компактный, выпуклый и не пустой;

2) функции выигрыша игроков квазивогнуты по собственным стратегиям p, t, μ .

Эти условия, очевидно, выполнены (в тексте настоящей статьи указано выполнение каждого условия).

Заключение

Приведем основные результаты работы.

1. Представлены три участника транспортной системы: пассажиропоток, общественный транспортный оператор и муниципальные органы власти (управляют дорогой). Построены стратегии, определены набор стратегий и целевые функции участников.

2. Сформулирована математическая постановка задачи. Доказано существование равновесия Нэша.

Следующим этапом исследования станет обобщение данных моделей для сети дорог реального размера. Дорожная сеть будет представлена в виде набора участников (сегментов дороги), кроме того, в модель включим множество пассажиропотоков (между каждой парой пунктов). Важно установить адекватность моделей в реальных ситуациях. Отметим, что невозможно найти оптимальное решение для города реального размера, поскольку широкомасштабная целевая функция не будет выпуклой [6]. Данная модель позволит быстро найти равновесие Нэша между участниками транспортной системы. И если точка равновесия бу-

дет близка к оптимальной точке, то предлагаемый подход может быть использован на практике.

Перечислим проблемы, требующие дальнейших исследований:

– наличие других видов общественного транспорта (которые используют особый путь, например, легкий рельс, троллейбус, BRT, метро);

– влияние генерации перемещений;
– оптимизация городского планирования (парковки, парки, культурно-бытовые объекты, место работы, место жительства);
– обобщение модели на случай сети дорог реального размера;
– сотрудничество с учеными-практиками, позволяющее реализовать модели для расчета оптимальных параметров реальных городов.

Библиографический список

1. Downs A. Still stuck in traffic: coping with peak-hour traffic congestion. Washington, DC : Brookings Institution Press, 2005. 472 p.
2. Модели и механизмы в управлении организационными системами / С. А. Баркалов, В. Н. Бурков, Д. А. Новиков, Н. А. Шульженко. М., 2003. 560 с.
3. Bus rapid transit: planning guide / W. Hook et al. ; Institute for Transportation and Development Policy (ITDP). URL: http://www.itdp.org/index.php/microsite/brt_planning_guide. N. Y., 2007. 811 p.
4. Hollander Y., Prashker J. N. The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis // Transportation. 2006. Т. 33, № 5. P. 481–496.
5. Evans A. A theoretical comparison of competition with other economic regimes for bus services // Journal of Transport Economics and Policy. 1987. Vol. 21, № 1. P. 7–36.
6. Корягин М. Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов. Новосибирск : Наука, 2011. 140 с.
7. Bell M. G. H., Wichensin M. Road use charging and inter-modal user equilibrium: the Downs-Thompson paradox revisited // Energy, Transport & the Environment. L. : Springer, 2012. P. 373–383.
8. Zhang X., Huang H. J., Zhang H. M. Integrated daily commuting patterns and optimal road tolls and parking fees in a linear city // Transportation Research. Pt. B: Methodological. 2008. Т. 42, № 1. P. 38–56.
9. Dodgson J. S., Katsoulacos Y. Quality Competition in Bus Services: some welfare implications of bus deregulation // Journal of Transport Economics and Policy. 1988. Vol. 22, № 3. P. 263–281.
10. Horowitz J. L., Koppelman F. S., Lerman S. R. A Self-instructing Course in Disaggregate Mode Choice Modeling. Final Report. Washington, DC, 1986. 184 p.
11. Koryagin M., Dekina A. Optimization of the road capacity and the public transportation frequency which are based on logit-model of travel mode choice // International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling. L. : Springer, 2014. P. 214–222.
12. A study of traffic capacity / B. D. Greenshields et al. // Highway research board proceedings. 1935. Vol. 14, pt. 1. P. 448–477.
13. Kerner B. S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory. Berlin ; N. Y. : Springer, 2009. 263 p.
14. Patriksson M. The traffic assignment problem: models and methods. N. Y. : Courier Dover Publications, 2015. 240 p.
15. Glicksberg I. L. A further generalization of the Kakutani fixed point theorem, with application to Nash equilibrium points // Proceedings of the American Mathematical Society. 1952. Т. 3, № 1. P. 170–174.

M. E. Koryagin, K. L. Komarov

The Urban Transport System Optimization when Different Objectives of Municipal Authorities, Transport Operators and Passengers

Abstract. In recent decades, urban transport systems in our country are changing rapidly. Currently, the passenger demand can be realized in various modes. Thus, the transport model of the city should take into account the passengers travel mode choice. This article discusses the management system of urban passenger transport. The participants of the system are passenger traffic, public transport operator and municipal authorities. For each of the participants the goal functions and a set of strategies are defined. The system of urban passenger transport management is considered. The participants of the system are passengers, public transport operator and municipal authorities. Participants' strategies include the choice of travel mode (passengers), frequency of public transport

(public transport operator) and road capacity (municipal authorities). The goal functions are transport costs, costs of roads and travel time. The travel mode choice model is based on logit-distribution. The passengers use the squared deviation from the values of logit-models as the objective function. The relationship between travel time and road capacity is described by the BPR model. The goal of the municipal authorities is the travel time and the cost of roads which depend on the road capacity.

The game-theoretic approach is used to describe the urban transportation system. In this article the conditions of the Nash theorem on the existence of equilibrium in non-coalition game of many participants are checked. The compactness and convexity of each participant strategy sets are proved. The quasi-concavity of the each player winning functions according to their own strategies is proved. Thus, the existence of Nash equilibrium for the non-coalition game of three participants (passenger traffic, municipal authorities, public transport) is justified.

Key words: *choice of transportation mode; passenger transportation; road capacity; control theory; game theory; Nash equilibrium.*

Корягин Марк Евгеньевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Высшая математика» СГУПСа. E-mail: math@stu.ru

Комаров Константин Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системный анализ и управление проектами» СГУПСа.