

Проф., д.т.н. Дитер Лозе, Дрезденский Технический Университет,
Институт транспортного планирования и дорожного движения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ И СПРОСА НА ТРАНСПОРТ ДЛЯ ПАССАЖИРСКОГО И СЛУЖЕБНОГО ТРАНСПОРТА – ОБЗОР ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dieter Lohse, TUD, Dresden, Germany

TRANSPORT SUPPLY AND DEMAND MODELLING FOR PRIVATE AND COMMERCIAL TRANSPORT – A MODEL-THEORETICALLY SURVEY

This article illustrates some facts about transport models for demand formed by the three steps «Trip generation», «Trip distribution» and «Mode choice», as well as «Assignment».

Краткое изложение

В статье рассматриваются некоторые аспекты моделирования спроса на транспорт, в первую очередь с точки зрения трех шагов спроса на транспорт: «Создание» («Erzeugung»), «Распределение» («Verteilung») и «Разделение» («Aufteilung»), а также «Перераспределение» («Umlegung»).

Создание транспортных потоков рассчитывает объем транспортных потоков в транспортных районах с помощью однородных по действиям, дезагрегированных слоев (группы источник-цель), которые используются для описания реализованных активностей основных групп людей. Модель базируется на дифференцированном установлении причин перемещений. При расчетах делается попытка отобразить элементарные стохастические связи, разбивая их на определенные подгруппы с соответствующими значениями. Кроме того, через контрольные суммы в расчеты включаются различные фактические зависимости движения транспортных потоков от основных данных структуры пространства и выгодного расположения. Во избежание систематических ошибок создание, распределение и разделение транспортного потока должно быть рассчитано отдельно для каждой группы источник-цель.

Вывод базовой модели транспортного спроса без учета и с учетом условий контрольных сумм производится также в связи с универсальной моделью Logit. В транспортном планировании модель Logit – модель дискретного выбора – с ее типичной экспоненциальной функцией оценки используется очень часто. Эта функция оценки не соответствует человеческому поведению в области малых затрат, так как вероятность оценки при очень маленьких затратах минимальна. Представленная здесь функция оценки EVA (сокращение от Erzeugung-Verteilung-Aufteilung Создание-Распределение-Разделение) – устраняет этот недостаток. Эта проблематика наглядно раскрывается на основе описания соответствующих эластичностей.

Для примерного установления решения n-линейной модели EVA с условиями контрольных сумм описывается итеративная процедура (MULTI-процедура).

К модели спроса относится также выбор пути участниками дорожного движения в конкурирующих транспортных сетях. Во взаимодействии с высококачественным стохастическим методом перераспределения – в процессе обратной связи повторяющихся расчетов спроса и предложения – рассчитывается стохастическое равновесие участников движения.

0 Введение

В данной статье будут рассмотрены некоторые аспекты моделирования спроса на транспорт. **Модели спроса на транспорт** можно охарактеризовать как математические «инструменты», которые описывают качественно и количественно перемещения в связи с причинами возникновения транспортного потока и выбора активностей (модели создания транспортного потока), выбора цели транспортного потока (модели распределения транспортного потока), выбора транспортного средства (модели разделения транспортного потока) и выбора пути (модели перераспределения транспортного потока). Предлагаемая консистентная и ясно формулируемая теория транспортного спроса на основе Аксиоматики Бея, минимизации сбора информации, дискретной стохастической теории выбора и методов решения n-линейной системы уравнений с дополнительными условиями создает базу для широкого класса различных специфических моделей. При компетентном подходе и дифференцировании возможно создание сильно дезагрегированной и направленной на поведение модели пассажирских и служебных перемещений (LOHSE и др. (см. [24]) описана специфическая модель спроса служебных перемещений. Эта модель не имеет принципиальных отличий от модели спроса пассажирского потока.). Многие конкретизированные специфицированные модели транспортного спроса могут быть интерпретированы как особые случаи или модификации – возникшие на основе представленной и используемой общей теории транспортного спроса.

В экономике понятие спрос обозначает удовлетворение потребностей. В применении к транспортному сектору транспортный спрос обозначает удовлетворение опосредованных потребностей в «перемещении». Он вызван

пространственным разделением различных потребностей (например, дом, работа, магазин, другие места потребительского характера). Таким образом, под транспортным спросом следует понимать все перемещения, необходимые для реализации политических, экономических и пространственных предпосылок. Согласно этому определению, транспортный спрос отображает все перемещения субъектов перемещения (например, людей) или объектов перемещения (например, транспортных средств), а также любые другие полноценные агрегирования.

Для любого моделирования транспортного спроса необходима основополагающая **модель транспортного предложения**, в которой представлены сети видов транспорта (пешеходы, велосипедисты, движущиеся транспортные средства и на стоянках, общественный пассажирский транспорт) со всеми их специфическими особенностями. В зависимости от требуемой степени дифференцирования может быть создано достаточно точное изображение элементов сети для транспортных расчетов и оценки затрат для преодоления элементов сети и следующих из этого последствий. Соединение различных компонентов затрат с агрегированными существенными признаками предложения (например, обобщаемые затраты) может производиться по-разному в зависимости от существующих данных и типа модели. При компьютерной обработке перераспределения транспортных потоков часто используются методические элементы теории графов, географических информационных систем (GIS) и баз данных. В большинстве случаев выбор пути связан с перераспределением транспортных потоков. Для определения транспортного спроса необходимы дифференцированные количественные данные по признакам предложения в нагруженной транспортной сети в форме матрицы затрат для всех видов транспорта за определенные периоды времени (день, неделя, год). Эти данные представлены в модели предложения, включающей все виды транспорта.

1 Моделирование транспортного предложения

1.1 Сети индивидуального транспорта

В транспортном планировании вся транспортная инфраструктура с ее особенностями называется **транспортным предложением**. Однако реальные системы зачастую бывают настолько сложными, что их трудно полностью отобразить и исследовать в моделях. В таких случаях в процессе построения моделей реальные системы ограничиваются основными, иногда наиболее доступными элементами и взаимодействиями. Фокусируясь на основных признаках, модель становится понятным и пригодным для научной дискуссии отображением системы. Если система последующего анализа отображена достаточно адекватно, то модель можно использовать для выведения высказывания.

В **моделях транспортного предложения** отображаются сети различных видов транспорта с их специфическими особенностями. Моделирование предложения часто непосредственно связано с перераспределением транспортных потоков (LOHSE [22]).

В зависимости от требуемой степени дифференцирования может быть создано достаточно точное изображение элементов сети для транспортных расчетов и следующих из этого воздействий.

Транспортные сети для определенных транспортных средств могут быть хорошо описаны с помощью инструментов теории графов (см., например, DOMSCHKE [9]).

Моделируемые сети могут быть полностью представлены через узлы и отрезки. Частичное их количество является так называемыми **наполняющими узлами и отрезками**. В **наполняющих узлах** – представители транспортных районов – начинаются или заканчиваются все поездки или перемещения, которые содержатся в матрице корреспонденций и перераспределяются в транспортной модели (LOHSE [22]).

Наиболее важным критерием для оценки соотношения источник-цель, транспортного средства и относящихся к нему маршрутов в транспортном спросе являются затраты на преодоление соответствующих элементов сети или комбинации нескольких элементов сети. Эти затраты, которые несет участник движения, описывают сопротивление, оказываемое по отношению к использованию данных элементов.

Выбор участником движения маршрута определяется измеримыми (например, длина пути, время в пути) и неизмеримыми параметрами (например, привычки, ландшафт). При моделировании же сети отображаются уже не все влияния на участников движения. Так, например, априори в своем значении теряют число, количество и качество реальных влияний при принятии решения о выборе. Упрощение моделирования фактического влияния на принятие решения о выборе особенно часто применяется в случае разветвленных сетей с многочисленными маршрутами. Именно поэтому фактическое решение в модели не полностью адекватно реальности. Тем не менее, время в пути выступает как самый влиятельный параметр и поэтому часто используется как решающий параметр или как первостепенный критерий выбора (Время в пути и связанные с ним параметры (длина пути, скорость в пути, время ожидания и т. д.) могут соединяться также с другими величинами влияния (напр., доступность транспортного средства, загрузка, налоги, частота пересадок). Эти критерии выбора пути и, тем самым, оценка затрат на отрезке имеют, как правило, различные веса.) при измерении затрат.

В расчетных методах прогнозов появляется проблема такого плана, что хотя известна структура сети, однако остается неизвестной будущая интенсивность движения и, тем самым, затраты на преодоление элементов сети. Для нахождения решения используются методы с переменными затратами (LOHSE [22]). По причине имеющихся в сети „узких мест“ (ограничения пропускной способности) в соотношении источник-цель i-j на различных маршрутах возникает разное время в пути и время ожидания. Участники движения стараются избежать длительного времени поездки, выбирая другие маршруты, затраты на которые кажутся меньшими.

Время в пути или время ожидания (ТМ) отрезка модели сети могут задаваться в зависимости от входящей интенсивности движения (М) и пропускной способности (С) отрезка и выражаться функцией $T_M = f(M, C)$. Эта **функция ограничения** должна иметь результатом как можно более близкое к реальности время в пути в области $0 \leq M \leq C$, но не выходить за пределы $M > C$ (LOHSE [22]). В ограниченном во времени скоплении не образуется, несмотря на достижение или превышение границы пропускной способности, бесконечном времени ожидания (SCHNABEL [29]).

Одним из часто используемых на практике подходов является функция BPR (Функция ограничения часто называется функцией BPR (от англ. Bureau of Public Roads – управления общественных дорог); она была разработана LOHSE [21] как уравнение (1). Благодаря параметрам а, b и F функция может быть достаточно хорошо применена для существующей транспортной ситуации – также в области перегрузок.

$$T_M = T_0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{M}{C} \right)^b \right) \quad \Delta \Delta \Delta \left(\frac{M}{C} \right) \leq F \tag{1}$$

$$T_M = T_0 \cdot \left(1 + a \cdot F^b \right) + \left(a \cdot b \cdot T_0 \cdot \frac{F^{b-1}}{C} \right) \cdot (M - F \cdot C) \quad \Delta \Delta \Delta \left(\frac{M}{C} \right) > F$$

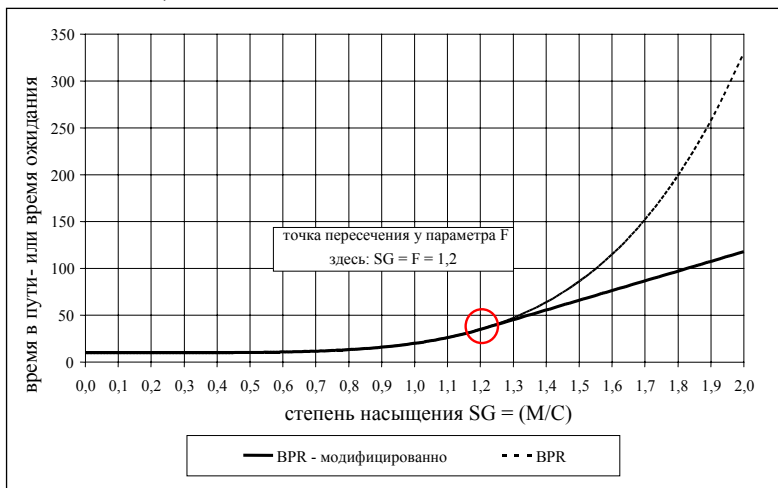


Рис. 1: Функция BPR с модификацией LOHSE

В этой функции ограничения в свободно выбранной точке F задается возрастание и проводится прямая с равным возрастанием. Тем самым, начиная с точки F, растущая часть функции BPR «удаляется» (на Рис. 1 – штрих-линия) и заменяется линейной частью, более соответствующей реальной транспортной ситуации.

Эти функции ограничения пропускной способности и соответствующее параметризирование отрезков являются важными составными частями моделирования транспортной сети, т.е. транспортного предложения.

1.2 Сети маршрутного транспорта

Основными отличительными характеристиками сети общественного маршрутного транспорта по сравнению с сетью индивидуального транспорта является привязка к маршрутам и расписанию.

Маршрут – это последовательность остановок, которые обслуживаются общественным транспортным средством. Время поездок на отрезках между остановками и время пребывания на остановках установлены расписанием маршрутной поездки.

Другим типичным признаком перевозок в маршрутных транспортных системах являются пересадки. Пересадка означает, что пассажир меняет маршрут. Процесс пересадки может быть связан с пешеходным путем, если приезжающий и отъезжающий маршруты останавливаются на разных остановках. Пешеходные пути между остановками связаны также с затратами времени.

Маршрутная транспортная сеть имеет привязку к центрам тяжести (наполняющие узлы) районов через остановки.

2 Моделирование спроса на транспорт

2.1 Моделирование спроса на транспорт для пассажирского транспорта

2.1.1 Создание транспортного потока

Модели создания транспортного потока квантифицируют и используют важные, связанные с подвижностью характеристики и социально-демографические условия, которые в свою очередь зависят от потенциала инфраструктуры, а также выгодности расположения и воздействуют прямо или косвенно на объемы транспортных потоков. Создание транспортного потока служит для определения объемов транспортных потоков источника, цели и общего объема в матрице корреспонденций во взаимосвязи этих характеристик. Для расчетов могут использоваться, кроме этого, модель факторов роста (как ориентировочная модель) и модель регрессии.

Разработанная LOHSE [22] *модель характеристик* (Модель характеристик является составной частью разработанной LOHSE и др. (смотри также [24]) модели EVA (E – Создание, V – Распределение, A – Разделение) пассажирского транспорта.) для пассажирского транспорта основывается на дифференцированном определении причин перемещений. При расчете отображаются элементарные стохастические взаимосвязи, типизированные в характеристиках. Дезагрегированная модель использует однородные слои (группы источник-цель) для описания выполненных активностей основных групп людей. Для определения поведенческих характеристик и признаков рассматриваемых групп людей, дифференцированных по группам источник-цель, обязательно необходимы высококачественные и содержательные транспортные опросы. Практическими примерами сбора транспортных показателей в городах и регионах в Германии являются «Система репрезентативных транспортных опросов» «System repräsentativer Verkehrsbefragungen» (SrV, [1]), «Подвижность в Германии» «Mobilität in Deutschland» (MiD, [6]), «Автомобильное движение в Германии» «Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland» (KiD, [17]). Сбор основных данных ведется в таких случаях через опросы в произвольно выбранных семьях и транспортных предприятиях. При этом фактически совершенные поездки и их данные опросов увязываются с семейными и личными показателями, а также с показателями предприятий и анализируются при помощи объемных рутинных расчетов.

2.1.1.1 Группы источник-цель

Группы источник-цель (QZG – Quelle-Ziel-Gruppe) – это дезагрегированные, однородные по поведению транспортные классы, выведенные из цепочки активностей (последовательности перемещений). Так, например, из цепочки активностей Д-Р-М-Д (Дом-Работа-Магазин-Дом) создаются группы источник-цель Д-Р, Р-М и М-Д (LOHSE [22]). Каждое перемещение, направленное на определенное действие, относится к определенным категориям источников (например, Дом Д) и цель (например, Работа Р) и, таким образом, к соответствующей группе источник-цель (например, Д-Р).

Цель	Собственная квартира	Собственная работа	Детское учреждение	Учебное заведение	Службное учреждение	Торговое учреждение	Учреждение досуговой деятельности	Прочее учреждение
Источник								
Собственная квартира	-	КР (1)	КД(1)	КУ (1)	КС (1)	КТ (1)	КДо(1)	КП (1)
Собственная работа	РК (2)	-	РП (1)					
Детское учреждение	ДК (2)	ПР (2)	ПП (3)					
Учебное заведение	УК (2)							
Службное учреждение	СК (2)							
Торговое учреждение	ТК (2)							
Учреждение досуговой деятельности	ДоК (2)							
Прочее учреждение	КП (2)							

Таблица 1: Разделение QZG с 17 QZG (значение в скобках = QZG-тип)

С «создаваемой стороны» к группе источник-цель относится как минимум одна базовая группа населения и со «стороны притяжения» как минимум одна величина структуры. Например, к группе источник-цель Д-Р (Дом-Работа) со стороны источника относится основная базовая группа населения «Трудящиеся». Это соотношение активностей используется преимущественно этой группой населения и таким образом возникает движение транспорта. Со стороны цели основной величиной структуры служит количество рабочих мест. При оценке

эмпирических данных возникает уплотнение результатов, которое допускает специальное обобщение отдельных групп источник-цель (см. Таблица 1). Количество и разделение групп источник-цель сильно коррелируют с типом, выраженностью и доступностью соответствующих данных структур, а также конкретной постановкой задач по транспортному планированию. Пространственное расширение активностей в большой степени зависит от места проживания и других основных активностей. Поэтому при расчете создания транспортного потока в модели характеристик проводится дополнительное разделение:

QZG-тип 1: Источник перемещения на «месте зарождения»,

QZG-тип 2: Цель перемещения на «месте зарождения»,

QZG-тип 3: Ни источник, ни цель перемещения не находятся на «месте зарождения».

Место зарождения - это всегда «место создания» перемещений. Цели или источники, не совпадающие с местом зарождения, всегда являются притягивающими местами.

2.1.1.2 Условия контрольных сумм (*RSB – Randsummenbedingungen*)

В реальном движении транспорта существует различная зависимость транспортного потока от весомых пространственных величин структуры и выгоды расположения, а также условий баланса движения транспорта в исследуемом пространстве. В модели EVA это происходит в том числе и за счет соблюдения **условий контрольных сумм**. Процедуры решения распределения (и разделения) транспорта приближают транспортные потоки к предпочтительным или предельным значениям (пропускные способности). Однако необходимые пропускные способности для целей (притягивающие места) должны быть установлены уже во время создания транспортного потока.

Для потоков транспорта, относящихся к местам притяжения, выводится зависимость условий контрольных сумм от влияния пространственных величин структуры и выгоды расположения. В большинстве случаев применения поток транспорта зависит только от пропускной способности пространственных величин структуры. При этом используются жесткие или фиксированные условия контрольных величин. При наличии зависимости от пропускной способности пространственных величин структуры и выгоды расположения применение находят преимущественно эластичные условия контрольных сумм. Если ограничения пропускной способности больше не играют определяющей роли, то условие контрольных сумм отпадает и определяющим для потока транспорта остается потенциал пространственных величин структуры, а также выгода расположения. В пограничном случае доминирует только выгода расположения в соответственно выраженном виде.

Жесткие и эластичные условия контрольных сумм

Для потоков транспорта, относящихся к создаваемым местам, без исключения действуют *жесткие* или соответственно фиксированные условия контрольных сумм.

В случае не определенных в пространстве «обязательных активностей» (например, работа, образование) ожидаемое значение соответствующего потока транспорта рассчитывается исключительно из весомых величин структуры соответствующего притягивающего места. Здесь выгода расположения не играет никакой роли. Таким образом возникает условие контрольных сумм, при котором поток транспорта, как входная величина из создания транспортного потока, должен восприниматься и соответственно соблюдаться при распределении и разделении транспорта как «жесткий» или «фиксированный».

Пример: Рабочие завода должны добираться до своих рабочих мест. Поскольку число рабочих мест устанавливается как известное, то и соответствующий поток транспорта остается в основном неизменным за счет выбора цели и транспортного средства.

В случае *эластичных условий* контрольных сумм привлекается влияние выгоды расположения. Ожидаемое значение потока транспорта при субституируемых в пространстве действиях (например, Магазин, Прочее) больше не выводится только за счет основных структурных величин притягивающего места. Наряду с пропускной способностью потенциалов пространственных структур выгода расположения также играет решающую роль при выборе конкурирующих активностей. Создание потока рассчитывает в этом случае только максимальную пропускную способность потока транспорта, который, однако, не должен быть исчерпан.

Пример: При выборе цели участники движения оценивают «затраты на перемещение» к различным торговым центрам. До тех пор, пока близлежащий торговый центр не будет нагружен другими, «конкурирующими» посетителями, он будет с большой вероятностью выбран «местными, выгодно расположенными» участниками движения или соответственно посетителями. При перегруженности они соответствующим образом поменяют цель.

Общим условием при эластичных условиях контрольных сумм является тот факт, что в исследуемой области должна существовать достаточная общая пропускная способность, чтобы в другой ситуации иметь возможность предложить ущемленным участникам движения какую-то альтернативу.

Моделирование эластичных условий контрольных сумм может происходить в различных вариациях (смотри подробно [24], [28]).

Тем самым математическое формулирование жестких (2) и эластичных (3) условий контрольных сумм матрицы корреспонденций (v_{ijk}) может быть выражено в 3-х мерной модели (источник i , цель j , транспортное средство k), как указано ниже:

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_k v_{ijk} = Q_i & \text{ интенсивность движения в транспортном районе источника } i & (2) & \sum_j \sum_k v_{ijk} \leq Q_i^{\max} & Q_i^{\max} & \text{ пропускная способность в источнике} & (3) \\ \sum_i \sum_k v_{ijk} = Z_j & \text{ интенсивность движения в транспортном районе цели } j & & \sum_i \sum_k v_{ijk} \leq Z_j^{\max} & Z_j^{\max} & \text{ пропускная способность в цели} \\ \sum_i \sum_j v_{ijk} = A_k & \text{ интенсивность движения системы транспорта } k & & \sum_i \sum_j v_{ijk} = A_k & & \end{aligned}$$

Для распределения и разделения транспортного потока существуют различные процедуры решения (смотри раздел 2.1.2.2), которые ведут к приблизительному соблюдению (жесткие RSB) или точному соответствию (фиксированные RSB) указанных контрольных сумм.

Особый случай распределения и разделения потока *без условий контрольных сумм* встречается в транспортном планировании **крайне** редко. Поток транспорта складывается тогда при замещаемых в пространстве действиях только из типа основных, конкурирующих структурных величин и их доступности. Границ пропускной способности структурных величин для создания транспорта больше не существует. Таким способом выводится прямая пропорциональность между общим воздействием доступности транспорта и пространственных величин структуры.

Применение различных условий контрольных сумм может происходить в различной комбинации. Модели с двусторонними условиями контрольных сумм обозначаются в литературе также как состыкованные.

2.1.1.3 Модель характеристик создания потока

Для каждой базовой группы населения в каждой группе источник-цель для создаваемой стороны следует устанавливать создаваемую долю. LOHSE определяет ее как «[...]среднее число перемещений в сутки на человека». Со стороны притяжения к основным величинам структуры относятся притягивающие доли, которые характеризуются как «[...]среднее число перемещений в сутки и на единицу величины структуры». Далее для основных групп населения и величин структуры вводятся дифференцированные факторы внутреннего движения. Они определяют соответствующую долю внутреннего движения в источник и цель в исследуемой области. С создаваемой стороны u -фактор показывает реальную долю внутреннего движения. v -фактор служит со стороны притяжения для установления потенциала внутреннего движения (LOHSE [22]).

Расчет основательно представлен на примере QZG-типа 1 собственного движения, остающегося в исследуемой области:

QZG-тип 1:

Транспортный поток источника Q транспортных районов i зависит от создаваемых долей SV основных групп населения p , числа людей BP , а также от доли внутреннего движения u ; тем самым задан также общий поток транспорта V :

$$Q_i = \sum_p Q_{ip} = \sum_p SV_{ip} \cdot BP_{ip} \cdot u_{ip}; \quad V = \sum_i Q_i \quad (4)$$

Общий поток транспорта, созданный в исследуемой области, распределяется по конкурирующим целям; поток транспорта цели Z транспортных районов j зависит от притягивающих долей ER основных величин структуры SZ , а также фактора внутреннего движения v ; при этом следует различать жесткие и эластичные контрольные суммы:

Жесткие контрольные суммы:

$$Z_j = \frac{\sum_s ER_{js} \cdot SZ_{js} \cdot v_{js}}{\sum_{j'} \sum_{s'} ER_{j's'} \cdot SZ_{j's'} \cdot v_{j's'}} \cdot V \quad (5)$$

Эластичные контрольные суммы:

$$Z_j \leq Z_j^{\max} = \frac{\sum_s ER_{js}^{\max} \cdot SZ_{js} \cdot v_{js}}{\sum_{j'} \sum_{s'} ER_{j's'} \cdot SZ_{j's'} \cdot v_{j's'}} \cdot V \quad (6)$$

Расчет транспортного потока источника и цели группы источник-цель типа 3 (обычно Прочее-Прочее) для «закрытого промежутка времени» (например, для полного среднестатистического рабочего дня) требует **уравнивания контрольных сумм**, т.к. в этом случае общий поток транспорта источника и общий поток транспорта цели транспортного района будут приблизительно одинаковыми. Чаще других встречаются замкнутые рейсы или соответственно QZG-комбинации определенных активностей. Так, например, комбинация Д-Р, Р-П, П-Д встречается гораздо чаще, чем Д-П, П-Р, Р-Д. На рисунке 2 заметно, например, неравновесие в группах источник-цель Работа-Прочее, Прочее-Работа. Это приводит к асимметрии в пределах пар QZG транспортного района e и i , как результат, к неравенству.

$$\sum_g Q_e \neq \sum_g Z_e \quad g \text{ индекс групп источник-цель} \quad (7)$$

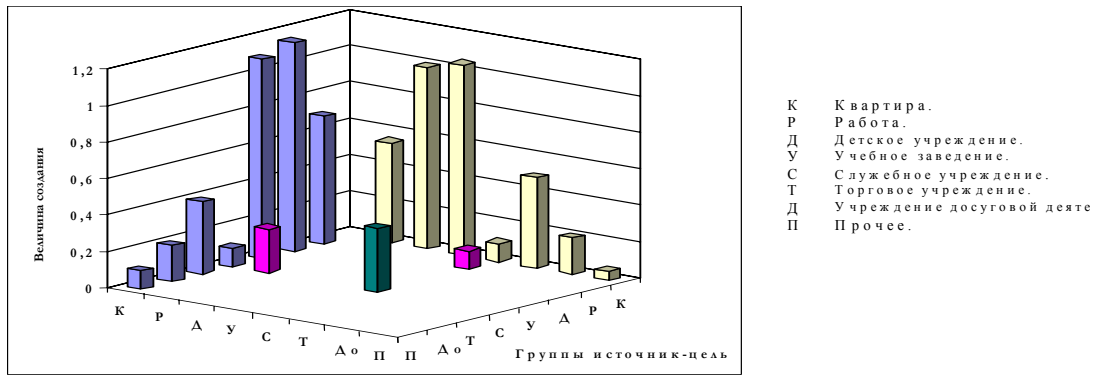


Рис. 2: Поездки, разделённые на 17 долей QZG (Источник: SrV Dresden 1998, [1])

И все же при рассмотрении транспортного движения, закрытого в пространстве и времени, лучше придерживаться уравнения

$$\sum_g Q_e = \sum_g Z_e, \quad (8)$$

т.к. это уравнение устанавливается в реальности приблизительно так же. Чтобы выполнить это условие, в группе источник-цель типа 3 требуется расчет уравнивания или соответственно уравнивание контрольных сумм.

Уравнивание контрольных сумм может происходить с применением эластичных условий контрольных сумм только после распределения и разделения потока всех групп источник-цель типа 1 и 2. Здесь следует учесть, что модель EVA не может совершенно независимо друг от друга проводить шаги Создание, Распределение и Разделение, она обнаруживает важные и необходимые обратные связи.

На основе представленных характеристик модель EVA можно обозначить как формально-аналитическую, относящуюся к базовым группам населения, ориентированную на поведенческие типы, а также сильно дезагрегированную во временном, пространственном и целесообразном контексте. Однако общая модель характеристик пассажирского транспорта охватывает гораздо большую сферу, нежели представлено здесь. (смотри LONSE и др.[24])

2.1.2 Одновременное распределение и разделение транспортного потока в базовой модели EVA

Модель EVA рассчитывает создание транспорта (выбор активностей), распределение транспорта (выбор цели) и разделение транспорта (выбор транспортного средства) для каждой группы источник-цель отдельно. С помощью аксиомы условной вероятности БЕЯ легко можно сформулировать **базовую модель EVA** (предварительно без условий контрольных сумм).

С помощью A_i , E_j и M_k обозначаются события о том, что перемещение начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j и при этом используется транспортное средство k . Предполагается, что все эти события происходят независимо друг от друга и (безусловные) вероятности $P(A_i)$, $P(E_j)$ или соответственно $P(M_k)$ известны. Далее для всех i, j, k даны условные вероятности $P(W|(A_i \cap E_j \cap M_k))$, далее обозначено кратко BW_{ijk} , для принятия (событие W) или отклонения (дополнительное событие W) этого перемещения. Из предположения о том, что транспортные потоки v_{ijk} пропорциональны к условным вероятностям $P((A_i \cap E_j \cap M_k|W))$ (реализованная поездка начинается в i , заканчивается в j и проводится с помощью транспортного средства k), следует

$$v_{ijk} = P((A_i \cap E_j \cap M_k) | W) \cdot V = \frac{P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k) \cdot P(W | (A_i \cap E_j \cap M_k))}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} P(A_{i'}) \cdot P(E_{j'}) \cdot P(M_{k'}) \cdot P(W | (A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}))} \cdot V \quad (9)$$

Вероятность может быть квантифицирована с помощью установок, которые можно проверить эмпирическим путем и, в случае необходимости, модифицировать, а также событий создания потока:

$$v_{ijk} = P((A_i \cap E_j \cap M_k) | W) \cdot V = \frac{\frac{Q_i}{V} \cdot \frac{Z_j}{V} \cdot \frac{A_k}{V} \cdot BW_{ijk}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} \frac{Q_{i'}}{V} \cdot \frac{Z_{j'}}{V} \cdot \frac{A_{k'}}{V} \cdot BW_{i'j'k'}} \cdot V \quad (10)$$

Вероятность оценки BW – это функция оценочных признаков транспортного предложения. Эта вероятность предоставляет информацию о том, какое влияние на выбор альтернативы оказывает затрата w . При этом в зависимости от соответствующей затраты происходит принятие или отклонение события перемещения (смотри рисунок 3).

Функции оценки имеют различное проявление. Во многих случаях применения используется экспоненциальная функция оценки. Использование экспоненциальной функции часто объясняют так называемым „[...] *economic tradition* [...]“, хотя она только условно соответствует человеческому поведению. Рисунок 3 отчетливо показывает так называемую функцию EVA, а на рисунке 4 – соответствующую функцию эластичности ϵ ,

$$BW(w) = \left[1 + \left(\frac{w}{F} \right)^G \right]^{-\frac{E}{G}} \quad \epsilon(w) = \frac{dBW(w)}{dw} / \frac{BW(w)}{w} = -E \cdot \frac{w^G}{F^G + w^G} \quad (11)$$

которая обеспечивает принципиально как можно более реалистичную оценку – насколько это видно из функции эластичности ϵ – и которую предпочитают использовать авторы модели EVA (смотри [22], [24]).

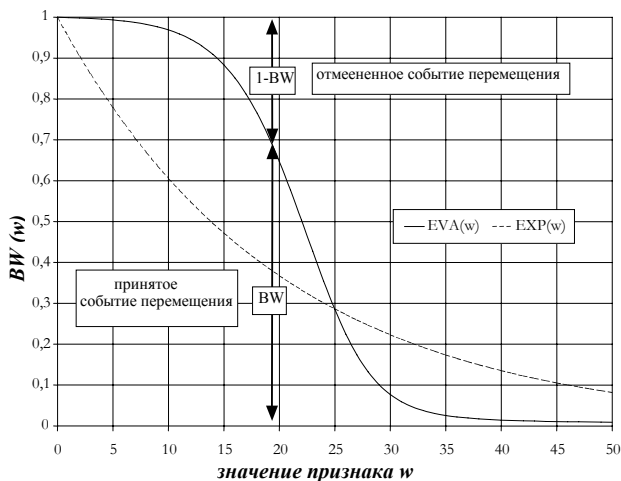


Рис. 3: Функция EVA и экспоненциальная функция в качестве функции оценки.

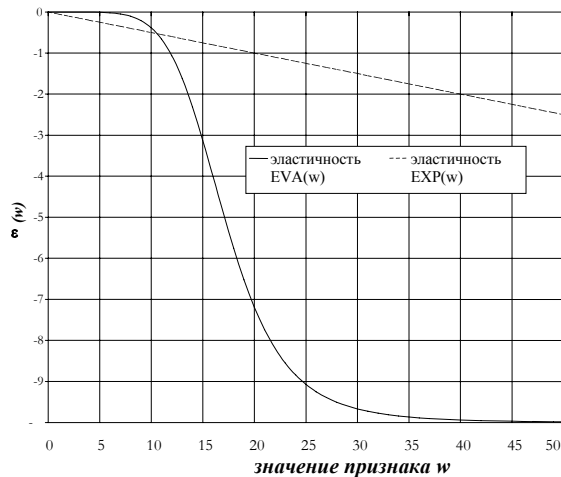


Рис. 4: Сравнение эластичности функции EVA и экспоненциальной функции

Эластичность показывает «чувствительность» участников транспортного движения к изменению затрат. Функции EVA по сравнению с другими альтернативами обладают тем преимуществом, что они при принятии решений гораздо лучше могут подстраиваться под человеческий фактор с помощью своих нелинейных функций эластичности.

Определенные характеристики равномерно спадающей вероятности оценки согласно функции EVA (Параметры E, F и G функции EVA оказывают влияние на функцию следующим образом: F – это коэффициент масштабирования. Параметр G в большой степени определяет ход функции с низкими значениями w/F. Чем больше G, тем дольше функция оценки протекает в районе 1. Параметр E – это противоположность G и он определяет выраженность BW(w) в зоне высоких затрат.) (с обобщенными затратами w_{ijk}) с задаваемыми параметрами E, F и G должны уточняться с помощью сравнения с экспоненциальной функцией оценки с параметром β

$$BW(w_{ijk}) = \exp(-\beta \cdot w_{ijk}). \quad (12)$$

На рисунке 3 при противопоставлении четко бросается в глаза отклонение в зоне низких затрат. Экспоненциальная функция в этой зоне не соответствует человеческому поведению, т.к. вероятность оценки резко снижается при малых затратах.

Еще более четко прослеживается разница экспоненциальной и функции EVA при анализе соответствующего хода эластичности. Так, эластичность, производная от функции оценки, является линейной функцией с подъемом β . На примере это значит, что пешеход уже гораздо хуже оценивает время пути в 2 минуты, чем в 1 минуту. При этом изменения в самой нижней зоне затрат, скорее всего, будут менее важными относительно оценки человека.

А подход EVA с его чувствительной функцией эластичности учитывает этот факт. В данном случае одинаковая разница во времени движения в самой нижней зоне ведет только к минимальному снижению вероятности оценки. Т.е. в этой зоне существует практически нереалистичный характер спроса. Эластичность возрастает лишь в более высоком интервале времени и появляется более чувствительная реакция на изменения. В последней части кривой время движения пешком настолько высоко, что не важно, насколько еще оно может увеличиться. Оно достигло такого уровня, когда вероятность принятия сводится к нулю, а эластичность опять становится постоянной. Такой постоянный ход эластичности характерен для степенной функции, которая в экономических науках часто называется функцией спроса. Что касается отношения к реальности, то

представленные функции вероятности оценки и ее вариантов эластичности зависят, конечно, от соответствующих параметров. Их нужно выбирать, по возможности, таким образом, чтобы они соответствовали человеческому поведению в характерной ситуации.

FECHNER [11] и SCHÖPPE [30] среди прочих указывают на эмпирические исходные данные, которые соответствуют ходу вероятности оценки EVA. Многочисленные практические расчеты по транспортному планированию на достаточно большой области планирования и – из-за полного приобщения движения пешеходов – с разделением на мелкие транспортные районы допускают одновременный расчет выбора цели и транспортного средства только при наличии функций оценки с нелинейной эластичностью.

При распределении транспорта обязательно следует учитывать уже упомянутые при создании транспортного потока условия контрольных сумм стыкованных моделей, что приводит тогда к созданию **базовой модели EVA с условиями контрольных сумм**. Потенциал решений в том виде, в котором он существует в модели EVA без условий контрольных сумм согласно уравнению (10), изменяется в модели EVA с условиями контрольных сумм.

В трilinearной модели EVA с условиями контрольных сумм безусловные вероятности неизвестны, известны лишь условные вероятности из создания транспортного потока:

$$P(A_i | W) = \frac{Q_i}{V} \quad P(E_j | W) = \frac{Z_j}{V} \quad P(M_k | W) = \frac{A_k}{V} \quad (13)$$

С помощью (сначала неизвестных) факторов q_i , z_j и a_k в качестве частного из условных и безусловных вероятностей действует

$$P(A_i) = \frac{Q_i}{V} \cdot q_i \quad P(E_j) = \frac{Z_j}{V} \cdot z_j \quad P(M_k) = \frac{A_k}{V} \cdot a_k \quad (14)$$

Из введения этих выражений в уравнение (5) и (6) и потом в результате обобщения факторов выводится краткое написание 3-х мерной и трilinearной **базовой модели EVA с условиями контрольных сумм** для жёстких (15) и (16) и эластичных (17) условий:

$$v_{ijk} = BW_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \quad (15) \quad v_{ijk} = BW_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\ \sum_i \sum_k v_{ijk} &= Z_j \\ \sum_i \sum_j v_{ijk} &= A_k \end{aligned} \right\} \text{условия контрольных сумм} \quad (16) \quad \left. \begin{aligned} \sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\ \sum_i \sum_k v_{ijk} &\leq Z_j^{\max} \\ \sum_i \sum_j v_{ijk} &= A_k \end{aligned} \right\} \text{условия контрольных сумм} \quad (17)$$

Для решения трilinearной модели следует установить факторы fq_i , fz_j и fa_k таким образом, чтобы были сохранены условия контрольных сумм; матрица корреспонденций устанавливается, тогда как линейная трансформация матрицы оценки. Участники транспортного движения постоянно стремятся подойти как можно ближе к максимуму полезности, однако не могут достичь его без ограничений в результате ограничивающих условий контрольных сумм. Поэтому участники транспортного движения пытаются максимально приблизиться к максимуму полезности и минимизировать возникающую потерю полезности за счет ограничений условий контрольных сумм. Это значит, что в результате конкурирующего принятия решений участниками транспортного движения матрица в событийном пространстве с условиями контрольных сумм будет отличаться – в зависимости от ограничительных воздействий - от матрицы в событийном пространстве без условий контрольных сумм.

Процедура оценки и принятия решения участниками движения показывает минимизацию «потери полезности» и может быть изображена с точки зрения теории модели за счет минимизации определяемой меры интервала между двумя состояниями. В виде **минимизации информационного выигрыша** теория информации предлагает метод для поддержания потери полезности на как можно более низком уровне.

Качество транспортной модели зависит от ее способности прогнозировать. Для составных частей Создание транспортного потока и Распределение транспортного потока одновременной модели EVA эта способность выражена через структуру модели. Для осуществления прогноза разделения транспорта требуются еще дополнительная разработка и модификация.

Доля транспорта одного транспортного потока задана в транспортном потоке в модели EVA в следующем виде:

$$y_{ijk} = \frac{v_{ijk}}{\sum_{k'} v_{i'j'k'}} = \frac{fa_k \cdot BW_{ijk}}{\sum_{k'} fa_{k'} \cdot BW_{i'j'k'}} \quad (18)$$

Фактор баланса fa_k , который был определен или соответственно калиброван в результате расчетов анализа, содержит приоритет различных видов транспорта между собой. Это проявляется еще более наглядно, если нормировать этот фактор.

С некоторым правом можно утверждать, что факторы S_k видов транспорта k остаются постоянными в прогнозируемый промежуток времени. Тогда возникает следующая билинейная формула модели с факторами

f_{q_i} и f_{z_j} , которые пока еще не известны и должны быть определены с помощью подходящей процедуры решений:

$$v_{ijk} = (BW_{ijk} \cdot C_k) \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\ \sum_i \sum_k v_{ijk} &= Z_j \end{aligned} \right\} \text{условия контрольных сумм}$$

В результате можно получить потоки транспортного движения прогнозируемого состояния с учетом изменений в структуре пространства и структуре транспортного предложения, и, исходя из этого, устанавливаемое в этих условиях распределение транспортного потока.

2.2 Моделирование спроса на транспорт служебного транспорта

Статья посвящена преимущественно моделированию служебного транспорта для города или региона как составной части общего транспортного движения с точки зрения транспортного планирования. До сих пор модели спроса на транспорт для служебного транспорта развивались с помощью весьма различных методов (смотри, напр. [12]). К макроскопическим моделям относится, например, модель WIVER, автор SONNTAG (смотри в [2], [32]), а к микроскопическим – предложенная MACHLEDT-MICHAEL [25] модель цепочек поездок. В данном случае представлена модель EVA-W [14], [24], которая основана также на разработанной LOHSE одновременной модели EVA для пассажирского транспорта. Некоторые аспекты подхода модели могут быть использованы также по отношению к служебному транспорту, однако наличие особенностей служебного транспорта требует также специфических преобразований.

2.2.1 Создание транспортного потока

2.2.1.1 Классы служебного транспорта

К основам модели относится разделение общего служебного транспорта на ряд подклассов, которые определены на основе соответствующей сферы и типа транспортного средства. Эти классы служебного транспорта рассматриваются как гомогенные группы замкнутых рейсов с определенным потенциалом отправления, оформление замкнутых рейсов которых подвергается влиянию со стороны потенциала получения транспортных районов цели, а специфическая оценка затрат - со стороны инфраструктуры транспорта. Создание и распределение транспортного потока следует предварительно проводить отдельно для каждой гомогенной группы, прежде чем полученные в результате этого процесса матрицы корреспонденции будут обобщены – как это и необходимо для перераспределения - в матрицы спроса отдельных типов транспортных средств.

В модели действует следующее упрощенное представление: Исходя из отправителя отдельной сферы в течение дня с помощью соответствующих транспортных средств совершаются замкнутые рейсы, у которых в качестве цели задан один или несколько получателей и которые снова заканчиваются со стороны отправителя. При этом в пределах одного замкнутого рейса различают начальную поездку (первая поездка A), конечную поездку (последняя поездка E) и соединяющие поездки (все остальные V).



Рис. 5: Поездки и отношения отправитель-получатель в замкнутых рейсах

Расчет транспортных потоков проходит для каждого класса служебного транспорта в три этапа:

- Создание транспортного движения (Сколько поездок исходит от отправителей заданного транспортного района и сколько поездок ведет к получателям в конкурирующих районах?)
- Оценка затрат для поездок между двумя транспортными районами
- Распределение транспортного движения всех поездок между отправителями и получателями (расчет матриц поездок).

2.2.1.2 Модель характеристик

Предметом создания транспортного движения является определение потока транспорта отправления и получения отдельных транспортных районов. При этом поток транспорта отправления конкретного транспортного района обозначает среднее число (частичных) поездок, исходящих от отправителей этого района

к получателям в исследуемой области. Поток транспорта получения конкретного транспортного района определен как среднее число всех поездок, которые имеют своей целью получателей этого района.

Определение этих потоков происходит с помощью т. наз. модели характеристик, которая базируется на дифференцированном изучении причин возникновения поездок.

Потоки транспорта отправления рассчитываются с помощью основных исходных величин отправителей, как, например, число занятых, а также других характеристик:

$$VV_i = \sum_p (RK_{pi} - 1) \cdot RA_{pi} \cdot BG_{pi} \cdot u_{pi} \quad (20)$$

VV_i ... поток транспорта отправления транспортного района i
 BG_{pi} ... исходная величина p в транспортном районе i
 RA_{pi} ... среднее число замкнутых рейсов на исходную величину
 RK_{pi} ... среднее число поездок в одном замкнутом рейсе
 u_{pi} ... доля потока транспорта отправления, остающаяся в исследуемой области.

В то время, как исходные величины BG представляют структурные данные исследуемой области, RA и RK являются параметрами поведения, которые могут быть получены путем подходящего эмпирического сбора данных (как KiD 2002 [17]).

Деление поездок в пределах одного замкнутого рейсов на начальные, соединяющие и конечные поездки ведет к тому, что поток транспорта отправления конкретной транспортной области k может быть разбит на три блока:

Поток транспорта источника Q_k^A начальных поездок (A)

$$Q_k^A = \sum_p RA_{pk} \cdot BG_{pk} \cdot u_{pk} \quad (21)$$

Поток транспорта на месте зарождения H_k^V соединяющих поездок (H)

$$H_k^V = \sum_p (RK_{pk} - 2) \cdot RA_{pk} \cdot BG_{pk} \cdot u_{pk} \quad (22)$$

Поток транспорта цели Z_k^E конечных поездок (E)

$$Z_k^E = \sum_p RA_{pk} \cdot BG_{pk} \cdot u_{pk} \quad (23)$$

Четко прослеживается то, что из прежних предположений моделирования исходит идентичность потока транспорта цели Q_k^A с потоком транспорта цели Z_k^E .

На этом создание транспортного потока с создаваемой стороны считается описанным. Притяжение транспорта за счет получателей отдельных транспортных районов определяется с помощью основных величин структуры этого района и соответствующих потенциалов создания. Потенциал получения конкретного транспортного района задан в виде

$$PE_j = \sum_s SG_{sj} \cdot ER_{sj} \cdot v_{sj} \quad (24)$$

PE_j ... потенциал получения транспортного района j
 SG_{sj} ... величина структуры s в транспортном районе j
 ER_{sj} ... соответствующий потенциал создания
 v_{sj} ... соответствующая доля внутреннего транспортного движения в исследуемой области.

Потоки транспорта получения образуются за счет разделения общего потока транспорта отправления на конкурирующие транспортные районы j пропорционально к потенциалам получения:

$$VE_j = \frac{PE_j}{\sum_j PE_j} \cdot \sum_i VV_i \quad (25)$$

2.2.2 Распределение транспортного потока

2.2.2.1 Оценка корреспонденций

Распределение поездок в исследуемом пространстве зависит также от затрат (расстояние, время, денежные затраты, обобщенные затраты), вкладываемых в достижение цели. Поэтому этот этап расчета состоит в том, чтобы с помощью подходящих функций оценить затраты, необходимые для поездки из района источника i в район цели j (смотри, например, уравнение (11) и Рис. 3). Рисунок показывает типичную функцию оценки со значениями от 0 до 1, которые могут быть интерпретированы как вероятность BW для принятия преодолеваемых затрат или соответственно проведения поездок из i в j . Характерным является достаточно незначительное уменьшение функции для низких значений затрат, а также последующий участок с большей чувствительностью к затратам.

2.2.2.2 Распределение поездок

На этом этапе расчета рассмотренные ранее отдельные модули для расчета служебного транспорта – установление потоков транспорта отправления и получения, а также оценка затрат поездок служебного

транспорта – объединяются в единый комплексный подход. Транспортные потоки (число поездок) между транспортными районами определяются здесь таким образом, чтобы в сумме были соблюдены – с достаточной точностью – рассчитанные потоки транспорта и одновременно должным образом учтена оценка затрат на поездки.

«Должный учет» оценок BW_{ij}^A , BW_{ij}^E и BW_{ije}^V отношений движения для начальных, конечных и соединяющих поездок направлен с точки зрения теории модели на то, чтобы с точки зрения информационного выигрыша до минимального уровня снизить «разницу» между потоками транспорта и этими оценками при общем решении системы. Т.е. проблему оптимизации. Решение этой проблемы выглядит как:

$$v_{ij} = \left[BW_{ij}^A \cdot fq_i^A + \sum_{e=1}^m (BW_{ije}^V \cdot fr_e^V) + BW_{ij}^E \cdot fz_j^E \right] \cdot fq_i \cdot fz_j \quad (26)$$

с факторами баланса fq_i^A , fr_e^V , fz_j^E , fq_i и fz_j , которые могут быть приблизительно определены с помощью процедуры итерации. Так же, как и в известной процедуре Furness, здесь на каждом этапе один из этих факторов подстраивается таким образом, чтобы четко было соблюдено соответственно одно из указанных выше условий граничных сумм.

2.3 Перераспределение транспортного потока

Выбор пути является значительной составной частью перераспределения транспортных потоков на транспортную сеть. Модели выбора пути делят существующий поток транспорта v_{ijk} транспортного средства k на найденные в транспортной сети пути r ; возникают потоки пути v_{ijkr} . Интенсивность движения отрезка сети a вида транспорта k выводится как сумма тех потоков пути v_{ijkr} , которые проходят через этот отрезок:

$$M_{ak} = \sum_{i'j'r'} v_{i'j'kr'} \cdot \delta_{i'j'kr'}^a \quad (27)$$

причем δ является значением инцидентной матрицы отрезок-путь ($\delta = 1$: отрезок a - это часть пути r , $\delta = 0$: отрезок a - не часть пути r).

В рамках перераспределения на базе итеративно функционирующих методов приближения следует стремиться к достижению равновесия между предложением (характеризующимся прежде всего за счет затрат в модели сети) и спросом (это устанавливаемые потоки пути). Если требуется рассчитать затраты в зависимости от интенсивности движения, т.е. с помощью функции ограничения пропускной способности, то возникает ситуация, в которой результат выбора пути изменяет первоначальные величины – затраты. Затраты возрастают, если интенсивность движения приближается к пропускной способности отрезка или соответственно даже превосходит ее.

При определении детерминистского равновесия пользователя на практике часто работают с процедурой поиска наилучшего пути (алгоритмы для решения проблемы: Method of Successive Average (MSA), FRANK-WOLFE-алгоритм; они обосновываются, например, в SHEFFI [31], PATRIKSSON [27], DIOS ORTÚZAR и др. [8]). Алгоритмы наилучшего пути просты в использовании, а также занимают мало времени и места, поэтому они легко могут быть включены в продукты программного обеспечения. Автор данной статьи однако не советует применять определение детерминистского равновесия пользователя, т. к. оно не в полной мере отражает реальность.

Алгоритмы поиска нескольких путей менее распространены, чем процедуры поиска наилучшего пути, однако они настоятельно рекомендуются для использования, т. к. в результате приводят к более реалистичному стохастическому равновесию пользователя (смотри, например, SHEFFI [31]).

Итеративное перераспределение должно проводиться до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие пользователя, которое проверяется с помощью математической процедуры с применением подходящих критериев отмены.

При стохастическом моделировании решения о выборе пути лишь частично зависимым от случая величинам затрат, которые характеризуют альтернативы, приписываются определенные распределения. Условием применения дискретных стохастических моделей решений (MAIER и др. [26]) является знание имеющихся в распоряжении путей r , включая их основные особенности w_r .

Правило расчета потоков путей v_{ijr} , специально подходящее для разделения путей, существует в следующей форме (LOHSE [22]):

$$P_r = \frac{\exp(\beta \cdot (X_r)^2)}{\sum_{r'} \exp(\beta \cdot (X_{r'})^2)} \quad c \quad X_r = \frac{w_r}{\min_{r'}(w_{r'})} - 1 \quad \text{и} \quad v_{ijr} = P_r \cdot v_{ij} \quad (28)$$

В математический алгоритм определения равновесия помимо непосредственных взаимосвязей влияния (функции ограничения пропускной способности и стохастические правила разделения транспортного потока) следует включать также модуль, который, исходя из начального решения, обеспечивает пошаговое приближение к равновесному решению. По данному вопросу себя хорошо зарекомендовал так называемый процесс MSA (*Method of Successive Averages*), который обозначается LOHSE [22] как обратный расчет. Поток пути v_{ijr} пути ijr оценивается в каждом шаге итерации $p = 1 \dots n$ для следующего шага $(n+1)$:

$$v_{ijr}(n+1) = v_{ijr}(n) + \frac{1}{n} \cdot (v_{ijr}^{akt}(n) - v_{ijr}(n)) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{p=1}^n v_{ijr}^{akt}(p) \quad (29)$$

Потоки пути $v_{ijr}^{akt}(n)$ возникают в каждом шаге итерации на основе правила разделения с использованием актуальных затрат A_{ijr} . С помощью «величины шага» $1/n$ оцененные потоки пути постепенно приспособляются к актуальным потокам пути. Процедура достигает равновесия тогда, когда оцененные и актуальные потоки пути не отличаются друг от друга.

Следует обратить внимание еще на один момент. Если пути имеют общие частичные пути, тогда представленные выше правила разделения действуют с ограничениями, т. к. они исходят из полной независимости альтернатив. В литературе этот феномен рассматривается в контексте т. наз. характеристики ПА (англ.: Independence from Irrelevant Alternatives; рус.: Независимость от нерелевантных альтернатив). Взаимозависимость путей за счет общих частичных путей ведет к более низкой вероятности выбора этих путей по отношению к другим альтернативам. Зависимость путей учитывается с помощью специальных дополнительных факторов в правилах разделения. О конкретных проявлениях факторов существуют различные публикации (смотри, например, CASCETTA [7]). В работе DUGGE [10] проводится разграничение между пространственной и временной зависимостью и предлагаются подходы к определению дополнительных факторов.

Принципиальное прохождение стохастического перераспределения транспорта наглядно представлено на Рисунок 6.

Модели выбора пути, применяемые для индивидуального и маршрутного общественного транспорта, являются в целом идентичными.

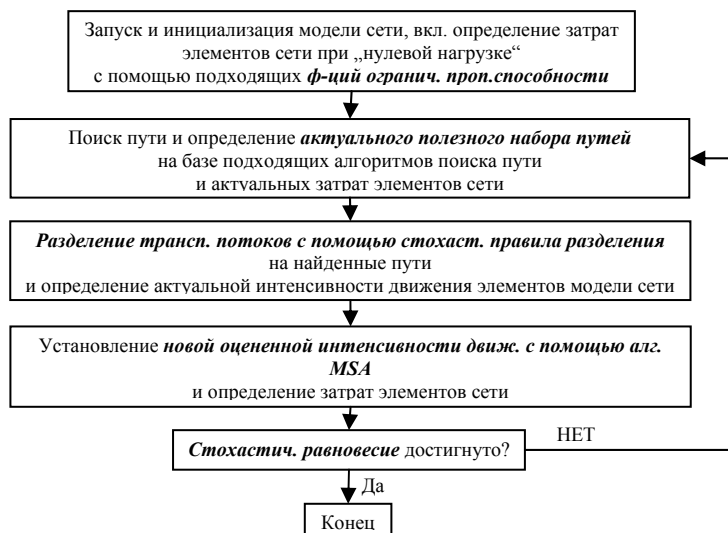


Рисунок 6: Прохождение стохастического перераспределения транспорта

3 Моделирование транспортного предложения и транспортного спроса в равновесии

Выбор пути и соответствующие процедуры перераспределения являются при комплексном моделировании спроса на транспорт неотъемлемой частью процедуры; особенно тогда, когда должно быть достигнуто равновесие между предложением и спросом. Потоки транспорта, определенные за счет модели спроса, должны быть перераспределены тогда с помощью «стохастического» правила разделения транспортного потока на целесообразные альтернативные пути. В таких процедурах недооценивается тот факт, что приблизительные расчеты затрат элементов транспортной сети и их оценка отдельными участниками движения рассеется с математическим ожиданием распределения. В результате в расчетах и дальнейшем выборе активностей, цели, транспортного средства и пути всегда присутствует погрешность.

Стохастическое равновесие пользователя, возникающее в результате обратных связей 1 - 3 (смотри Рис. 7), при котором участники движения не обладают полной информацией о предложении транспорта и транспортной ситуации, достаточно точно отражает реальность.

Процесс оценки участниками движения отображается путем повторяющегося расчета предложения (предоставление всех особенностей предложения транспортных систем с учетом их загрузки) и спроса (моделирование выбора активностей, цели, транспортного средства и пути с учетом соответствующих особенностей предложения). Таким образом, на каждом этапе обратной связи образуются изменения в затратах и, тем самым, в спросе. Этот процесс обратной связи между спросом транспорта и предложением проводится вплоть до момента достижения равновесия.

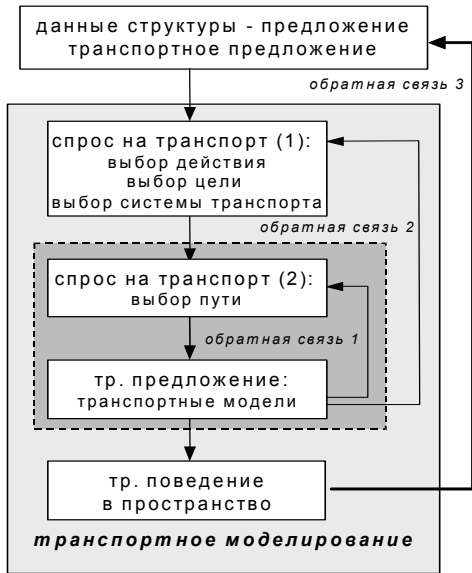


Рис. 7: Моделирование транспортного движения как процесс обратной связи

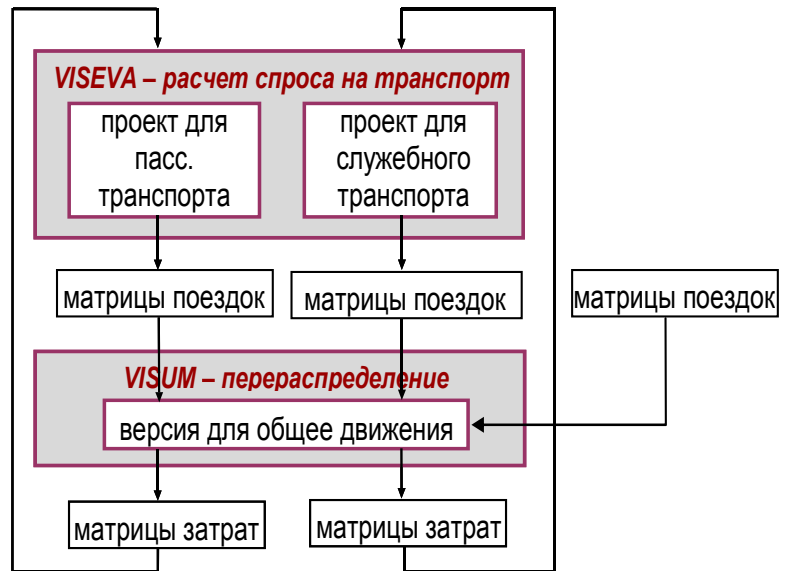


Рис. 8: Прохождение расчета спроса и перераспределения

Схема, ориентированная на практическое применение, согласно Рис. 9, наглядно показывает прохождение расчетов с помощью программ VISEVA (Программное обеспечение разработанное LOHSE, распространяется через PTV AG Karlsruhe) для расчета спроса и VISUM (Программное обеспечение выбора пути и перераспределения транспорта, PTV AG Karlsruhe) - для перераспределения. Матрицы поездок могут быть заимствованы из одного или нескольких проектов (например, по одному из пассажирского и служебного транспорта).

4 Заключение

Представленные в этой разработке основы и детали служат лишь обозначению гораздо более комплексных и обширных проявлений моделирования транспортного предложения и транспортного спроса.

Так, например, в модели может пригодиться знание места зарождения e и места работы l работающих участников транспортного движения и включение этих данных в решения выбора. Таким образом, становится возможным учет двух-полярной «зоны влияния» перемещений работающего населения при расчете транспортных потоков v_{ijkl} . Для решения описанной проблемы необходимая n -линейная процедура предоставляется путем обобщения MULTI-процедуры и процедуры FURNESS [24].

Интеграция неподвижного транспорта в моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт требует также соответствующего включения ограничений на парковку, которые ограничивают способность транспортных районов принимать транспорт со стороны источника и со стороны цели на каждый отдельный вид транспорта (SCHILLER [28]).

В [24] содержится описание модели цепочки поездок, которая использует те же теоретические основы, но должна учитывать, конечно, более комплексные зависимости, дополнительные условия и ограничения.

Моделирование спроса на транспорт, осуществляемое до сих пор в программном обеспечении VISEVA, ограничивается одновременным рассмотрением первых трех этапов - создание транспортного потока, распределение потока и разделение потока. Расширение его до одновременного рассмотрения всех четырех этапов (включая выбор пути и перераспределение) при параллельном сохранении процедур обратной связи для стохастического моделирования равновесия пользователя находится в данный момент в разработке [10].

5 **Список литературы:**

1	Ahrens, G.-A.; Badrow, A.; Ließke, F.: Mobilitätshebungen zum Stadtverkehr. Internationales Verkehrswesen, Deutscher Verkehrs-Verlag, Heft 6/2002
2	Bieling, N.; Haupt, Th.; Meimbresse, B.: WIVER – Ein Berechnungsmodell für den städtischen und regionalen Wirtschaftsverkehr. Straßenverkehrstechnik, Heft 11/1996
3	Bobinger, R.: Modellierung der Verkehrsnachfrage bei preispolitischen Maßnahmen, München, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der TU München, 2001
4	Bregman, L.M.: Ein Beweis der Konvergenz des Verfahrens von G.W. Sheleikhovski für ein Transportproblem mit Beschränkungen (in Russisch). Shurnal vycisl. mat. i mat. fiz. 7(1967)1
5	Bregman, L.M.: Eine Relaxationsmethode zur Bestimmung des gemeinsamen Punktes konvexer Mengen und ihre Anwendung zur Lösung konvexer Optimierungsaufgaben (in Russisch). Shurnal vycisl. mat. i mat. fiz. 7(1967)3; engl. Übers.: The relaxation method of finding the common point of convex sets and its application to the solution of problems in convex programming. U.S.S.R. Computational Math. Math. Phys. 7(1967)
6	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Mobilität in Deutschland, 2002
7	Cascetta, E.; Nuzzola, A.; Russo, F.; Vitetta, A.: A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: Specification and some calibration results for interurban networks, in J.B.Lesort (Hrsg.) Proceedings of the International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Lyon 1996
8	Dios Ortúzar, J.; Willumsen, L. G.: Transport Modelling. Chichester: John Wiley & Sons, LTD, 2004
9	Domschke, W.: Logistik: Transport, München, Oldenbourg Verlag, 1995
10	Dugge, B.: Simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell. Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ TU Dresden, 2006
11	Fechner, G. T.: Elemente der Psychophysik, Leipzig, Breitkopf & Härtel, 1907
12	Förschner, G.: Verkehrsplanerische Berechnungsmethode des Straßengüterverkehrs. Wissenschaft und Technik im Straßenwesen, Heft 20, Berlin 1982
13	Friedrich, M.; Haupt, T.; Nökel, K.: Freight Modelling: Data Issues, Survey Methods, Demand and Network Models. 10 th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne, 2003
14	Glücker, C. et al.: MOSCA – Decision Support System For Integrated Door-To-Door Delivery: Planning and Control in Logistic Chains - Deliverable 7 – Test Sites Report, 2003
15	Handwörterbuch der Raumordnung. 4., neu bearbeitete Auflage. Herausgegeben von der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (2005)
16	Köhler, U.; Wermuth, M.: Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrswesen Heft 804, Bonn, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2001
17	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland – KiD, Verkehrsbefragung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2002
18	Lamond, B.; Stewart, N. F.: Bregman's balancing method. In: Transport Research Record 158, Washington D.C, National Research Council, 1981
19	Landmann, J.: Aufbereitung und Untersuchungen der Erhebungsdaten „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ zur Nutzung für verkehrsplanerische Berechnungen. Studienarbeit, TU Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, 2005
20	Lätzsch, L.; Лозе, D. (1980): Straßennetzberechnung mit Kapazitätsbeschränkungen, In: TRANSPRESS Berlin, Die Straße, Heft 5/80
21	Lohse, D., Teichert, H.: Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen - Verkehrsnachfragemodellierung -, noch unveröffentlichte 2. Auflage, Stand: 2003, Dresden, Lehrstuhl für Theorie der Verkehrsplanung der TU Dresden
22	Lohse, D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2: Verkehrsplanung, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997
23	Lohse, D.; Glücker, C.; Teichert, H.: A demand model for urban commercial transport, 2 nd Symposium on Networks for Mobility, Stuttgart, 2004
24	Lohse, D.; Teichert, H.; Dugge, B.; Bachner, G.: Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung –, Schriftenreihe Heft 5, Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, (1997)
25	Machledt-Michael, S.: Fahrtenkettenmodell für den städtischen und regionalen Wirtschaftsverkehr, Dissertation, Braunschweig 2000
26	Maier, G.; Weiss, P.: Modelle diskreter Entscheidungen, Berlin u. a., Springer Verlag, 1990
27	Patriksson, M.: The Traffic Assignment Problem: Models and Methods. Utrecht: VSP, 1994 (Topics in Transportation)
28	Schiller, C.: Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung, Schriftenreihe Heft 8, Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, 2004
29	Schnabel, W.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1: Straßenverkehrstechnik, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997
30	Schöppe, E.: Die Widerstandsabhängigkeit in Verkehrsverteilungsmodellen und ihre Fahrtgruppenspezifika, In: TRANSPRESS Berlin, Die Straße, Heft 12, 1974
31	Sheffi, Y.: Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1972
32	Sonntag, H.; Meimbresse, B.; Lautendieck, U.: Entwicklung eines Wirtschaftsverkehrsmodells, Forschungsbericht, Berlin 1995
33	Steierwald, G.; Künne, H.-D.: Straßenverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele, Berlin u. a. O., Springer Verlag, 1994
34	Theeg, G.: Verkehrsnachfrageberechnung mit dem Modell EVA unter Beachtung von Generalisierten Kosten, Diplomarbeit, Dresden, Lehrstuhl für Theorie der Verkehrsplanung der TU Dresden, (2003)