

Модели распределения корреспонденций общественного транспорта

Сакульева Татьяна Николаевна

Канд. экон. наук, доцент, ORCID: 0000-0001-7052-9725, e-mail: sakulyeva_tn@mail.ru

ФГБОУ ВО «Государственный университет управления»,
109542, Рязанский проспект, 99, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предмет настоящего исследования — теория моделирования транспортных потоков и современная транспортная инфраструктура в городах и регионах. В статье обсуждается классификация и применение различных моделей корреспонденций по путям для общественного транспорта — сетевых, маршрутных и мультимодальных.

Проведен сравнительный анализ двух маршрутных моделей: 1) на основе интервалов, где входная информация о каждом маршруте ограничивается его сопровождением по графу транспортной сети, последовательностью остановок, временами движения между остановками и частотами движения транспортных средств; 2) на основе расписаний, которые используют детальную информацию о расписаниях движения транспортных средств по маршрутам (время прибытия и время отправления для каждой остановки). Сделан вывод, что в моделях на основе расписаний возможно определить не стратегии поведения, как в случае моделей на основе интервалов, а конкретные пути для каждой корреспонденции. В результате анализа мультимодальных моделей организации транспортных потоков автор пришел к заключению, что наиболее востребованными в настоящее время являются модели распределения корреспонденций по мультимодальным путям.

Ключевые слова: вместимость общественного транспорта, маршрутные модели, общественный транспорт, пассажирские потоки, передвижения, подвижность населения, транспортная доступность, транспортная инфраструктура

Для цитирования: Сакульева Т.Н. Модели распределения корреспонденций общественного транспорта//Управление. 2020. Т. 8. № 4. С. 79–85 DOI: 10.26425/2309-3633-2020-8-4-79-85

Models of distribution of public transport correspondence

Tatyana N. Sakulyeva

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof., ORCID: 0000-0001-7052-9725, e-mail: sakulyeva_tn@mail.ru

State University of Management, 99, Ryazanskii pr., Moscow, 109542 Russia

Abstract

The subject of this research is the theory of traffic flow modeling and modern transport infrastructure in cities and regions. The article discusses the classification and application of various models of correspondence on public transport routes – network, route, and multimodal.

The paper carries out a comparative analysis of two route models: 1) based on the intervals, where input information about each route is limited to its tracking by the transport network graph, the sequence of stops, the times of movement between stops and the frequencies of movement of vehicles; 2) based on schedules, that use detailed information about the schedules of vehicles along routes (arrival time and departure time for each stop). The study concludes that in models based on schedules, it is possible to define not behaviour strategies, as in the case of models based on intervals, but specific paths for each correspondence. As a result of the analysis of multimodal models of organization of transport flows, the author came to the conclusion that the most popular at present are models of distribution of correspondence along multimodal routes.

Keywords: capacity of public transport, movements, passenger flows, population mobility, public transport, route models, transport accessibility, transport infrastructure

For citation: Sakulyeva T.N. (2020). Models of distribution of public transport correspondence. *Upravlenie*, 8 (4), pp. 79–85. DOI: 10.26425/2309-3633-2020-8-4-79-85



Введение [Introduction]

Многие города и регионы во всем мире постоянно сталкиваются с проблемой транспортных заторов, следствием чего является ухудшение экологической обстановки, повышения аварийности на дорогах, неэффективное использование такого ценного ресурса, как время. Среди причин образования заторов можно назвать следующие: транспортная инфраструктура работает на пределе своих возможностей и/или работает неэффективно. Мощным инструментом, направленным на решение данных задач, являются методы моделирования транспортных потоков.

Задачи грамотного планирования развития транспортной инфраструктуры и оптимальной организации дорожного движения имеют высокую степень актуальности. Математические модели позволяют получить количественные характеристики состояния транспортного потока. Моделирование загрузки сети в случае общественного транспорта является более сложной задачей, чем в случае индивидуального, поскольку пути пассажиров могут включать участки нескольких маршрутов, относящихся к разным видам транспорта (метро, автобус, троллейбус, трамвай и т.д.), связанные между собой пешими пересадками [Bairoch and Goertz, 1986; Gentile, 2016].

Модели для общественного транспорта [Models for public transport]

В обобщенные затраты для передвижения на общественном транспорте включают время передвижения, плату за проезд и различные условные «штрафные» добавки (за пересадки между маршрутами или отклонение от желаемого времени отправления/прибытия). Пассажиры общественного транспорта испытывают большой дискомфорт от ожидания и пешеходных передвижений, чем от времени движения по маршруту в салоне транспортного средства, вследствие чего принято выделять следующие компоненты времени и использовать для них индивидуальные весовые коэффициенты в спецификации обобщенных затрат:

- время пешего передвижения из района отправления до начальной остановки пути и от конечной остановки до района прибытия;
- время пешего передвижения между остановками при пересадке;
- время ожидания отправления с начальной остановки пути;
- время ожидания отправления при пересадке;
- время движения по маршруту.

Для учета различий в комфорте передвижения различными видами транспорта и в удобстве пересадок могут применяться дополнительные весовые

коэффициенты. Плата за проезд преобразуется к единицам времени делением на оценку стоимости времени пассажира. Сложность некоторых тарифных систем не позволяет в точности переносить их в модели распределения корреспонденций, поэтому используются некоторые близкие аналоги допустимой структуры.

Модели распределения по путям корреспонденций общественного транспорта можно классифицировать на сетевые и маршрутные. Сетевые модели используются в прогнозных расчетах на очень отдаленную перспективу, когда точная система маршрутов общественного транспорта неизвестна, а задан лишь некоторый подграф сети, по дугам которого предусмотрено движение общественного транспорта. Пользователи в сетевых моделях выбирают не конкретные маршруты, а кратчайший путь в заданном подграфе, обеспечивающий достижение цели. Маршрутные модели предполагают явное описание маршрутов и их характеристик благодаря этому являются более точными. Среди них принято выделять два класса: модели на основе интервалов (англ. frequency-based) и модели на основе расписаний (англ. schedule-based), принципиально различающиеся предполагаемым режимом функционирования системы общественного транспорта и определенным этим режимом поведением пользователей¹ [Szeto and Lo, 2004].

Модели на основе интервалов [Interval-based models]

В случае моделей на основе интервалов входная информация о каждом маршруте ограничивается его сопровождением по графу транспортной сети, последовательностью остановок, временами движения между остановками и частотами движения транспортных средств. Маршруты, не имеющие фиксированного интервала и следующие по расписанию, моделируются с использованием среднего интервала. Точное время прибытия маршрутного транспортного средства на остановку неизвестно, поэтому время ожидания маршрута на остановке является случайной величиной. В простейшем случае, когда транспортные средства прибывают на остановку строго через равные промежутки времени, математическое ожидание этой случайной равно половине интервала движения. Тем не менее, если интервалы

¹ JASPERS Appraisal Guidance (Transport). The Use of Transport Models in Transport Planning and Project Appraisal. August 2014. Режим доступа: http://kc-sump.eu/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Upotreba-Modela-u-prometnom-planiranju_JASPERS_kolovoz-2014.pdf (дата обращения: 29.08.2020).

между временами прибытия транспортных средств на остановку нерегулярны или если по прибытии на остановку пользователь получает некоторую дополнительную информацию о фактическом движении маршрутов, оценка математического ожидания времени на остановке будет отличаться. Вследствие этого вместо конкретного пути пользователь выбирает стратегию поведения — набор правил, следуя которым можно достичь района назначения. Путь же определяется в результате наложения стратегии поведения на реализацию случайного процесса движения общественного транспорта по сети. Модели на основе интервалов не учитывают координирование между маршрутами, описывая средние значения задержек на пересадках.

В одной из первых моделей такого класса — модели оптимальных стратегий — для каждого узла сети, в котором может оказаться пассажир при движении к цели, определен некоторый набор маршрутов, и стратегия пассажира заключается в том, чтобы оказавшись в узле выбирать тот маршрут из набора, который будет отправляться из узла первым. Стратегию можно рассматривать как некоторый подграф (множество узлов и соединяющих их дуг) маршрутного графа. Каждый из путей в этом подграфе будет «активироваться», если в точках ветвления вдоль него первым будет проезжать соответствующий маршрут. Оптимальной стратегией называется такая допустимая стратегия, для которой средние затраты достижения цели из узла минимальны.

Модели на основе расписаний **[Schedule-based models]**

Модели на основе расписаний используют детальную информацию о расписаниях движения транспортных средств по маршрутам (время прибытия и время отправления для каждой остановки). Наличие этой информации позволяет определить не стратегии поведения, как в случае моделей на основе интервалов, а конкретные пути для каждой корреспонденции. Более того, эти пути имеют временную привязку, то есть модели на основе расписаний являются динамическими — они позволяют учитывать динамику спроса и предложения и рассчитывать индикаторы функционирования системы общественного транспорта в зависимости от времени.

Модели на основе расписаний при распределении корреспонденций по путям учитывают желаемое время отправления или прибытия: период анализа разбивается на интервалы, для каждого из которых задается доля спроса, желаемое время отправления или прибытия для которой лежит в этом интервале. Кривая распределения по времени определяется

для каждого сегмента спроса: например, для слоя «Дом-Работа» может задаваться желаемое время прибытия на работу (время начала рабочего дня), а для слоя «Работа-Дом» желаемым уже является время отправления (время окончания рабочего дня). Модели на основе расписаний позволяют в полной мере учитывать координирование различных маршрутов и имеют более высокую точность в сравнении с моделями на основе интервалов движения, особенно при больших интервалах.

Процесс выбора пользователей путей можно разделить на два этапа: формирование множества альтернативных путей и выбор из этого множества. Для формирования множества альтернативных путей в сети общественного транспорта могут использоваться два различных метода: поиск кратчайших путей и метод ветвей и границ. Сначала на основе расписаний генерируется множество сегментов путей, которые впоследствии будут соединяться в полноценные пути. Сегментом пути может быть либо пешие передвижения между узлами, либо беспересадочное движение между какими-то двумя остановками некоторого маршрута. Пешие сегменты в отличие от сегментов с использованием общественного транспорта, не имеют привязки ко времени, поскольку доступны в любое время. Для каждого района отправления строится дерево частичных путей, удовлетворяющих некоторым условиям. В результате поиска для каждой пары корреспонденций будет найден не только самый оптимальный путь, но и целое множество достаточно хороших альтернативных путей, цена которых не более чем на заданную величину выше цены кратчайшего пути. Метод ветвей и границ предполагает меньшее количество вычислений, но требует большего объема оперативной памяти для хранения информации обо всех путях.

В отличие от поиска кратчайших путей, метод ветвей и границ устойчив к неточностям в исходных данных, что становится особенно важным в случаях, когда несколько путей имеют близкие значения затрат. Также метод ветвей и границ позволяет реализовать более гибкие принципы, формирования множества альтернатив. Например, в него могут включаться пути, не попадающие в допустимый диапазон затрат, но оптимальные по отдельным критериям, например самый быстрый или самый дешевый. Могут использоваться дополнительные ограничения: на количество пересадок, общую длину пеших участков и другие. По окончании процесса поиска путей выполняется их повторная оценка. В первую очередь более точно (на основе фактической тарифной системы) определяется стоимость

проезда. В результате часть путей, значительно уступающих другим по своим характеристикам, исключается из дальнейшего анализа. Также являются доминирующие пути, которые хуже некоего другого пути по всем характеристикам, и эквивалентные пути, использующие одни и те же рейсы маршрутов, но различающиеся остановками пересадки.

После того как множество путей сформировано, в дело вступает некоторый механизм распределения корреспонденций между путями в зависимости от обобщенных затрат для этих путей.

Учет вместимости общественного транспорта [Public transport capacity accounting]

Во многих моделях для общественно транспорта при распределении корреспонденций по путям не учитывается соотношение спроса и предложения. Тем не менее, факт уровня загрузки является одним из ключевых при выборе путей пользователями: маршруты с низкой пропускной способностью с ростом загрузки могут терять свою привлекательность, а иногда и вовсе физически не способны перевести всех желающих, что приводит к возникновению очередей на остановочных пунктах и еще большему росту затрат. Для учета вместимости общественного транспорта в модель вводят функциональные зависимости общественной цены передвижения от уровня загрузки салона. Спецификации таких зависимостей обычно включают две критические точки. Первая точка — количество сидячих мест в салоне, при превышении пассажиропотока над этой величиной в обобщенную цену пути вносится штрафная добавка, учитывающая меньший комфорт передвижения. Вторая точка — общее количество пассажиров, которое физически может перевезти используемый подвижной состав. При превышении пассажиропотока над этой величиной пользователь должен ждать следующего рейса маршрута, увеличивая тем самым время своей поездки.

В рассмотренной ситуации цены путей зависят от загрузки сети, которая в свою очередь зависит от цен путей. Поиск равновесия в такой системе с обратной связью предполагает модификацию описанных выше расчетных процедур в итерационные. На каждой итерации:

- вычисляются обобщенные цены путей с учетом штрафных добавок за перегруженность участков маршрутов;
- определяется вспомогательное распределение корреспонденций по путям для найденных обобщенных цен путей;

- новое решение вычисляется как взвешенное среднее решения с предыдущей итерации и нового вспомогательного распределения потоков по путям, что обеспечивает сходимость итерационного процесса;
- вычисляется новая загрузка транспортных средств на отдельных участках каждого маршрута.

В качестве альтернативы может применяться расчет распределения пассажиропотоков порциями: весь спрос делится на несколько порций, и на каждом шаге происходит распределение по путям новой порции корреспонденций с последующим пересчетом общей загрузки маршрутов с обобщенных цен с учетом новой порции. В любом случае потребуются многократный запуск процедуры распределения корреспонденций по путям, что может критически сказаться на времени расчета.

Мультимодальные модели [Multimodal models]

Часто маршрут пользователей общественного транспорта представляет собой цепочку сегментов путей с использованием различных видов транспорта. В связи с этим большое значение приобретают модели распределения корреспонденций по мультимодальным путям, то есть мультимодальные модели. В модели мультимодального распределения корреспонденций по путям можно выделить два уровня. Верхний уровень описывает распределение корреспонденции по мультимодальным цепочкам. Каждая такая цепочка определяет последовательность используемых видов транспорта и районы, в которых происходит смена одного вида транспорта на другой, но не содержит детальной информации о прохождении пути.

Распределение корреспонденций по цепочкам происходит аналогично распределению по путям корреспонденций общественного транспорта при наличии расписаний. Сначала с использованием метода ветвей и границ выполняется поиск возможных цепочек, обеспечивающих достижение района назначения и удовлетворяющих некоторым ограничениям (на допустимую последовательность видов транспорта, на протяженность участка подвоза, допустимую разницу затрат в сравнении с оптимальной мультимодальной цепочкой и т.д.). Поиск выполняется в специальном мультиграфе, вершинами которого являются транспортные районы, а дугами — возможные способы передвижения между районами. Для оценки путей используются унимодальные матрицы затрат для каждого вида транспорта. Далее выполняется распределение общего объема корреспонденций по мультимодальным цепочкам и формирование из отдельных

элементов цепочек матриц корреспонденций для каждого вида транспорта.

Нижний уровень описывает распределение формируемых на верхнем уровне корреспонденций каждого вида транспорта по путям, причем для каждого вида транспорта может использоваться своя индивидуальная модель. Результирующая загрузка сети позволяет определить матрицы затрат для различных видов транспорта, которые затем используются в модели верхнего уровня для формирования цепочек унимодальных передвижений. Тем самым в модели возникает обратная связь, и для поиска положения равновесия в ней используются итерационные процедуры.

Заключение [Conclusion]

Выбор между моделями на основе интервалов и моделями на основе расписаний главным образом связан с наличием информации о расписаниях маршрутов общественного транспорта. При решении задач долгосрочного транспортного планирования точные расписания маршрутов еще неизвестны, поэтому лучшим выбором станут модели на основе интервалов. И даже при наличии расписаний модели на основе интервалов в некоторых случаях могут лучше воспроизводить загрузку сети общественного транспорта. Действительно, едва ли можно считать, что пользователи ориентируются на расписание при выборе пути и выбирают конкретные рейсы маршрутов, если интервалы движения маршрутов не превосходят 10 минут, расписания маршрутов регулярно не соблюдаются или доступ к информации о расписаниях затруднен [Hensher, 2016; Sakulyeva, 2018].

Фактор уровня загрузки является одним из ключевых при выборе путей пользователями: маршруты с низкой пропускной способностью с ростом загрузки могут терять свою привлекательность, а иногда и вовсе физически не способны перевести всех желающих, что приводит к возникновению очередей на остановочных пунктах и еще большему росту затрат. Для учета вместимости общественного транспорта в модель вводят функциональные зависимости обобщенной цены передвижения от уровня загрузки салона. Спецификация таких зависимостей обычно включают две критические точки. Первая точка — количество сидячих мест в салоне. При превышении пассажиропотока над этой величиной в обобщенную цену пути вносится штрафная добавка, учитывающая меньший комфорт передвижения. Вторая точка — общее количество пассажиров, которое физически может перевезти используемый подвижной состав. При превышении пассажиропотока над этой величиной пользователь должен ждать следующего рейса маршрута, увеличивая тем самым время своей поездки.

В рассмотренной ситуации цены путей зависят от загрузки сети, которая в свою очередь зависит от цен путей. Поиск равновесия в такой системе с обратной связью предполагает модификацию описанных выше расчетных процедур в итерационные, то есть применение мультимодальных моделей.

Список литературы

- Bairoch P., Goertz G. (1986). Factors of urbanisation in the nineteenth century developed countries: a descriptive and econometric analysis // *Urban Studies*. V. 23. No. 4. Pp. 285–305. DOI: 10.1080/00420988620080351.
- Gentile G. (2016). Solving a dynamic user equilibrium model based on splitting rates with gradient algorithms // *Transportation Research. Part B: Methodological*. V. 92. Part B. Pp. 120–147. DOI: 10.1016/j.trb.2016.02.005.
- Hensher D.A. (2016). Future bus transport contracts under mobility as a service regime in the digital age: are they likely to change? Australia, Sydney. 215 p.

References

- Bairoch P. and Goertz G. (1986), “Factors of urbanisation in the nineteenth century developed countries: a descriptive and econometric analysis”, *Urban Studies*, vol. 23, no. 4, pp. 285–305. DOI: 10.1080/00420988620080351.
- Gentile G. (2016), “Solving a dynamic user equilibrium model based on splitting rates with gradient algorithms”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 92, issue PB, pp. 120–147. DOI: 10.1016/j.trb.2016.02.005.
- Hensher D.A. (2016), *Future bus transport contracts under mobility as a service regime in the digital age: are they likely to change?* Sydney, Australia.

Sakulyeva T. (2018). Megapolis public transport system // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. V. 9. No. 10. Pp. 647–658.

Szeto W.Y., Lo H.K. (2004). A cell-based simultaneous route and departure time choice model with elastic demand // *Transportation Research Part B: Methodological*. V. 38. No. 7. Pp. 593–612.

Sakulyeva T. (2018), “Megapolis public transport system”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 9, issue 10, pp. 647–658.

Szeto W.Y. and Lo H.K. (2004), “A cell-based simultaneous route and departure time choice model with elastic demand”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 38, no. 7, pp. 593–612.

Translation of front references

¹ JASPERS Appraisal Guidance (Transport), (2014), The use of transport models in transport planning and project appraisal, August. Available at: http://kc-sump.eu/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Uпотреба-Modela-u-prometnom-planiranju_JASPERS_kolovoz-2014.pdf (accessed 29.08.2020).