

ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИГОРОДНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Кандидат техн. наук, доцент **Копылова Е.В.**
(Российский университет транспорта. РУТ - МИИТ)

DYNAMIC METHODS OF ORGANIZATION OF SUBURBAN PASSENGER TRANSPORTATION

Ph.D. (Tech.), Associate Professor **Kopylova E.V.**
(Russian University of Transport)

Пассажиропоток, оптимизация, модель, динамическое согласование, организация пассажиропотока.

Passenger flow, optimization, model, dynamic correlation, organizing of passenger flow.

Проанализированы существующие методы организации пригородных пассажирских перевозок и сформулированы задачи оптимизации при организации пригородного пассажиропотока. Предложен метод оптимизации, описаны преимущества метода динамического согласования. Приведено описание возможностей модели организации пассажиропотока.

The existing methods of organizing suburban passenger transportation are analyzed and optimization tasks in organization of suburban passenger flow are formulated. The optimization method is chosen, advantages of dynamic correlation method are described.

В современных исследованиях оптимизацию и/или рационализацию параметров организации пригородных и пригородно-городских пассажирских перевозок чаще всего рекомендуется осуществлять с использованием транспортной задачи линейного программирования. Это может привести к различным недостаткам сформированной с его помощью транспортной системы городской агломерации. Эти недостатки могут сказаться не только на уровне клиентоориентированности и качестве транспортного обслуживания населения, но и на эффективности работы транспорта.

Классическая транспортная задача является статической и, естественно, не отображает динамику транспортных процессов. Станция отправления пассажиров (включая расположенный на ней вокзальный транспорт или остановочный пункт) и станция назначения (включая расположенный на ней вокзальный транспорт или остановочный пункт) работают в определенных транспортных ритмах, которые чаще всего не совпадают. При организации работы мультимодальных (интермодальных) транспортных систем речь может идти не только о ритмах работы непосредственно объектов железнодорожного транспорта, но и о ритмах работы подвозящего и развозящего транспорта.

В качестве статических резервов с точки зрения организации пассажирских перевозок может рассматриваться подвижной состав различных видов транспорта, а в агломерациях - это в основном подвижной состав железнодорожного и автомобильного транспорта. При оптимизации работы транспортной системы может быть снижено количество электроподвижного состава (или автотранспорта) в обороте либо снижен производительный пробег свободных мест в пригородных электропоездах и подвижном составе автотранспорта.

Транспортно-пересадочный узел можно только частично рассматривать в качестве «склада», поскольку пассажир не будет ждать слишком долго отправления далее по маршруту. Каждый последующий перевозчик

является получателем пассажира от предыдущего перевозчика на маршруте (рис.1), при этом, если основным перевозчиком является железнодорожный транспорт, даже при наличии дублирующих маршрутов автотранспорта, в часы «пик» он будет практически незаменим при обеспечении необходимой провозной способности.

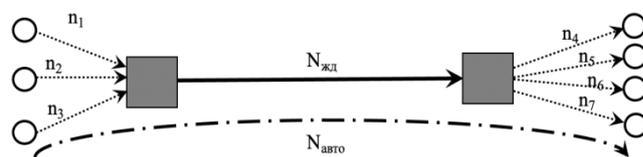
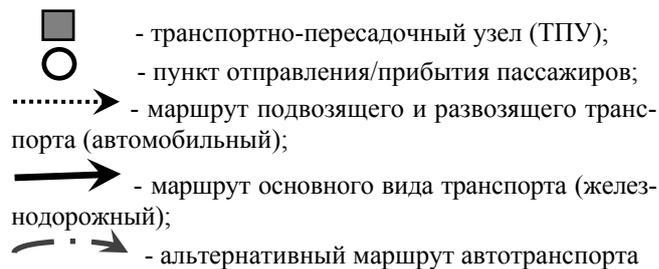


Рис. 1. Логистические маршруты перевозки пассажиров:



Для обеспечения качественного обслуживания пассажиров и освоения заданного пассажиропотока необходимо обеспечить сбалансированность предлагаемых мест на всем маршруте следования пассажиров. Если предположить, что на всех этапах маршрута перевозка осуществляется только подвижным составом любого вида транспорта с одним классом обслуживания (базовым), то тогда необходимо, чтобы количество предлагаемых мест в подвозящем автотранспорте ($n_1+n_2+n_3$) соответствовало количеству мест, предлагаемых в основном транспорте (в пригородном электропоезде) $N_{жд}$. При этом количество мест в пригородном электропоезде должно быть с учетом величины пассажиропотока, отправляющегося не только с конечной станции, но и с

промежуточных станций пригородного участка (куда пассажиров также может подвозить автотранспорт). Количество мест в развозящем транспорте ($n_4+n_5+n_6+n_7$) также должно соответствовать количеству мест в вагонах прибывающего пригородного электропоезда $N_{жд}$. Важным фактором является характер пассажирообмена в пункте пересадки между транспортными средствами - односторонний или взаимный (рис. 2).

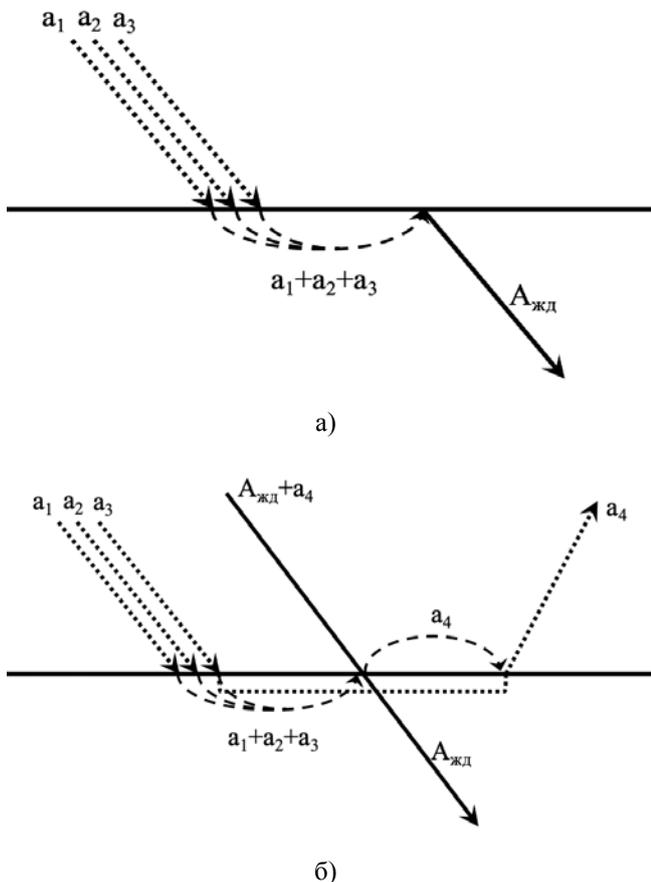


Рис. 2. Схемы пассажирообмена между транспортными средствами в пункте пересадки:
а) односторонний пассажирообмен,
б) двусторонний (взаимный) пассажирообмен как пример

Пассажир, в отличие от груза, может самостоятельно совершать перемещение из одного транспортного средства в другое. Даже если расписание движения транспортных средств максимально согласовано на маршруте, но при этом имеется следующий по расписанию пригородный электропоезд или автобус, то при небольших интервалах движения подвижного состава пассажир может пересечь в него, а не в тот подвижной состав, расписание которого, по мнению перевозчика, согласовано. Особенно это проявляется в вечернее время, когда пассажир жестко не привязан к определенному времени поездки и может задержаться для совершения покупок, встречи и т.д.

Задержка пассажира в пункте пересадки может быть вызвана причинами не только от него зависящими, но и сбоями в работе транспорта (пробки, аварии и т.д.). В этом случае возникнет непроизводительный простой транспортного средства, в которое должны были пересечь пассажиры (если есть возможность его задержать), либо необходим резерв мест в транспортном средстве, следующем по расписанию (рис. 3).

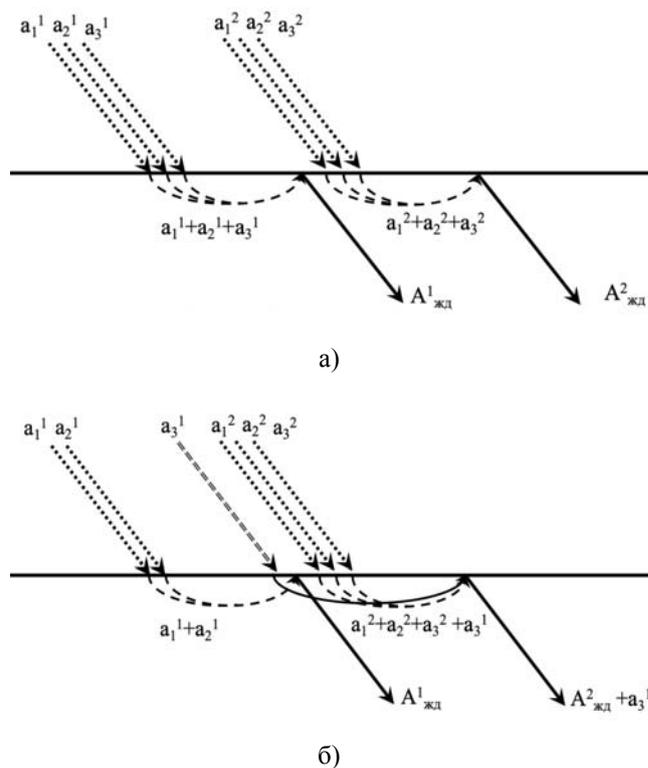


Рис. 3. Схема пассажирообмена в пункте пересадки:
а) при выполнении согласованного расписания движения транспортных средств,
б) при опоздании подвозящего транспортного средства в пункт пересадки

Представленная на рисунке 3 схема пассажирообмена рассматривает наличие резерва пассажирских мест в пригородном электропоезде, отправляющемся в пункт пересадки в следующий период времени при опоздании автотранспорта. Возможность опоздания автотранспорта увеличивается в часы «пик» из-за возникновения «пробок», когда пассажиропоток максимален.

Наличие резервных составов электропоездов в обороте или наличие резервного автотранспорта, готового выйти на линию, при возникновении сбоев в расписании относится к статическим резервам. Динамические резервы можно получить с помощью управленческих решений при организации движения транспортных средств на маршруте. Кроме того, в качестве резерва могут выступить альтернативные виды транспорта, работающие на маршруте. Именно по этой причине не стоит отказываться от частичного дублирования железнодорожных маршрутов автотранспортом.

При несоответствии, например, ритма подвоза автотранспортом пассажиров на станцию отправления и требуемого ритма отправления (режима остановок) с нее пригородных электропоездов возникают дополнительные затраты на ожидание пассажирами транспорта. В конечном итоге эти затраты времени пассажиров могут привести к повышенной нагрузке на пассажирские устройства вокзальных комплексов и остановочных пунктов, а также могут вылиться в расходы транспорта, связанные с потерей пассажиров, которые могут отказаться со временем от совершения поездок. Осуществить оптимизацию с учетом этого с помощью классической транспортной задачи нельзя.

Кроме того, при оптимизации необходимо начинать работать не с параметрами перевозочного процесса, а с параметрами пассажиропотока. Именно организация

пассажиропотока позволит максимально учесть потребности пассажиров и в дальнейшем использовать их для расчета параметров эффективной транспортной системы, то есть работать уже с организованным пассажиропотоком [1-4].

Статическая транспортная задача формулируется следующим образом: найти минимум затрат на перевозки из пунктов зарождения пассажиропотока в пункты погашения (в основном на головную станцию пригородного участка).

$$\sum_i \sum_j c_{ij} u_{ij} \min, \sum_j u_{ij} = a_i, \sum_i u_{ij} = b_j,$$

где

c_{ij} – стоимость перевозки пассажира пригородным поездом по участку x_{ij} за 1 такт, руб.;

u_{ij} – объем пассажиропотока, осваиваемого пригородным электропоездом, на участке x_{ij} чел.;

a_i – объем зарождения пассажиропотока на станциях отправления, чел.;

b_j – объем пассажиропотока, погашаемого на станции назначения, чел.

В динамической постановке все эти параметры могут изменяться во времени.

Динамическую транспортную задачу можно описать следующим образом.

Пусть транспортная сеть состоит из $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ пунктов, соединенных направленными путями (x_i, x_j) , $i \neq j, x_i, x_j \in X$ (рис.4). Пусть $[0, T]$ – интервал оптимизации функционирования транспортной системы. Для каждого момента времени $t (t \in \overline{0, T})$ на множестве X пунктов сети определена функция зарождения и погашения пассажиропотоков $q_i(t)$. Если $q_i(t) > 0$, то такой пункт x_i называют пунктом зарождения пассажиропотоков, если $q_i(t) < 0$, то такой пункт x_i называют пунктом погашения пассажиропотоков и, если $q_i(t) = 0$, такой пункт x_i называют пунктом пересадки. Каждый путь (x_i, x_j) характеризуется пропускной способностью $d_{ij}(t) \geq 0$. При $i = j$ вместимость пункта ожидания x_i означает $d_i(t)$.

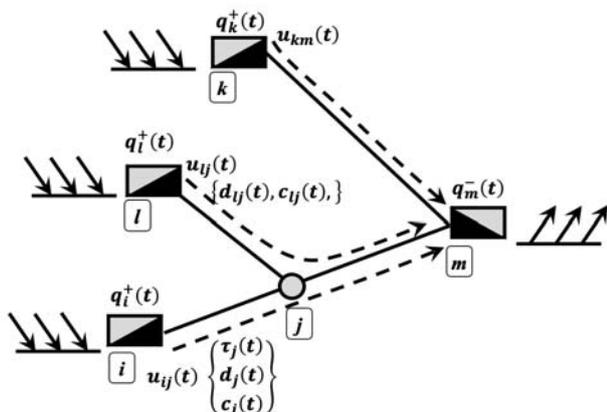


Рис. 4. Схема динамической потоковой модели

Обозначим через $u_{ij}(t)$, $t \in \overline{0, T}$ пассажиропоток на станции (x_i, x_j) , выходящий в момент t из пункта x_i и приходящий в момент $t + \tau_{ij}$ в пункт x_j . Если путь

(x_i, x_j) отсутствует или $t + \tau_{ij} > T$, то полагаем $u_{ij}(t) = 0$. Ясно, что все $u_{ij}(T) = 0, i \neq j$. Пассажиропоток $u_{ij}(t)$ показывает ожидание в пункте x_i в момент времени t . Поэтому $t_{ii} = 1$. Пусть c_{ij} – стоимость перевозки пассажира пригородным поездом по участку x_{ij} за 1 такт. Тогда c_{ii} – стоимость ожидания пассажиром за 1 такт. Для каждого пункта погашения пассажиропотока x_j период, в течение которого нет прибытия пассажиров, равен $[0, \tau_j - 1]$, где $\tau_j = \min(\tau_{ij}), i \neq j$. Будем предполагать, что в момент времени $t = 0$ существует ожидание $u_{jj}(0)$, которое обеспечит отправление в период, когда невозможно прибытие пассажиров, т.е. справедливо:

$$u_{jj}(0) + \sum_{t=0}^{\tau_j-1} q_j(t) \geq 0.$$

Задача оптимизации функционирования транспортной системы ставится как задача минимизации суммарных транспортных расходов и расходов на ожидание:

$$J = \sum_{t=0}^T \sum_i c_{ij} u_{ij}(t) + \sum_{t=0}^T \sum_i c_{ii} u_{ii}(t) + \sum_{t=0}^T \sum_i c_{jj} u_{jj}(t)$$

при ограничениях:

$$u_i(t+1) = u_i(t) + q_i^+(t) + \sum_k u_{ki}(t - \tau_{ki}) - \sum_j u_{ij}(t)$$

$$\forall i \forall j \forall t | u_{ij}(t) \leq d_{ij};$$

$$\forall i \forall t | u_i(t) \leq d_i;$$

$$0 \leq u_{ij}(t) \leq d_{ij}(t); \quad x_i, x_j \in X; \quad t \in \overline{0, T},$$

$$0 \leq t + \tau_{ij} \leq T; \quad 0 \leq t - \tau_{ij} \leq T,$$

где

$q_i^+(t)$ – интенсивность зарождения пассажиропотока, чел./мин;

τ_{ij} – время хода между остановочными пунктами, мин;

d_{ij} – пропускная способность участка x_{ij} , чел./мин;

d_i – вместимость пункта ожидания, чел.

Таким образом, получаем динамическую транспортную задачу с задержками (ДТЗЗ) в сетевой постановке. Очевиден содержательный смысл ограничений, включая балансное уравнение, составленное без учета корректировки.

Данную задачу ДТЗЗ можно решить сведением к статической задаче методом размножения во времени (рис. 5).

Каждому пункту A соответствует множество $A \equiv \{a_t\}$, пункту B – b_t соответствует $B \equiv \{b_t\}$. Возникают пункты и дуги, соединяющие вершины графа. Кроме дуг, по которым идут пассажиропотоки $u_{ij}(t)$, возникают дуги, имитирующие динамику ожидания на станциях $u_{ii}(t)$, $u_{jj}(t)$. Производство (интенсивность зарождения пассажиропотока) $q_i^+(t)$ понимается в широком смысле (это и просто подход пассажиров на станцию, и прибытие подвозящим транспортом).

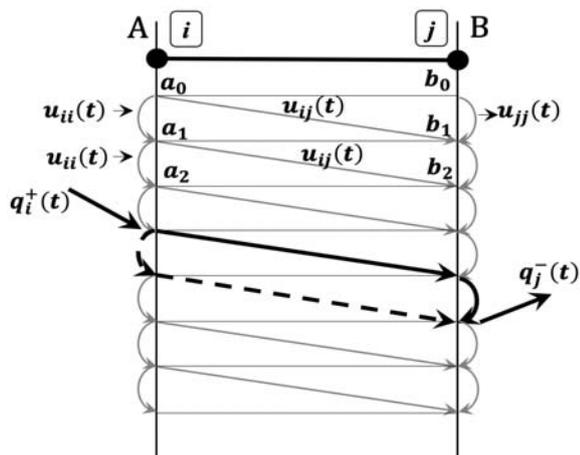


Рис. 5. Схема сведения динамической транспортной задачи к статической

Поток со станции зарождения пассажиропотока на станцию погашения может пойти двумя путями – отправиться немедленно и тогда могут возникнуть простои на станции погашения (жирная линия) или ожидание будет на станции отправления (пунктирная жирная линия).

Размноженная во времени динамическая транспортная задача является аналогом классической задачи, только большей размерности, и может быть решена одним из известных стандартных методов.

Недостатком применяемых сегодня методов является невозможность рационально адаптировать транспортную систему к меняющимся условиям функционирования, тем более сделать это достаточно оперативно. Например, «окна» на железнодорожном транспорте или проведение ремонта федеральных и региональных трасс и автодорог местного значения, а также другие проблемы, которые могут возникнуть с инфраструктурой или подвижным составом, приводят к снижению пропускной, а в итоге и провозной способности отдельных элементов логистической цепочки перевозки пассажиров и всей мультимодальной транспортной системы. В результате происходит хаотичное переключение пассажиропотока между параллельными маршрутами: кто-то пользуется возможными компенсационными маршрутами, другим видом транспорта или личным автотранспортом, кто-то переносит время поездки и т.д.

Необходимо понимать, что при корректировке работы одного из элементов транспортной системы это должно быть учтено в работе других ее элементов. Динамические модели позволяют определять оптимальные параметры транспортной системы для любых изменяющихся условий.

Динамические модели для организации пассажирских перевозок имеют широкий спектр применения. Например, с начала ноября 2020 года на двух линиях Московского метрополитена введены скидки на проезд до 50% с момента начала работы станций до 07:15 и с 08:45 до 09:15 на Таганско-Краснопресненской и Некрасовской линиях. Цель данного эксперимента, который продлится до лета 2021 года, состоит в снижении нагрузки в пиковые часы и обеспечении соблюдения социальной дистанции в метрополитене в условиях неблагоприятной эпидемиологической обстановки. Понятно, что разгрузка определенных веток метро повлияет на работу других веток, вестибюлей станций, пересадочных станций и т.д. Эксперимент длинной в

год проводится, поскольку перераспределение пассажиропотока будет различным в зависимости от сезонов года и других параметров, изменяемых во времени, однако не понятно, сколько пассажиров пожелают воспользоваться скидкой. При этом в распоряжении Московского метрополитена находится достаточное количество информации о пассажиропотоках, формируемой на основе прохода пассажиров с использованием различных форм проездных документов, в том числе карт «Тройка», а также оформленных льготных билетов, обладателей которых вряд ли заинтересует скидка.

Имея информацию о пассажиропотоках и используя динамическую модель организации пассажиропотока, можно определять влияние пассажиропотока на работу метрополитена. Можно рассмотреть варианты, если скидкой воспользуется 10, 20, 30 и т.д. процентов пассажиров, если воспользуются пассажиры определенных станций, если воспользуются те, которые едут далеко, кто проезжает всего несколько станций, если пассажиры пересекаются на определенные ветки. Все можно посмотреть и проанализировать, проводя эксперименты на компьютерной модели, реализующей метод динамического согласования. Также можно проанализировать, что будет, если ввести скидку не на всей линии, а на определенных станциях. Аналогично можно использовать динамическую модель организации пассажиропотока на пригородном и пригородно-городском железнодорожном транспорте, а также в мультимодальных пассажирских транспортных системах.

Литература

1. Вероятностное моделирование пассажиропотоков при проведении крупных спортивных соревнований // Виноградова Ю.Ю., Палагин Ю.И., Пиликина И.Ю. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник ВИНТИ РАН. – 2018. - № 6. - С. 38-41.
2. Стохастическая модель расчета зонных размеров движения пригородных поездов // Вакуленко С.П. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник ВИНТИ РАН. - 2003.- №11.- С. 7-10.
3. Вакуленко С.П., Калинин С.А. Маркетинг и планирование в сфере пригородных пассажирских перевозок// Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник ВИНТИ РАН. – 2005.- №11.- С. 17-19.
4. Вероятностное моделирование пассажиропотоков при проведении крупных спортивных соревнований // Виноградова Ю.Ю., Палагин Ю.И., Пиликина И.Ю. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник ВИНТИ РАН. – 2018. - № 6. - С. 38-41.

Сведения об авторе

Копылова Екатерина Витальевна, кандидат техн. наук, доцент, Российский университет транспорта (РУТ - МИИТ), Институт управления и цифровых технологий, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» -

127994, г. Москва, ул. Образцова, 9. С.9, (РУТ - МИИТ)

Тел. моб. +7 – 916 - 365 - 61 23

E-mail: miit.kopylova@yandex.ru.