

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

А. Э. ГОРЕВ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2010

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор В. С. Лукинский (СПбГИЭУ);
канд. техн. наук, доцент О. В. Попова (СПбГАСУ)

Горев, А. Э.

Основы теории транспортных систем: учеб. пособие / А. Э. Горев;
СПбГАСУ. – СПб., 2010. – 214 с.

ISBN 978-5-9227-0266-9

Предназначено для студентов направления подготовки 190700 – организация перевозок и управление на транспорте для формирования системных знаний по теоретическим основам построения и функционирования транспортных систем.

Приводятся основные сведения из теории систем, дана характеристика основных типов транспортных систем, особенностей их структуры и функционирования. Большое внимание уделяется получившим распространение на практике методам познания и исследования транспортных систем. Практические примеры приводятся для автотранспортных систем.

Пособие может быть использовано для повышения квалификации управленческого персонала автотранспортных организаций.

Табл. 22. Ил. 73. Библиогр.: 72 назв.

Рекомендовано Редакционно-издательским советом СПбГАСУ в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-9227-0266-9

© А. Э. Горев, 2010
© Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы теории транспортных систем» предназначена дать систематические знания об объекте управления для специалистов по автомобильному транспорту.

Особенностью данного учебного пособия является его назначение для использования студентами – будущими специалистами по управлению перевозками. Основные практические аспекты транспортных систем они изучают в курсах грузовых и пассажирских перевозок, грузоведения, транспортно-экспедиционного обслуживания, общего курса транспорта и т. п. В связи с этим в учебном пособии затрагиваются в основном вопросы, которые, являясь междисциплинарными, помогут студенту получить целостное представление о работе транспорта как системы.

Учебное пособие состоит из четырех глав.

В первой главе «Основы теории систем» приводятся общие сведения из теории систем, которые создают основу для изучения дисциплины.

Вторая глава «Транспортные системы» дает представление об особенностях транспортных систем и более подробно раскрывает такие основополагающие понятия транспортных систем, как транспортные сети и транспортные процессы.

В третьей главе «Исследование транспортных систем» излагаются основные подходы, используемые при проектировании и эксплуатации транспортных систем, описаны основы моделирования систем с практическими примерами прикладного назначения.

Четвертая глава «Развитие транспортных систем» раскрывает основные направления совершенствования транспортных систем для обеспечения потребностей экономики и мобильности населения.

В пособии приведена обширная библиография трудов ведущих российских и зарубежных специалистов в области транспортных систем для того, чтобы читатель мог самостоятельно углубить представления по тем или иным аспектам проектирования, анализа и эксплуатации транспортных систем.

Глава 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ

1.1. Введение в теорию систем

Теория систем – специально-научная и логико-методологическая концепция исследования объектов¹, представляющих собой системы.

Целью исследований в рамках этой теории является изучение:

- различных видов и типов систем;
- основных принципов и закономерностей поведения систем;
- функционирования и развития систем.

Общая теория систем была предложена Людвигом фон Берталанфи в 30-е годы XX века. Важный вклад в становление системных представлений внес в начале XX века А. А. Богданов, предложивший всеобщую организационную науку – тектологию².

Основной идеей общей теории систем, предложенной Берталанфи, является признание *изоморфизма*³ законов, управляющих функционированием системных объектов.

Фон Берталанфи также ввел понятие «открытые системы» – системы, постоянно обменивающиеся веществом и энергией с внешней средой.

В дальнейшем был предложен ряд новых подходов к построению общей теории систем такими учеными, как Норберт Винер, В. Н. Волкова, В. М. Глушков, Генрих Гуд, Л. В. Канторович, Михайло Месарович, Ф. И. Перегудов, И. И. Пригожин, В. Н. Садовский, А. И. Уемов, Ю. А. Урманцев, Артур Холл, Ю. И. Черняк и др. Общей чертой этих подходов была разработка логико-концептуального, кибернетического и математического аппарата системных исследований.

¹ Объект – элемент системы, не подлежащий дальнейшей декомпозиции в рамках решаемой задачи, на который направлена деятельность субъекта. Субъект – носитель предметно-практической деятельности и познания, деятельность которого направлена на объект.

² А. А. Богданов понимал тектологию (учение о строительстве) как науку, объединяющую в себе организационные методы всех наук. Критикуя ограниченность мышления, воспитанного на специализации, Богданов осуществил попытку заложить универсальные, обобщенные основы науки, объединяющей организационный опыт человечества.

³ Изоморфизм от греч. *íos* – равный, одинаковый, подобный. Общее определение изоморфизма – наличие сходства у разных объектов.

Общая теория систем оформилась в конце 70-х годов прошлого века в *системологию* – науку о системах. Основоположником этой науки считают Г. П. Мельникова. Сущность системологии заключается в том, что она представляет собой интегральную науку о системах. Общая теория систем интегрирует наиболее обобщенное знание о системах. Она находится под воздействием двух наук: философии, которая дает ей обоснование категориального аппарата, методы и приемы познания, качественное видение систем, и математики, обеспечивающей количественный анализ систем.

Структура системологии представлена схемой на рис. 1.1.

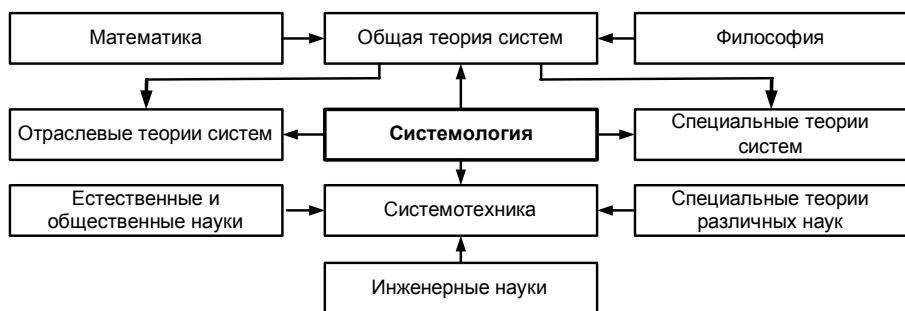


Рис. 1.1. Структура системологии

Следующие научные дисциплины формируют основные направления теории систем:

- **кибернетика**, базирующаяся на принципе обратной связи;
- **теория информации**, вводящая понятие информации как некоторого измеряемого количества и развивающая принципы передачи информации;
- **теория игр**, анализирующая в рамках особого математического аппарата рациональную конкуренцию двух или более противодействующих сил с целью достижения максимального выигрыша и минимального проигрыша;
- **теория принятия решений**, анализирующая рациональные выборы внутри человеческих организаций;
- **топология**, включающая неметрические области, такие как теория сетей и теория графов;
- **факторный анализ**, т. е. процедуры выделения факторов в многопараметрических явлениях в психологии и других научных областях.

В прикладной науке о системах выделяются следующие области:

- **системотехника** (Systems Engineering) – научное планирование, проектирование, оценка и конструирование систем «человек – машина»;
- **исследование операций** (Operations research) – научное управление существующими системами людей, машин, материалов, финанс и т. д.;
- **инженерная психология** (Human Engineering) – научное управление поведением людей с точки зрения обеспечения требуемой функциональности и цели системы.

Отраслевые теории систем раскрывают специфику систем различной природы. Речь идет о теории физических, химических, биологических, экономических, социальных систем, которые курируются соответствующими отраслями наук. Специальные теории систем направлены на отражение их отдельных сторон, аспектов, срезов, этапов. Они находятся под влиянием соответствующих теорий, например теории диссипативных систем, теории переходных систем, теории эволюции систем и т. п. Наконец, системология (прикладная инженерная дисциплина) находится под воздействием техники, моделирования, проектирования и конструирования, т. е. технической, биологической, информационной и социальной инженерии.

1.2. Понятие и свойства систем

Система – совокупность элементов, находящихся в связях друг с другом и со средой, образующих определенную целостность, единство. В зависимости от уровня рассмотрения систему можно представить как совокупность отдельных подсистем, а сама система всегда будет являться подсистемой другой, более крупной, системы.

Основой для определения системы выступают **базисные категории⁴ системы**, которые включают такие понятия, как целое, множество, организация.

Целое – форма существования системы в строго определенном качестве, выражающем ее независимость от других систем. Целое –

⁴ Категория (от греч. *kategoría* – высказывание, обвинение, признак) – предельно общее фундаментальное понятие, отражающее наиболее существенные, закономерные связи и отношения реальной действительности и познания.

это всегда завершенное, состоящее из органично взаимосвязанных между собой частей;

множество – набор, совокупность, собрание каких-либо объектов, обладающих общим для них всех характерным свойством;

организация – свойство материальных и абстрактных объектов обнаруживать взаимозависимое поведение частей в рамках целого.

Строение системы определяют такие категории, как элемент, связь, отношение, структура.

Элемент – простейшая, неделимая часть системы; элемент – это предел членения системы с точки зрения аспекта ее рассмотрения, решения конкретной задачи, поставленной цели. Для помощи в выделении элементов при анализе конкретных проблемных ситуаций можно использовать информационный подход, в частности меру информации восприятия $J = A/\Delta A$, где ΔA – минимальное количество материального свойства A (квант), с точностью до которого исследователя интересует информация об этом свойстве при формировании модели.

Систему можно расчленять на элементы различными способами в зависимости от формулировки задачи, цели и ее уточнения в процессе проведения системного исследования. При необходимости можно изменять принцип расчленения, выделять другие элементы и получать с помощью нового расчленения более адекватное представление об анализируемом объекте или проблемной ситуации.

Связь – понятие, которое входит в любое определение системы и обеспечивает возникновение и сохранение ее целостных свойств. Это понятие одновременно характеризует и строение (статику), и функционирование (динамику) системы. Связь определяют как ограничение степени свободы элементов. Действительно, элементы, вступая во взаимодействие (связь) между собой, утрачивают часть своих свойств, которыми они потенциально обладали в свободном состоянии.

Связи можно охарактеризовать направлением, силой, характером (или видом). По первому признаку связи делят на направленные и ненаправленные, по второму – на сильные и слабые (иногда пытаются ввести «шкалу» силы связей для конкретной задачи). По характеру (виду) различают связи подчинения, связи порождения (генетические), равноправные (безразличные), связи управления (**прямая связь** – непосредственное воздействие объектов одного на другой, **обратная связь** – воздействие результатов функционирования системы на характер этого функционирования).

Связи в конкретных системах могут быть одновременно охарактеризованы несколькими из названных признаков.

Обратная связь – одно из фундаментальных понятий теории систем. Обратную связь обычно иллюстрируют схемами, подобными приведенной на рис. 1.2, где $x(t)$ – закон или алгоритм (программа) управления; $x_{\text{треб}}$ – требуемое значение регулируемого параметра; x_i – фактическое значение регулируемого параметра; Δx – рассогласование между $x_{\text{треб}}$ и x_i .

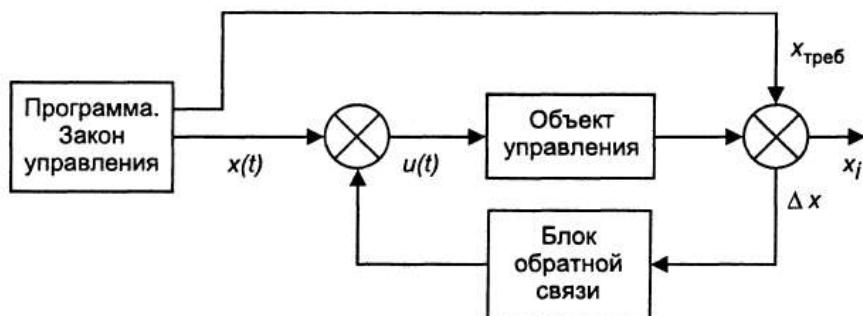


Рис. 1.2. Обратная связь в системе

Это понятие хорошо объясняется на примерах технических и электронных устройств, но не всегда легко интерпретируется в системах организационного управления. При использовании этого понятия часто ограничиваются только фиксацией рассогласования Δx между требуемым $x_{\text{треб}}$ и фактическим x_i значением регулируемого параметра, а необходимо учитывать и реализовывать все элементы, не забывая замкнуть контур обратной связи, выработав в блоке обратной связи соответствующие управляющие воздействия, которые скорректируют закон управления.

Обратная связь может быть:

- *отрицательной* – противодействующей тенденциям изменения выходного параметра, т. е. направленной на сохранение, стабилизацию требуемого значения параметра (например, стабилизацию количества выпускаемой продукции и т. п.);
- *положительной* – сохраняющей тенденции происходящих в системе изменений того или иного выходного параметра (что используется при моделировании развивающихся систем).

Обратная связь является основой саморегулирования, развития систем, приспособления их к изменяющимся условиям существования. При разработке моделей функционирования сложных саморегулирующихся, самоорганизующихся систем в них, как правило, одновременно присутствуют и отрицательные, и положительные обратные связи. На использовании этих понятий базируется, в частности, имитационное динамическое моделирование.

Отношение – различие или тождество вещей в одном множестве, тождественных в другом множестве. Отношение можно представить в виде совокупности связей.

Структура – упорядоченность отношений, связывающих элементы системы и обеспечивающих ее равновесие. Структура описывает способ организации системы, тип связей в системе.

Любая структура описывается следующими основными характеристиками:

- общим числом связей, характеризующих сложность системы;
- общим числом взаимодействий, которые определяют устойчивость системы;
- частотой связей, т. е. количеством связей, приходящихся на один элемент, определяющих интенсивность взаимодействия элементов;
- числом внутренних связей, которые определяют внутреннее устройство системы;
- числом внешних связей, характеризующих взаимодействие системы со средой, ее открытость.

В практике управления структуры выполняют весьма разнообразные роли. Они могут выступать в виде некоторой нормативной системы, которая используется для приведения в соответствие с ними других систем, как некоторый идеал деятельности, а также строиться под поставленные цели и задачи деятельности. Для практической деятельности особенно важны две проблемы: описание и оптимизация структур. Для описания структур применяется теория графов. **Граф** – графическая модель структуры, которая состоит из множества вершин и ребер (дуг), символизирующих элементы и их связи. Граф определяется множеством вершин и множеством пар вершин, между которыми существует связь. **Теория графов** – это область дискретной математики, занимающаяся исследованием и решением разнообразных задач, связанных с графами. Для графа свойственно то, что число путей,

по которым можно пройти от одной вершины к другой, отличается разнообразием. При этом наблюдаются различия в длительности этих путей. На основе сокращения пути прохождения между крайними вершинами графа строится оптимизация структур.

Граф имеет две формы представления: графическую и матричную (рис. 1.3). При этом матрица графа называется *матрицей инциденций*. В матрице наличие связи фиксируется единицей, а ее отсутствие – нулем.

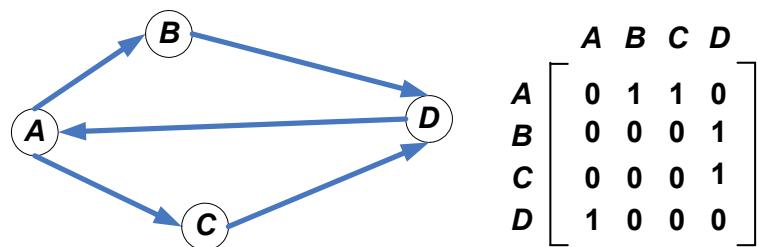


Рис. 1.3. Граф и матрица инциденций

Категории окружения системы позволяют определить границы рассмотрения системы.

Среда представляет собой то, что ограничено от системы, не принадлежит ей; это совокупность объектов, изменение которых влияет на систему, а также тех объектов, чьи свойства меняются в результате поведения системы.

Окружающая среда – внешняя среда системы или совокупность объектов, которые располагаются за границами системы, воздействуют на нее, но не принадлежат ей.

Внутренняя среда – совокупность объектов, которые находятся в границах системы, влияют на ее поведение, но не принадлежат ей.

Среда системы представляет собой некоторое единство неупорядоченных процессов, организованных факторов и систем, а также включений данной системы в надсистемы. Исходя из этого по отношению к среде можно выделить несколько важнейших тезисов:

- Среда – далеко не всегда неорганизованное образование. Чаще всего она представляет собой некоторую совокупность систем различного уровня, имеющих свои стратегии поведения. Виды среды много-

образны: природная, экологическая, хозяйственная, социальная, политическая, культурная, информационная и т. п.

- Среда отличается различным характером воздействия на систему: может быть нейтральной, пассивной или активной, агрессивной, благоприятной и неблагоприятной (например, социально-психологическая обстановка в коллективе для деятельности человека).

- Среда связана с системой сложными обменными процессами; прежде всего она является необходимым условием существования открытых систем. Вещество, энергия и информация попадают в систему из среды. Среда, в качестве которой выступает, например, государство, задает правила поведения системам, например социальным организациям или политическим партиям.

- Среда вездесуща, находится не только за пределами системы, но и внутри нее. Внешняя среда выступает средой обитания системы, а внутренняя обеспечивает ее функционирование. Это означает, что из внешней среды система черпает жизненные ресурсы, а внутренняя выступает организмом системы. Внутренняя среда и внешняя среда системы находятся во взаимной зависимости и взаимной обусловленности. С точки зрения теории множеств внутренняя среда охватывает составляющие, которые содержатся в данном множестве, а внешняя среда – это те элементы, которые не содержатся в данном множестве. Если с внешней средой все относительно ясно, ибо она не входит в множество элементов системы, то с внутренней средой сложнее: она входит в систему и определяет ее строение. В принципе, в любой системе внутренняя среда включает в себя две составляющие. В качестве первой выступают элементы, отношения, связи, воздействующие на систему и на ее составляющие, второй – внутренняя среда элементов, которая определяет их поведение. Резких граней между внутренней и внешней средами нет. Еще вчера работник был во внешней среде, искал себе работу, но уже сегодня он работает в фирме, включен во внутреннюю среду и сам ощущает ее как внешнюю для себя.

В зависимости от цели рассмотрения системы возможны три варианта взаимодействия системы со средой:

- если рассматривать систему из среды, система представляется как полностью изолированная от нее – *закрытая система* (в этом случае среда не будет играть роли при исследовании модели, хотя может влиять на ее формирование);

- если рассматривать систему изнутри, можно моделировать ее с учетом своего влияния и влияния системы на свои представления о ней (в этом случае *закрытая система* рассматривается без среды);
- если рассматривать и систему, и среду, то система представляется как *открытая*, постоянно взаимодействующая со средой (такие модели необходимы для развивающихся систем).

В последнем случае практически невозможно учесть все объекты, не включенные в систему и отнесенные к среде; их множество необходимо сузить с учетом цели исследования путем анализа взаимодействия системы со средой, включив этот «механизм» анализа в методику моделирования (что и делается в методиках системного анализа).

Частным случаем выделения системы из среды является определение ее через входы и выходы, посредством которых система общается со средой. В кибернетике и теории систем такое представление системы называют ***черным ящиком***.

Система отделена от среды границами. ***Граница системы*** – это совокупность объектов, которые одновременно принадлежат и не принадлежат данной системе. Если система возникла, то способна к самоограничению и благодаря этому отграничивает себя от окружающей среды. При этом следует обратить внимание на то, что границы системы и среды всегда зыбки и текучи. Каждая функция системы задает свои границы, поэтому система отделена от окружающей среды не четкой линией, а пограничным пространством, которое соткано из границ системы, образуемых при реализации той или иной функции. Например, фирма как организация имеет одни границы, которые не совпадают с границами ее как субъекта рыночных отношений, и совокупность ее функций формирует границы системы.

Определение границ системы принципиально важно как для ее познания, так и для управления. При этом границы системы прежде всего устанавливаются в пространстве. В бизнесе – это границы рынка, в государственном управлении – границы государства и т. п. Построение пространственной модели системы с определением границ изучается специальной отраслью знания, называемой ***топологией систем***.

Для характеристики системы могут использоваться и другие категории.

Каждая система характеризуется набором свойств. К важнейшим ***свойствам⁵ системы*** необходимо отнести следующие:

- ***ограниченность*** – отделение системы от окружающей среды границами;
- ***целостность*** – невозможность получить представление о любой части системы без информации о других составных частях;
- ***синергетический эффект*** – эффект достижения результата функционирования системы, который превышает сумму результатов функционирования отдельных ее составляющих;
- ***эмерджентность*** – свойство целого, принципиально не совпадающее с сумме свойств составляющих элементов;
- ***структурность*** – поведение системы, обусловленное не столько особенностями отдельных элементов, сколько свойствами ее структуры;
- ***взаимозависимость со средой*** – формирование и проявление свойств в процессе взаимодействия со средой;
- ***иерархичность*** – соподчиненность элементов в системе;
- ***множественность описаний*** – познание системы по причине сложности, требующее множественности ее описаний.

Любая система в своем функционировании имеет определенную цель. ***Цель системы*** – предпочтительное для нее состояние; обычно ее выражают в виде ***целевой функции***. Глобальная цель, как правило, допускает декомпозицию, в результате которой формируются взаимосвязанные частные цели. Для достижения цели в системе реализуется несколько задач, образующих иерархию. Действия по достижении цели функционирования системы обеспечиваются за счет реализации определенных процессов, при этом система переходит от одного состояния к другому. ***Состояние системы*** – множество одновременно существующих свойств объекта или системы. Среди категорий, характеризующих состояние системы, можно выделить следующие: ***переходное состояние*** – состояние системы, находящейся в процессе, на интервале между двумя состояниями; ***стабильное состояние*** – сохранение системой своих характеристик; ***кризисное состояние*** – состояние, в котором система перестает соответствовать своему назначению. ***Процесс*** – изменение состояния.

⁵ Свойство – вхождение вещи, элемента в некоторый класс вещей, когда не образуется новый предмет. Так, быть красным означает входить в класс красных вещей, вхождение при этом не образует предмета.

К основным **категориям процессов** можно отнести понятия функции, управления, интеграции, адаптации, деградации, роста.

Функция – предназначение выполнять какие-либо преобразования, для выполнения которых система и ее элементы приходят в движение. Функция обеспечивает взаимодействие системы с окружающей ее средой в процессе достижения целей или сохранения равновесия. Некоторые авторы используют вместо понятия **функция** понятие *операция*.

Управление – приведение системы в состояние равновесия или достижения цели.

Интеграция – процесс и механизм объединения и связности элементов системы.

Адаптация – приспособление системы к окружающей среде без потери своей идентичности.

Деградация – ухудшение характеристик системы.

Рост – увеличение количественных характеристик системы.

В теории систем понятие **функция** занимает очень важное место. Функции выражают поведение системы, причем это поведение при обозначении его функцией становится упорядоченным, закономерным и организованным. Поэтому функции представляют собой направления активности системы, которая взаимодействует со средой. Функция – это, прежде всего, проявление свойств системы. Ключевым положением теории систем, создающим условия для так называемого структурно-функционального анализа, является положение о том, что между структурой системы и ее функциями существует вполне определенная закономерная взаимосвязь. Функции, какова бы ни была их природа, можно реализовать лишь в структуре.

Функция в качестве основных компонентов содержит орган управления, активные средства и объект воздействия. В целом эти три компонента позволяют определить, как действовать, чем действовать и на что воздействовать для успешного достижения поставленной перед функцией цели. По отношению к системе цель функции выступает основным системообразующим фактором как способ интеграции различных действий в единую последовательность (принцип целебусловленности).

На реализации функций основано не только достижение цели, но и *развитие системы*. Поскольку развитие представляет собой нео-

братимый, направленный, закономерный переход какой-либо системы из одного состояния в другое, отличающееся от первого увеличениями или уменьшениями некоторых параметров, то устойчивое развитие складывается из устойчивости системы и устойчивости ее процессов. При этом устойчивость системы состоит из ее структурно-организационной и функциональной устойчивости. Устойчивую и неустойчивую системы можно представить весьма упрощенными механическими моделями.

Устойчивость системы – способность ее возвращаться в состояние равновесия, которое является наиболее благоприятным для выполнения системой функций после воздействия на систему каких-либо внешних факторов. **Устойчивость процесса** – это свойство системы так использовать внешние факторы влияния, что система возвращается в своем отклонении от траектории на свою же траекторию. Таким образом, устойчивость развития можно рассматривать как последовательное, прогнозируемое с высокой степенью вероятности изменение состояний системы, ее способность противодействовать неблагоприятным внешним влияниям.

Классификация систем представляет собой исключительно сложную проблему, которая еще не разрешена в науке. Причин несколько. Наиболее существенная из них заключается в том, что конкретных разновидностей систем столь много, что создается ощущение их полного совпадения со всеми типами имеющихся объектов. Другая причина состоит в абстрактности понимания самой системы. Сказывается также и то обстоятельство, что до сих пор не выработаны общие параметры, характеризующие систему. В связи с этим в зависимости от позиции автора в различных работах можно увидеть самые разнообразные подходы к классификации систем.

Особое место среди всех видов систем занимают **сложные системы**. К ним относятся системы самой различной природы, начиная от космических и микроскопических объектов, завершая животными, людьми и обществом. Эти системы определяют различные аспекты функционирования экономики и жизнедеятельности людей. Существует множество подходов к определению сложной системы: *количественное* – в зависимости от числа элементов; *процессуальное* – в зависимости от количества одновременно протекающих процессов; *гносеологическое* – исходя из невозможности полностью описать свойства систем-

мы – и т. д. Особенностью сложных систем является невозможность их понимания с точки зрения специалиста одного направления, так как в этом случае необходимо рассматривать различные аспекты их функционирования.

Необходимо отличать сложные системы от больших систем. **Большие системы** – это системы, которые невозможно исследовать, не разбивая их на подсистемы. При этом такие системы решают задачи, сгруппированные в одной предметной области, поэтому для их исследования вполне достаточно специалиста одного профиля.

Функционирование системы представляет собой довольно сложный для описания процесс, основанный на принципах структурной и функциональной целостности, относительной автономности элементов и функций, а также на принципе активности систем. Система в процессе функционирования выступает как целостное образование, в котором между ее структурой и функциями существуют взаимосвязь и взаимообусловленность. Функционирование системы обязательно опирается на ее структурные изменения.

Следует обратить внимание на то, что функционирование представляет собой постоянное воспроизведение **функционального эффекта**, который сводится к способности системы делать то, что принципиально не может сделать каждый ее отдельный элемент. Функциональный эффект базируется на родственности и различии свойств элементов, на многообразии взаимодействий между ними, их интегрированности. В процессе функционирования можно выделить несколько составляющих:

- *взаимодействие системы со средой*. Источником необходимости функционирования системы может быть воздействие на нее среды или стремление системы достигнуть предпочтительного состояния, что заставляет ее воздействовать на среду. Взаимодействие системы со средой определяет проблемную ситуацию для системы, когда ей надо приспособиться, подчиниться среде либо усиленно ее преобразовывать;
- *выработку системой алгоритма, модели взаимодействия со средой*. Этот алгоритм представляет собой именно тип взаимодействия;
- *передачу внешнего взаимодействия системы в ее внутреннюю структуру*. Наличие этого передаточного механизма в конце концов и делает сумму элементов системой;

- *переорганизацию внутренней структуры* системы благодаря ее внутренним функциям. Внутренние функции меняют состояние системы, делают способной выполнять внешние нагрузки;
- *согласованное функционирование элементов системы как целого*. Происходит перераспределение нагрузки по элементам, согласование их действий;
- *преобразование системой окружающей среды и самой себя*. Речь идет о том, что любое внешнее функционирование системы достигается посредством ее внутренней перестройки.

В процессе функционирования возникают разнообразные проблемы. Собственно само функционирование и представляет собой обнаружение системой проблемных ситуаций и их разрешение.

Рассмотрим наиболее сложные проблемы системы:

- *реактивность*, которая сводится к тому, насколько система способна фиксировать реакции окружающей среды, реакции своих элементов и вырабатывать на них собственные реакции как целое;
- *сохранение границ*, ибо функционирование системы – процесс нарушения и поддержания границ. Для того чтобы воздействовать на среду, системе нужно преодолеть свои собственные границы, но ей необходимо их удержать при воздействиях окружающей среды. Для систем свойственны текучесть, динамика границ, а нередко и расплывчатость границ, что позволяет ей лучше адаптироваться, достигать своих целей;
- *сохранение равновесия, балансированности, стабильности системы*. Функционирование всегда предполагает использование некоторых ресурсов системы, что может приводить к их расходованию, утрате. Система, выведенная из равновесия действиями окружающей среды, может отдать ей такие большие ресурсы, что утратит баланс с окружением, попадет в состояние разрушения структуры и утраты функций;
- *режимы функционирования системы*, которые характеризуют ее «вызовы» окружающей среде и воздействия на нее. Процесс функционирования поэтому многовариантен. Возможны такие режимы движения системы: равновесный (система находится в одном и том же состоянии) и периодический (система через равные промежутки времени проходит одни и те же состояния). Если система находится в равновесном или периодическом режиме, то считается, что это установ-

вившийся, или стационарный режим; переходный – движение системы между двумя периодами времени, в каждом из которых система находилась в стационарном режиме; апериодический – система проходит некоторое множество состояний, однако закономерность их прохождения более сложная; эргодический – система проходит все пространство состояний таким образом, что со временем проходит сколь угодно близко к любому заданному состоянию. Смысл этой проблемы исследовательской деятельности заключается в диагностике режима функционирования системы, а в практике управления в итоге сводится к правильному выбору режима функционирования системы управления;

- *сохранение или улучшение динамики системы.* Состояние системы представляет собой совокупность значений ее показателей. Все возможные состояния системы образуют множество ее состояний. Если в этом множестве определено понятие близости элементов, то оно называется пространством состояний. Движение (поведение) системы – это процесс перехода системы из одного состояния в другое, из него в третье и т. д. Динамика (динамизм) – состояние движения, развития, изменения системы и ее составляющих под воздействием внешних и внутренних факторов;

- *оптимальность функционирования системы*, т. е. способность системы выбрать и реализовать наилучшую траекторию из пространства функций. Оптимизация – процесс поиска наилучшей альтернативы, обеспечивающей максимальное или минимальное значение целевой функции системы;

- *способ представления функционирования системы*, ибо оптимизация системы, эффективное управление во многом зависят от того, как мы представляем систему. Конечно, природа системы сама по себе от наших представлений не изменится, а вот модель, которую мы используем на практике, окажется существенной для получения представления о системе. Если воздух, находящийся в комнате, представить в виде системы молекул, причем каждая будет характеризоваться своими координатами и скоростью, то поведение системы будет эргодично, если же определить его как систему, состоящую из одного элемента – воздуха с показателями давления и температуры, то такая система будет находиться в равновесном режиме. Для большинства практических задач второй способ определения системы предпочтительнее, поскольку получается простая детерминированная система, а в первом

случае – сложная вероятностная, которую мы не сможем исследовать, а если бы даже смогли, то нигде бы не использовали полученные результаты. Особенno необходимо правильное определение системы при управлении экономическими объектами, поскольку ошибки в их системных представлениях могут привести к значительным потерям.

Таким образом, системное представление дает общую методологию достижения цели в любой деятельности, позволяет обеспечить эффективный механизм функционирования и управления.

1.3. Понятие о системном подходе

В системном подходе как принципе познавательной и практической деятельности людей термин «подход» означает совокупность приемов, способов воздействия на кого-нибудь, в изучении чего-нибудь, ведении дела и т. д. В этом смысле подход – скорее не детальный алгоритм действия человека, а множество некоторых обобщенных правил. Это лишь подступ к делу, но не модель самого дела. Поэтому системный подход можно рассматривать как принцип деятельности. Ведь под принципом понимается наиболее общее правило деятельности, которое обеспечивает его правильность, но не гарантирует однозначность и успех. Системный подход следует рассматривать как некоторый методологический подход человека к действительности, представляющий собой некоторую общность принципов. Это по сути дела системная парадигма, системное мировоззрение. Назначение системного подхода заключается в том, что он направляет человека на системное видение действительности. Он заставляет рассматривать мир с системных позиций, точнее, с позиций его системного устройства.

В настоящее время системный подход занимает одно из ведущих мест в научном познании. Предпосылкой его использования в науке явился, прежде всего, переход к новому типу научных задач. В целом ряде областей науки центральное место начинают занимать проблемы организации и функционирования сложных объектов. Познание начинает оперировать системами, границы и состав которых далеко не очевидны и требуют специального исследования в каждом отдельном случае. Во второй половине XX века аналогичные по типу задачи возникают и в социальной практике: техника все более превращается в технику сложных систем, где многообразные технические и другие

средства тесно связаны решением единой крупной задачи (например, космические проекты, разного рода человеко-машические системы), в социальном управлении вместо господствовавших прежде локальных, отраслевых задач и принципов ведущую роль играют крупные комплексные проблемы, требующие тесной взаимосвязанности экономических, социальных и иных аспектов общественной жизни (например, проблемы создания современных производственных комплексов, развития городов, мероприятия по охране природы и т. п.).

Системный подход состоит в том, что любой объект рассматривается в качестве относительно самостоятельной системы со своими особенностями функционирования и развития. Основываясь на идеях целостности и относительной независимости объектов, находящихся в целостном мире, можно сформулировать **15 основных принципов** системного подхода:

1) **целостность** – определение наличия у целого свойств, которыми не обладает ни одна из его частей. Например, груз может быть перемещен, только когда в системе есть и груз, и транспортное средство;

2) **эмерджентность** – появление у целого свойств, которые не определяются простым сложением свойств составляющих частей. Например, самосвал и погрузчик могут очистить улицу от снега, тогда как по отдельности самосвал может только вывозить снег, а погрузчик – сдвигать;

3) **непознаваемость частей при рассмотрении их вне целого**. Очень часто при изучении каких-либо механизмов назначение отдельных деталей можно понять, только рассматривая работу всего механизма;

4) **организованность** – образование структур для связи и установления взаимозависимости частей. Например, создание структуры управления;

5) **необозримость сложных систем** – необходимость учета того факта, что в сложной системе мы никогда не сможем формализовать и понять все факторы ее деятельности;

6) **квантификация объективной реальности** – разбиение частей на конечное число элементов, связей и т. п. для создания познаваемого аналога сложной системы;

7) **принцип внешнего дополнения**. Для более полного понимания системы необходимо использовать знания о среде. Например, более точно можно рассчитать время перевозки, зная состояние дорожного покрытия, погодные условия, загруженность дорог и т. д.;

8) **формализация** – подготовка данных в виде, пригодном для хранения, обработки и анализа. Например, создание базы данных и ее использование;

9) **изоморфизм** – использование одних и тех же приемов (алгоритмов, функций, зависимостей и т. п.) для рассмотрения различных систем;

10) **иерархическая упорядоченность** – разбиение системы на взаимосвязанные уровни с формализацией их подчиненности. Например, технологический, технический, экономический и организационный в системе перевозки грузов различными видами транспорта, когда от массогабаритных характеристик груза зависят тип используемого подвижного состава, перегрузочной техники и выбор вида транспорта;

11) **декомпозиция** – метод, по которому исследуемая система делится на подсистемы, задача – на подзадачи и т. д., каждая из которых решается самостоятельно. Наиболее часто декомпозиция проводится путем построения дерева целей и дерева функций. Основной проблемой при этом является соблюдение двух противоречивых принципов: полноты – проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно; простоты – все дерево должно быть максимально компактным «вширь» и «вглубь». Компромисс достигается с помощью четырех основополагающих понятий: существенности – в модель включаются только компоненты, существенные по отношению к целям анализа; элементарности – доведение декомпозиции до простого, понятного, реализуемого результата; постепенной детализации модели; итеративности – возможность введения новых элементов в основания и продолжение декомпозиции по ним на разных ветвях дерева;

12) **агрегирование** – объединение нескольких элементов в единое целое. Результат агрегирования называют агрегатом. Агрегированные показатели представляют собой обобщенные, синтетические измерители, объединяющие в одном общем показателе многие частные;

13) **согласованность** – непротиворечивость решений на сопряженных уровнях системы. Например, экономически наиболее дешевый вариант перевозки должен быть обеспечен техническими возможностями выбранного вида транспорта;

14) **координируемость** – возможность воздействия на подчиненные части системы предопределяет необходимость предусмотреть соответствующие связи или отношения;

15) совместимость – наличие однородности информации в связях системы предусматривает возможность совмещения частей целого, понимание передаваемой информации, возможность ее обработки и т. д.

В соответствии с принципом системного подхода каждая система влияет на другую систему. Весь окружающий мир – взаимодействующие системы. Цель системного анализа – выяснить эти взаимодействия, их потенциал и найти оптимальный путь функционирования системы.

Системный анализ – это методология общей теории систем, представляющая собой совокупность понятий, методов, процедур и технологий для изучения, описания, реализации явлений и процессов различной природы и характера, междисциплинарных проблем. Это совокупность общих законов, методов, приемов исследования систем на основе системного подхода. Системный анализ позволяет использовать в различных науках, системах следующие системные методы и процедуры:

- абстрагирование и конкретизацию;
- анализ и синтез, индукцию и дедукцию;
- формализацию и конкретизацию;
- композицию и декомпозицию;
- линеаризацию и выделение нелинейных составляющих;
- структурирование и реструктурирование;
- макетирование;
- реинжиниринг;
- алгоритмизацию;
- моделирование и эксперимент;
- программное управление и регулирование;
- распознавание и идентификацию;
- кластеризацию и классификацию;
- экспертное оценивание и тестирование;
- верификацию и другие методы и процедуры.

Системный анализ базируется на ряде общих *принципов*, среди которых принципы:

- конечной цели, который заключается в абсолютном приорите глобальной цели;
- дедуктивной последовательности – последовательного рассмотрения системы по этапам: от окружения и связей с целым до связей частей целого;

- интегрированного рассмотрения – каждая система должна быть рассмотрена как целое даже при рассмотрении лишь отдельных подсистем системы;
- согласования ресурсов и целей рассмотрения, актуализации системы;
- бесконфликтности – отсутствия конфликтов между частями целого, приводящих к конфликту целей целого и части.

Основными задачами *системного анализа* являются следующие:

- *задача декомпозиции* означает представление системы в виде подсистем, состоящих из более мелких элементов;
- *задача анализа* состоит в нахождении различного рода свойств системы, ее элементов и окружающей среды с целью определить закономерности поведения системы;
- *задача синтеза* состоит в том, чтобы на основе знаний о системе, полученных при решении первых двух задач, создать модель системы, определить ее структуру, параметры, обеспечивающие эффективное функционирование системы, решение задач и достижение поставленных целей.

Основные функции системного анализа в рамках трех описанных основных задач представлены в табл. 1.1.

Центральной процедурой в системном анализе является построение обобщенной модели (или моделей), отображающей все факторы и взаимосвязи реальной ситуации, которые могут проявиться в процессе осуществления решения. Полученная модель исследуется для выяснения близости результата применения того или иного из альтернативных вариантов действий к желаемому, сравнительных затрат ресурсов по каждому из вариантов, степени чувствительности модели к различным нежелательным внешним воздействиям.

Последовательность и приемы системного анализа приведены в виде схемы на рис. 1.4. Надо отметить, что в большинстве случаев для транспортных систем ввиду их сложности и масштаба проведение экспериментальных исследований либо очень дорого, либо вообще невозможно. В этом случае применяют либо комбинированные исследования, когда натурным испытаниям подвергают только отдельные элементы системы, либо вообще приходится ограничиться только вычислительными экспериментами, что и определяет значение моделирования в исследовании транспортных систем.

Таблица 1.1

Основные задачи и функции системного анализа

Структура системного анализа		
Декомпозиция	Анализ	Синтез
Определение и декомпозиция общей цели, основной функции	Функционально-структурный анализ	Разработка модели системы
Выделение системы из среды	Морфологический анализ (анализ взаимосвязи компонентов)	Структурный синтез
Описание действующих факторов	Генетический анализ (анализ предыстории, тенденций, прогнозирование)	Параметрический синтез
Описание тенденций развития, неопределенностей	Анализ аналогов	Оценка системы
Описание как «черного ящика»	Анализ эффективности	
Функциональная, компонентная и структурная декомпозиции	Формирование требований к создаваемой системе	



Рис. 1.4. Последовательность и приемы системного анализа

1.4. Системотехника

Системотехника – направление науки и техники, охватывающее проектирование, создание, испытание и эксплуатацию сложных систем технического и социально-технического характера. Она является прикладным направлением теории систем и сформировалась к началу 1960-х годов в результате потребности в реализации сложных электронных и программных систем в военной и космической промышленности. По сути системотехника является техническим приложением системного подхода.

Основное направление приложения системотехники к сложным человеко-машическим системам определил *объект системотехники – системотехнические комплексы (СТК)*. Особенностью данного объекта является его существенная неоднородность, наличие и чисто технических компонентов, и людей: руководителей и персонала. Таким образом, *предметом системотехники* является обеспечение полного «жизненного цикла» систем (проектирование, испытание, производство, эксплуатация и ликвидация). При этом все-таки основное внимание уделяется проектированию систем, которое включает и методологию поиска системных характеристик СТК, и методы формирования эффективной системы процедур проектирования.

При проектировании сложных систем в соответствии с положениями системотехники можно выделить пять стадий: *предварительное исследование, создание модели системы, исследование этой модели, проектирование и конструирование прототипа*. Четкая граница между разными стадиями отсутствует, и проектировщики могут повторно рассмотреть всю задачу на любой стадии разработки (принцип последовательно-параллельного решения задачи).

Предварительное исследование посвящается изучению граничных условий задачи и желаемых характеристик различных подсистем, а также экономической стороне проекта. Точно формулируются назначение системы и основные требования к ней. Изучаются источники информации и аналогичные системы, включая влияние на них внешних условий и помех. Наконец, оценивается совместимость системы с условиями окружающей среды и экономическими требованиями.

На второй и третьей стадиях создается модель системы и проводится ее компьютерное моделирование, позволяющее оценить влия-

ние каждой подсистемы на работу остальных. Оценивается также влияние различных параметров на эффективность системы. На последних двух стадиях разработка завершается, причем используется широкий диапазон научных и технических знаний и средств. После завершения проектирования строится прототип системы. Если испытания прототипа проходят успешно, то делается вывод о завершении разработки системы.

Стадии разработки системы принято делить на два уровня: *макропроектирование (внешнее проектирование)*, в процессе которого решаются функционально-структурные вопросы системы в целом, и *микропроектирование (внутреннее проектирование)*, связанное с разработкой элементов системы как физических единиц.

Макропроектирование начинается с формулировки проблемы, которая включает в себя по крайней мере три основных раздела: определение целей создания системы и круга решаемых ею задач; оценку действующих на систему факторов и определение их характеристик; выбор показателей эффективности системы. Цели и задачи системы определяют исходя из потребностей их практического использования, с учетом тенденций и особенностей технического прогресса, а также экономической целесообразности. Существенное значение при этом имеет опыт применения имеющихся аналогичных систем, а также четкое понимание роли проектируемой системы в бизнес-процессе организации. Для оценки внешних и внутренних факторов, действующих на систему, помимо опыта эксплуатации аналогичных систем используют статистические данные, полученные в результате специальных экспериментальных исследований. В качестве показателей эффективности выбирают числовые характеристики, оценивающие степень соответствия системы задачам, поставленным перед ней. Материалы по изучению целей и задач и результаты проведенных экспериментов используют для обоснования технического задания на разработку системы.

В описанном выше процессе всегда приходится идти на компромисс между требованиями к разным подсистемам и их характеристиками, поэтому при проектировании сложной системы специалист, работающий над какой-либо подсистемой, должен быть осведомлен как о системе в целом, так и о проблемах, возникающих при разработке остальных подсистем. Такой подход, при котором тщательно исследуются и моделируются все части системы в их взаимосвязи, часто позволяет выявить способы оптимизации и упрощения системы в це-

лом. Обычно это приводит к системе, которая оказывается эффективнее, дешевле и надежнее системы, спроектированной без применения такого подхода.

Рассмотрим *общую структуру СТК*, отдельные системы которой включают как технические компоненты, так и взаимодействующий с ними персонал. Эта структура приведена на рис. 1.5.

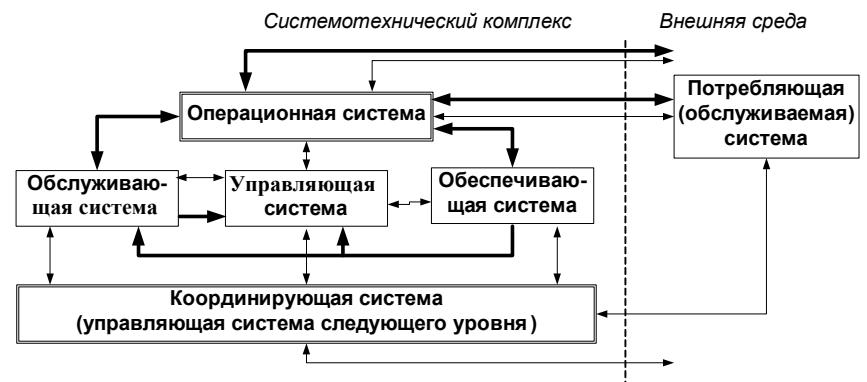


Рис. 1.5. Базовая структура СТК

Основу СТК составляет операционная (производственная) система, обеспечивающая в соответствии со своим назначением решение необходимого круга технологических задач по производству какого-то продукта или услуги. В состав операционной системы входят совокупность технических средств, требующихся для реализации необходимых технологических операций, энергия, материалы, персонал. Ведущую роль среди других систем играет управляющая система, которая обеспечивает необходимый уровень организации всех процессов в СТК. Обслуживающая система обеспечивает реализацию мероприятий, цель которых состоит в том, чтобы, во-первых, минимизировать темп потери работоспособности технических компонентов системы и, во-вторых, при утрате работоспособности восстановить ее в максимальной возможной степени за время не более допустимого. Обеспечивающая система служит для реализации таких процедур, которые создают необходимые условия для использования системы.

Информационные связи (тонкие линии) и вещественно-энергетические связи (толстые линии) в совокупности составляют еще одну

подсистему СТК – систему коммуникаций, основная задача которой состоит в перемещении элементов в пространстве между сообщающимися компонентами СТК.

Координация действий всех приведенных систем, формирование целевых установок и обеспечение внешних связей являются основными задачами координирующей системы. Эта система по существу является управляющей системой следующего иерархического уровня и представляет высший уровень руководства (топ-менеджмент).

Любой СТК функционирует в некоторой среде. В частности, ею может являться и система более высокого уровня, в которую данный СТК входит составной частью. Потребляющая система является одной из подсистем внешней среды. Ее выделение целесообразно, так как она наиболее тесно связана с СТК, оказывает на него определяющее влияние и обычно весь смысл функционирования данного СТК сводится к удовлетворению требований потребляющей системы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные задачи общей теории систем и ее место в структуре системологии.
2. Раскройте понятие системы. Приведите примеры систем из окружающей области, из транспортной деятельности.
3. Назовите категории строения системы.
4. Назовите категории окружения системы.
5. Назовите категории цели, состояния и процессов.
6. Приведите классификацию систем.
7. Приведите основные свойства систем.
8. Дайте понятие о системном подходе.
9. Назовите основные принципы и этапы системного анализа.
10. Что такое системотехника? Опишите структуру системотехнического комплекса.

Глава 2. ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.1. Транспорт в современном мире

В экономике транспортная отрасль занимает специфическое положение, относясь к экономической инфраструктуре. Транспорт является частью производительных сил общества и представляет собой самостоятельную отрасль материального производства, обеспечивающую нормальную деятельность экономической системы в целом. Отсюда следует, что продукция транспорта имеет материальный характер и выражается в перемещении вещественного продукта других отраслей. *Продукция транспорта* имеет следующие особенности:

- Материальный характер транспортной продукции заключается в изменении пространственного положения перевозимых товаров.
- На транспорте процесс производства и процесс потребления продукции не разделены во времени, продукция транспорта потребляется как полезный эффект, а не вещь.
- Транспортную продукцию нельзя накопить впрок, повышение спроса на перевозки потребует использования дополнительных пропускных возможностей.
- В процессе работы транспорта не создается новой продукции, а наоборот, этот процесс сопровождается потерей физических объемов грузов.
- Транспортная продукция вызывает дополнительные затраты в производящих отраслях, что влечет несовпадение интересов экономики в целом и транспортной отрасли.

Роль транспорта хорошо показывает схема взаимосвязей в сфере производства и потребления, приведенная на рис. 2.1.

Совершенно очевидно, что без транспорта невозможно организовать и поддерживать эти взаимосвязи и обеспечивать функционирование экономики.

Современные тенденции развития экономики направлены на все большую интеграцию транспортных процессов в производственные. Необходимость снижения себестоимости продукции даже при самых современных технологиях производства требует оптимизации в целом

цепочки сырье – производство – складирование – реализация. Это вызвало развитие соответствующего класса систем, которые получили название логистических. Помимо главной цели – снижения себестоимости производства продукции ***логистические системы*** эффективно снимают основное противоречие между производством и транспортом – снижение транспортных издержек в себестоимости продукции.

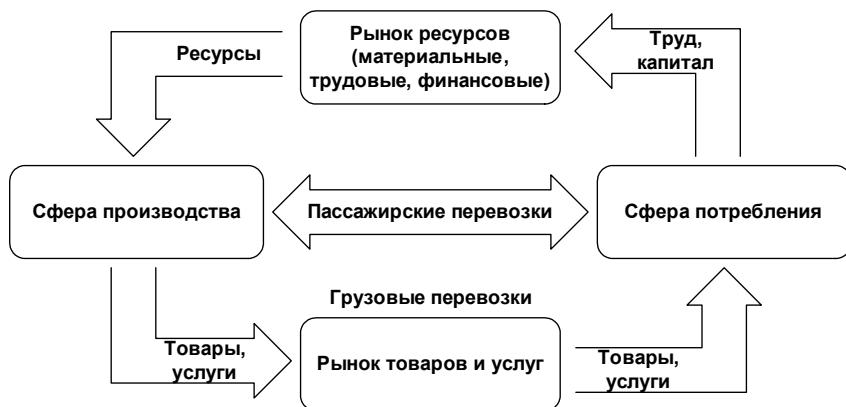


Рис. 2.1. Взаимосвязи в сфере производства и потребления

В то же время транспортная деятельность несет обществу определенные издержки. Они являются *внешними по отношению к транспорту*, так как не входят в затраты перевозчика и выражаются в загрязнении окружающей среды (воздух, поверхности дорог и прилегающих территорий, шум, электромагнитные излучения), износе дорог, связанном с увеличением интенсивности движения, ухудшением условий мобильности населения, ДТП и т. д.

В Российской Федерации, как и в других развитых странах, транспорт является одной из крупнейших базовых отраслей хозяйства, важнейшей составной частью производственной и социальной инфраструктуры.

Транспортные коммуникации объединяют все районы страны, что является необходимым условием ее территориальной целостности, единства ее экономического пространства. Они связывают страну с мировым сообществом, являясь материальной основой обеспечения внешнеэкономических связей России и ее интеграции в глобальную экономическую систему.

Выгодное географическое положение позволяет России получать значительные доходы от экспорта транспортных услуг, в том числе от осуществления транзитных перевозок по своим коммуникациям.

О месте и значении транспорта свидетельствуют также его значительный удельный вес в основных производственных фондах страны (почти треть), существенная доля транспортных услуг в валовом внутреннем продукте (около 8 %), инвестициях на развитие отраслей экономики (более 20 %) и численности занятых работников (более 6 %), а также в потреблении энергоресурсов, металла и в ряде других важных показателей, характеризующих экономику страны.

Только населению за год оказывается транспортных услуг на сумму около 730 млрд р., что составляет около 20 % от объема всех платных услуг.

Протяженность путей сообщения транспортной системы России по состоянию на начало 2009 года составляла 86 тыс. км железных дорог общего пользования, 42 тыс. км путей промышленного железнодорожного транспорта, 940 тыс. км автомобильных дорог (в том числе 754 тыс. км дорог с твердым покрытием); 102 тыс. км внутренних водных путей; 2,7 тыс. км трамвайных путей, 461 км путей метрополитена; 4,9 тыс. км троллейбусных линий; 228 тыс. км магистральных трубопроводов; 532 тыс. км воздушных трасс, из которых более 150 тыс. км являются международными.

Ежесуточно по этим транспортным коммуникациям всеми видами транспорта перевозится около 70 млн пассажиров и более 30 млн т груза.

В транспортной системе России основное количество транспортных средств приходится на автомобильный транспорт. В нашей стране эксплуатируется более 32 млн легковых автомобилей, почти 900 тыс. автобусов и более 5 млн грузовиков. В городах для перевозки населения используется более 9 тыс. трамвайных вагонов, 11 тыс. троллейбусов и 6 тыс. вагонов метрополитена.

В табл. 2.1 приведены данные по работе отдельных видов транспорта в 2008 г.

Все эти обстоятельства позволяют отнести транспорт к числу приоритетных отраслей экономики.

Транспорт играет важную роль в социально-экономическом развитии страны. Транспортная система обеспечивает условия экономи-

ческого роста, повышения конкурентоспособности национальной экономики и качества жизни населения.

*Таблица 2.1
Основные показатели работы по видам транспорта*

Вид транспорта	Перевозки грузов		Перевозки пассажиров	
	Объем, млн т	Грузооборот, млрд ткм	Объем, млн чел.	Пассажирооборот, млрд пасс. км
Авиационный	1	4	50	120
Автомобильный	6900	220	12100	115
Водный (внутренний)	150	65	20	1
Городской электрический	–	–	8900	60
Железнодорожный	1300	2100	1300	180
Морской	35	85	2	–
Промышленный	3700	30	–	–
Трубопроводный	1100	2500	–	–

Доступ к безопасным и качественным транспортным услугам определяет эффективность работы и развития производства, бизнеса и социальной сферы. В связи с этим роль транспорта в социально-экономическом развитии страны определяется рядом объемных, стоимостных и качественных характеристик уровня транспортного обслуживания.

Объемные характеристики транспортного обслуживания напрямую влияют на полноту реализации экономических связей внутри страны и за ее пределами, а также на возможность перемещения всех слоев населения для удовлетворения производственных и социальных потребностей. Географическая и технологическая доступность транспортных услуг определяет возможности территориального развития экономики и социальной сферы.

Стоимостные характеристики перевозок любой продукции (транспортный тариф) отражаются непосредственно на ее конечной цене, прибавляются к затратам на производство, влияют на конкурентоспособность продукции и зону ее сбыта. Стоимость перевозок в пассажирском сообщении ограничивает возможности для поездок населения, а во многих случаях для части населения с невысокими доходами делает эти поездки недоступными. Удешевление пассажирского

сообщения, смягчающего эти ограничения, имеет не только большое социальное, но и экономическое значение.

Качественные характеристики уровня транспортного обслуживания связаны со скоростью, своевременностью, ритмичностью, безопасностью и экологичностью функционирования транспортной системы.

Скорость транспортного сообщения влияет на эффективность экономических связей и подвижность населения. Рост скорости доставки грузов и пассажиров дает ощутимый экономический и социальный эффект. При перевозке грузов он выражается в высвобождении оборотных средств предприятий, а при перевозке пассажиров – в высвобождении времени людей, которое может быть использовано на другие цели.

Удешевление и ускорение перевозок на магистральных видах транспорта позволяют сблизить удаленные друг от друга регионы страны, повысить качество жизни населения и уровень деловой активности, укрепить территориальное единство страны и создать более благоприятные условия для реализации потенциальных экономических и социальных возможностей каждого российского региона.

Своевременность (регулярность, ритмичность) транспортного обслуживания в грузовом и пассажирском сообщениях имеет большое экономическое значение. В грузовом сообщении, например, от нее зависят величина страховых запасов продукции на складах грузополучателей, необходимых для поддержания непрерывности производства и снабжения населения, объем необходимых оборотных средств и затраты на хранение грузов.

Важную роль в социально-экономическом развитии страны играют безопасность и экологичность транспортной системы.

Роль транспорта в обеспечении обороноспособности и национальной безопасности России обусловлена ростом требований к мобильности Вооруженных сил Российской Федерации. Безопасность транспортной системы зависит от эффективной работы аварийно-спасательных служб, подразделений гражданской обороны и специальных служб и таким образом определяет условия повышения общегосударственной безопасности и снижения террористических рисков.

В условиях усиления внимания общества к экологическим факторам снижение вредного воздействия транспорта на окружающую среду имеет большое социальное значение и может оказать значительное влияние на развитие городских агломераций.

Таким образом, транспорт является одной из крупнейших системообразующих отраслей, имеющих тесные связи со всеми элементами экономики и социальной сферы. По мере дальнейшего развития страны, расширения ее внутренних и внешних транспортно-экономических связей, роста объемов производства и повышения уровня жизни населения значение транспорта и его роль как системообразующего фактора будут только возрастать.

2.2. Особенности транспортных систем

Транспортная система в наиболее общем случае – это образующая связанное целое совокупность *работников, транспортных средств и оборудования, элементов транспортной инфраструктуры и инфраструктуры субъектов перевозки, включая систему управления*, направленная на *эффективное перемещение грузов и пассажиров*.

Инфраструктура – это физические компоненты транспортной системы, которые занимают фиксированное положение в пространстве и создают *транспортную сеть*, включающую *связи* (сегменты автомобильных и железных дорог, трубопроводов и т. п.) и *узлы* (пересечения сегментов дорог, терминалы различного назначения и т. д.). Важной задачей инженера соответствующего профиля является обеспечение требуемой пропускной способности связей и узлов, их технологическое соответствие обслуживаемым потокам грузов и пассажиров для *своевременного* обеспечения потребностей экономики и населения.

Перемещение **транспортных средств** по транспортной сети образует *транспортные потоки*. Транспортные средства имеют широкий диапазон характеристик, которые необходимо учитывать при проектировании транспортных сетей. В зависимости от используемых транспортных средств, будь то велосипед или карьерный самосвал, трамвай или железнодорожный состав, будут меняться не только характеристики транспортного потока, но и требования к геометрическим и техническим параметрам транспортных сетей. В узлах транспортных сетей грузы и пассажиры, следующие до этого на транспортных средствах, перемещаясь на другие транспортные средства, склады и т. д., образуют самостоятельные потоки, которые также должны быть своевременно обслужены.

Система управления включает *систему управления транспортными потоками* и *систему управления работой транспортных*

средств. Система управления работой транспортных средств определяется выбранной технологией перевозок и, как правило, является частью транспортной инфраструктуры. Из этой системы управления не следует выделять *водителя*, который непосредственно реализует целевые указания. В случае индивидуального транспорта водитель оказывается единственным субъектом этой системы управления. Присутствие водителя в системе управления определяет необходимость учета человеческого фактора. Система управления транспортными потоками выполняет необходимые действия по упорядочению движения транспортных средств и исключению конфликтов между ними. Эта система оперирует знаками, дорожной разметкой и сигналами в соответствии с определенными правилами.

Эффективность транспортной системы не может рассматриваться только в рамках достижения оптимальности выполнения соответствующих процессов внутри системы. Основными задачами транспортной системы являются удовлетворение потребности экономики в перевозке грузов и обеспечение мобильности населения. В связи с этим эффективность транспортной системы всегда будет определяться неким балансом между противоречивыми требованиями экономики и общества. Ярким примером является желание пассажира, чтобы транспорт подъехал к остановке, как только пассажир подошел к ней, и желание перевозчика установить такой интервал движения, чтобы транспортные средства всегда были заполнены полностью и приносили, максимальный доход. Таким образом, для построения эффективной транспортной системы необходимо познания в области транспорта сочетать с экономикой, градостроительством, географией, экологией, социологией и психологией.

Для приближения материала курса к специальности в дальнейшем, говоря о транспортных системах, будем, как правило, подразумевать автотранспортные системы. В *автомобильной системе* в качестве транспортных средств используются автомобили. Классификация автотранспортных систем может быть выполнена по разным признакам. Относительно объекта перевозки они могут быть грузовые, пассажирские или грузопассажирские, относительно сферы применения – общего пользования или внутрипроизводственные и т. д. Классификация автотранспортных систем относительно уровня сложности приведена на рис. 2.2.

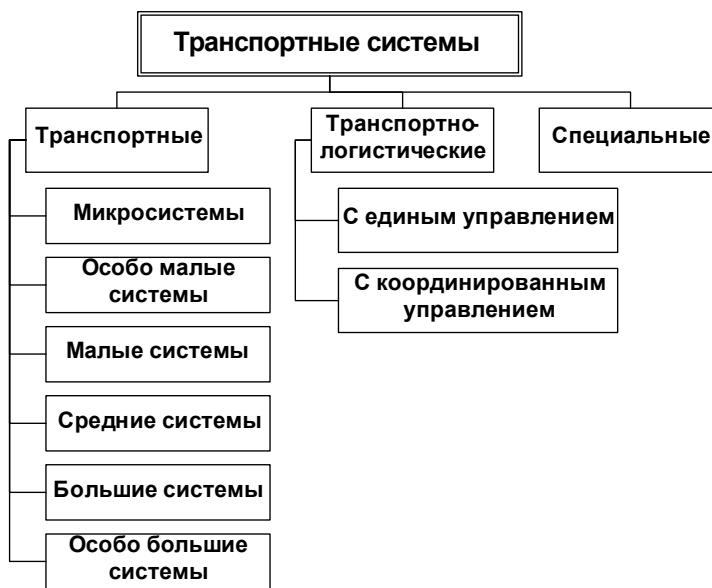


Рис. 2.2. Укрупненная классификация автотранспортных систем по уровню сложности

При выполнении автомобильных перевозок можно выделить несколько типичных вариантов организации транспортного процесса:

1) однократная или многократная перевозка груза одним автомобилем от одного и того же отправителя к одному и тому же потребителю (**микросистема**). Это простейший вариант организации транспортного процесса. При этом варианте обратный пробег от потребителя к отправителю автомобиль выполняет без груза. На различных комбинациях микросистем основаны все остальные варианты организации транспортного процесса;

2) однократная или многократная перевозка груза одним автомобилем от одного и того же отправителя к одному и тому же потребителю с доставкой груза в обратном направлении до отправителя или любого промежуточного пункта (**особо малая система**). Следует обратить внимание, что в этом случае вид и количество груза, перевозимого в прямом и обратном направлениях, как правило, различны;

3) организация транспортного процесса в первом или втором вариантах с использованием нескольких автомобилей, обслуживающих

одного отправителя или потребителя грузов (**малая система с челночным движением автомобилей**). Для этого варианта сложность и требования к организации транспортного процесса существенно выше, так как требуется увязка работы нескольких автомобилей, составление графиков загрузки погрузочно-разгрузочных пунктов и т. д.

Во всех трех рассмотренных вариантах автомобиль перемещается от пункта к пункту по одному и тому же маршруту в прямом и обратном направлениях (рис. 2.3, а);

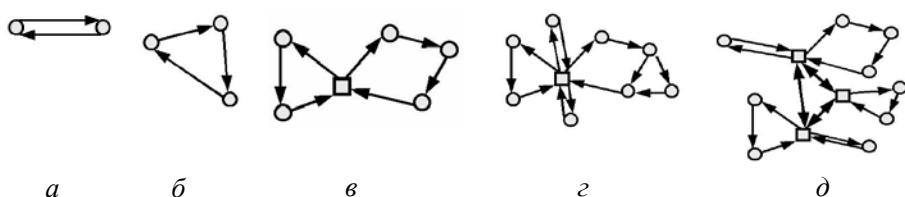


Рис. 2.3. Примеры транспортных систем:
 а – челночное движение автомобилей в простейших вариантах организации транспортного процесса; б – кольцевое движение автомобилей; в – развоз или сбор груза; г – транспортный процесс обслуживания производственной структуры; д – транспортный процесс обслуживания нескольких производственных структур

4) однократная или многократная перевозка груза от нескольких отправителей к нескольким потребителям, при которой один или несколько автомобилей периодически возвращаются в пункт первой загрузки (**малая система с кольцевым движением подвижного состава**). При этом варианте автомобиль за один оборот делает несколько остановок у отправителей и потребителей грузов (рис. 2.3, б). Обязательным требованием к данному варианту организации транспортного процесса является необходимость составления графика движения подвижного состава. Это связано с тем, что длина оборота при кольцевом движении, как правило, существенно больше, чем при челночном;

5) развоз или сбор груза от одного отправителя или к одному потребителю (**малая система с развозом или сбором груза**). Схема перемещения автомобиля аналогична варианту 4, но за оборот происходит только одна загрузка автомобиля и постепенная его разгрузка в нескольких пунктах при развозе груза. Одновременно могут выполняться постепенная многократная загрузка и однократная разгрузка при сборе

груза. Схема этого варианта организации транспортного процесса приведена на рис. 2.3, в;

6) обслуживание определенной производственной структуры (предприятие, склад, терминал и т. д.), что требует использования нескольких малых систем, работа которых будет подчинена одной цели – обслуживанию одного потребителя (*средняя система*). Пример данного варианта организации транспортного процесса представлен на рис. 2.3, г;

7) интегрированная транспортная система. Она может обслуживать несколько производственных структур или определенный географический регион (*большая система*). В данном случае процессы перемещения грузов будут происходить между несколькими производственными предприятиями, складами или терминалами со сбором или развозкой груза отправителем и потребителем. Пример данного варианта организации транспортного процесса представлен на рис. 2.3, д;

8) *особо большая система*. В ней для транспортного обслуживания задействованы несколько перевозчиков или операторов и могут использоваться несколько видов транспорта. В этом случае конкретный клиент может обслуживаться транспортными средствами различных владельцев.

С увеличением номера варианта организации транспортного процесса последовательно возрастает сложность согласования работы его субъектов. Одновременно увеличиваются число субъектов и значимость согласования работы этих субъектов в общей эффективности транспортного процесса.

В вариантах организации транспортного процесса, отображаемых на рис. 2.3, а, можно выделить три субъекта: грузоотправитель, грузополучатель и перевозчик. В большой системе (см. рис. 2.3, д) таких субъектов уже десятки. Невозможность согласования кем-либо из грузоотправителей, грузополучателей или перевозчиков всех элементов транспортного процесса в средних и главным образом больших системах вызывает появление дополнительных субъектов: экспедитора и оператора.

Приведенная на рис. 2.3 классификация позволяет, в частности, выявить наиболее заинтересованного в повышении эффективности функционирования системы субъекта – организатора той или иной транспортной системы. Очевидно, что организатором малых и сред-

них систем будет в большей степени грузоотправитель, а больших – экспедитор или оператор.

Согласование интересов всех субъектов для достижения синергетического эффекта возможно при объединении транспортных систем различных уровней сложности, например средних и больших, в особо большие.

Транспортно-логистические системы (ЛС) охватывают не только процесс перевозки. Они в целом решают процесс доставки грузов или пассажиров независимо от используемых видов транспорта, но с учетом необходимых объемов, сроков и качественных показателей доставки. Таким образом, ЛС используют принципы построения многоуровневых систем, обеспечивающих возможность управления материальными потоками на различных уровнях операционного управления с выходом на единые критерии эффективности ЛС. При этом в ЛС существенное значение имеют информационные управляющие системы, так как только с их помощью можно обеспечить координацию управления в едином информационном пространстве множества субъектов. В целом предметную область ЛС можно представить в виде обобщенной схемы, приведенной на рис. 2.4.

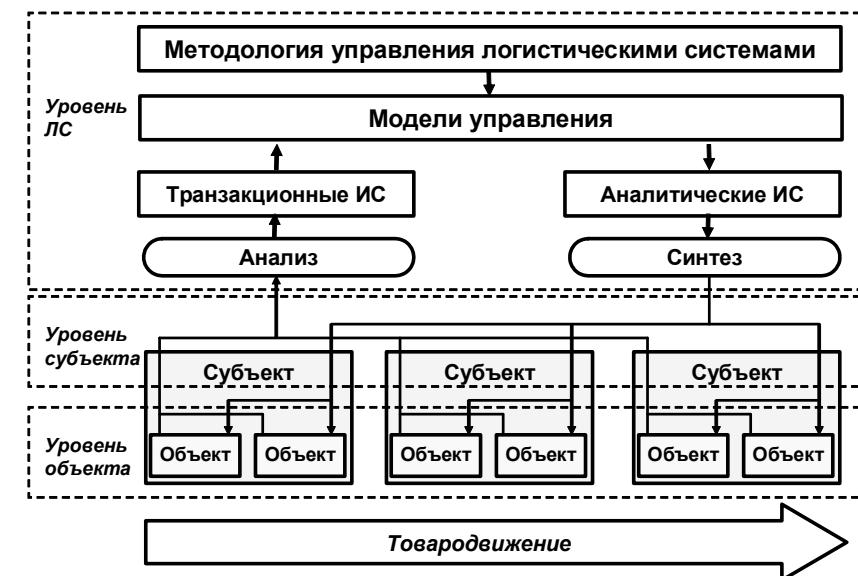


Рис. 2.4. Обобщенная схема предметной области ЛС

Специальные транспортные системы предназначены для решения конкретных задач, которые возникают при необходимости перевозки особых грузов или организации транспортного сообщения в особых условиях. Примерами таких систем могут быть контейнерная транспортная система, система доставки пассажиров в аэропорт и т. п.

Функциональная структура транспортной системы представлена на рис. 2.5. В общем случае на первом уровне выделяют *производственную* и *управляющую* системы. В производственной системе выделяются следующие подсистемы:

- *технологическая* – обеспечивает выполнение основных функций транспортной системы;
- *обеспечивающая* – выполняет функции, сопровождающие транспортные процессы;
- *восстанавливающая* – выполняет функции по поддержанию элементов системы в работоспособном состоянии.

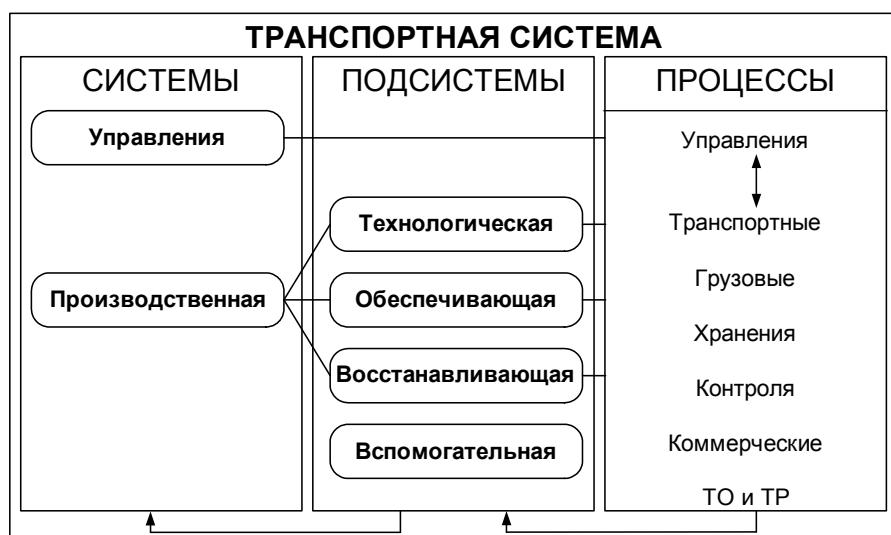


Рис. 2.5. Функциональная структура транспортной системы

Вспомогательная подсистема обеспечивает выполнение функций, связанных с общей работой системы (кадровая работа, учетные функции и т. п.).

В целом подсистемы обеспечивают выполнение процессов для достижения цели функционирования системы. Управляемость системы поддерживается за счет наличия обратных связей, передающих информацию о соответствии цели результатам выполнения процессов и функционирования подсистем.

Характерной особенностью функционирования транспортных систем является *циклический характер их работы*. Начальной точкой рабочего цикла транспортной системы является подача порожнего подвижного состава для выполнения перевозок. При перевозках грузов – это подача подвижного состава под погрузку, на пассажирских перевозках – выезд автобуса с конечного пункта на маршрут. В зависимости от технологии выполнения перевозок и организации движения в процессе транспортного цикла могут выполняться различные транспортные процессы, связанные с погрузкой или разгрузкой грузов, посадкой или высадкой пассажиров. Транспортный цикл заканчивается в момент прибытия порожнего подвижного состава для погрузки или в момент начала выполнения маршрута пассажирским автобусом.

В реальных условиях на выполнение транспортного цикла влияет существенное количество различных возмущающих воздействий, большинство из которых имеет случайный характер, поэтому основные характеристики транспортного цикла, например его продолжительность, как правило, весьма нестабильны. С целью их стабилизации необходимо предпринимать меры для снижения числа возмущающих воздействий. Это, например, организация выделенной полосы движения и приоритетного светофорного регулирования для городского общественного транспорта.

Совокупность элементов и связей, образующих транспортную систему, не является постоянной величиной, а зависит от объекта управления и других факторов. Обычно состав системы определяется позицией «наблюдателя» – обобщающее название исследователя, проектировщика, конструктора, лица, принимающего решения и других аналогичных субъектов, изучающих, создающих систему или управляющих ею. Например, для экспедитора объектом управления является процесс доставки груза, и, с его точки зрения, в транспортную систему войдут грузовладелец, перевозчик, график доставки и т. д.

С точки зрения перевозчика, заключившего с экспедитором договор на перевозки, в транспортную систему войдут водитель, транспортное средство, груз, средства технического обеспечения и т. д. Для пе-

ревозчика объектом управления является транспортное средство, поэтому все элементы предметной области, на которые он не может воздействовать, относятся к среде.

Сложность определения границ транспортной системы возрастает при увеличении степени ее взаимодействия с другими системами, например, в крупных городах. На рис. 2.6 схематично показано взаимодействие транспортной системы крупного города с другими системами. При решении определенных задач управления результат может быть достигнут только при комплексном рассмотрении нескольких систем и их постоянной координации. Так, транспортная система города не сможет успешно развиваться, если в план развития города не будут заложены соответствующие территориальные ресурсы. Сокращение среднего времени поездки пассажиров общественного транспорта невозможно без выделения полос для обособленного движения наземного транспорта, строительства транспортно-пересадочных узлов на станциях скоростного транспорта и т. п.



Рис. 2.6. Взаимодействие транспортной системы крупного города с другими системами

Таким образом, городская транспортная система может успешно функционировать только в условиях тесной координации с другими городскими системами. В реальности эта координация усложняется выбором критериев работы отдельных систем, которые слабо увязаны с результатами функционирования смежных систем.

Рассмотрим особенности транспортной системы как **объекта управления**. Элементы транспортной системы функционируют в рамках определенной организации транспортных процессов, которая предопределяет возможность движения в системе за счет установления в системе связей между ее элементами, определения правил и условий взаимодействия элементов при ее функционировании (например, ПДД при движении автомобилей, договора между участниками транспортного процесса и т. п.). Форма организации транспортных процессов определяется их содержанием: технологией и ролью тех или иных процессов в транспортной системе.

Наличие такого элемента транспортной сети, как люди, относит транспортную систему к разряду человеко-машинных, или организационных систем. *Активный элемент системы* – человек, он обладает способностью к целенаправленному поведению в быстро меняющейся ситуации, адаптации к новым условиям функционирования системы. Наличие в системе множества людей приводит к формированию коллективного поведения ее участников, которое складывается как результат достаточно независимого поведения отдельных индивидуумов, стремящихся к достижению собственных целей. Присутствие в объекте управления активных элементов приводит к формированию устойчивых режимов функционирования транспортной системы, поскольку всякое внешнее для объекта возмущение компенсируется на уровне индивидуальных решений субъектов системы.

Транспортная система является уникальным примером системы с коллективным поведением ее субъектов. В связи с этим коллективное поведение является мощным фактором, формирующим закономерности функционирования транспортной системы. Причем процессы самоорганизации приводят к образованию нескольких уровней устойчивого функционирования системы, образующих иерархическую структуру коллективной адаптации с различной временной стабильностью. В этом плане можно выделить три следующих структурных уровня:

- распределение мест формирования, обработки и потребления грузов, расселение населения;

- организацию транспортных процессов в сети;
- формирование транспортных потоков на участках сети.

На рис. 2.7 приведены соответствующие временной стабильности уровни и соответствующие им объекты управления транспортной системы.

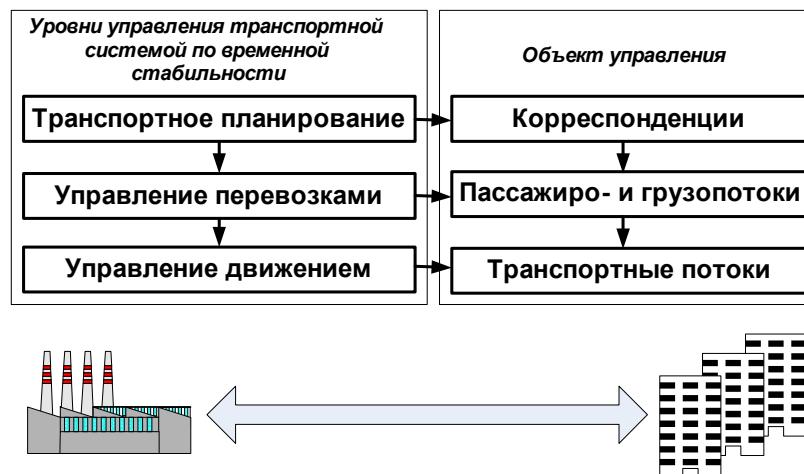


Рис. 2.7. Уровни временной стабильности и соответствующие им объекты управления транспортной системы

В результате размещения мест приложения труда, жилых районов и объектов транспортного притяжения в городе устанавливаются определенные транспортные связи, которым соответствуют *корреспонденции* населения и грузов⁶. Достаточно медленные изменения во времени размещения объектов предопределяют формирование устойчивых корреспонденций. Перераспределение корреспонденций происходит при смене мест работы и жительства, вводе в строй новых транспортных связей и объектов притяжения. Выбор той или иной корреспонденции происходит под действием разнообразных причин экономического и социального характера, важнейшими из которых являются время и комфорт поездки. С другой стороны, высокая стабильность

⁶ Корреспонденция – вещественный обмен, происходящий от элемента i к элементу j транспортной системы в полном цикле законченного процесса перемещения. Таким образом, корреспонденция характеризуется вектором, имеющим координаты начальной и конечной точек и величину нагрузки в количестве пассажиров или объеме груза. При наложении на транспортную сеть корреспонденция получает еще одну характеристику – протяженность.

ность корреспонденций оказывает сильное влияние на пути развития транспортной системы.

Транспортные процессы организуют, чтобы установить функциональные связи для всех видов движения в системе. Вероятностный характер функционирования транспортной системы (заторы, простой и т. п.) приводит к необходимости адаптации участников движения, которая осуществляется за счет корректировки корреспонденций, внесения изменений в графики выполнения работ. Адаптация повышает надежность функционирования всех элементов системы, т. е. способствует живучести организации транспортных процессов.

Корреспонденции представляются на отрезках сети в форме грузовых, пассажирских, транспортных или пешеходных потоков. Экономическая деятельность приводит к образованию устойчивого движения потоков, которое характеризуется определенными вероятностными изменениями в виде закономерностей изменения грузопотоков, интенсивности движения и т. п. С увеличением загрузки элементов транспортной системы общие закономерности становятся более детерминированными, что является следствием большего влияния ограниченной пропускной способности на процессы адаптации. На каждом из выделенных уровней самоорганизации транспортная система характеризуется собственным набором существенных параметров, по которым происходит адаптация субъектов системы.

Описанная структура, разделяющая процессы адаптации по временной стабильности, оказывается весьма существенной при исследовании транспортных систем. Целесообразность такого разделения диктуется резким различием в инерционности процессов на разных уровнях.

Выделение некоторого множества параметров, с достаточной полнотой определяющих объект управления на каждом уровне, задает пространство состояний, в котором может пребывать система. Точка в пространстве состояний, заданная числовыми значениями своих параметров, определяет состояние системы.

С позиции управления рационально все пространство состояний разбить на определенные классы состояний системы, каждому из которых будет соответствовать определенный вид управления.

Множество состояний транспортной системы, когда спрос приближается к пропускной способности, есть область переходного, не-

устойчивого состояния системы. Если негативную тенденцию переломить не удалось, то система переходит в новое состояние – *отказа функционирования*. Особенностью процесса возникновения отказа функционирования системы является высокая скорость приближения к исчерпанию пропускной способности и длительность восстановления равновесия между спросом и производительностью, например, процесс возникновения заторов на дорожной сети, в пунктах погрузки-разгрузки и т. п.

2.3. Транспортные сети

Пространственная структура транспортных систем определяется транспортными сетями. *Транспортной сетью* называется совокупность транспортных связей, по которым осуществляются пассажирские и грузовые перевозки.

Классификация транспортных сетей может быть произведена по разным признакам. Классификация относительно используемых видов транспорта приведена на рис. 2.8. В соответствии с этой классификацией укрупненно транспортные сети можно разбить на три группы. *По кратчайшим направлениям* между пунктами перемещения могут перемещаться лишь немногие виды транспорта. Причем реальные пути их перемещения практически всегда отклоняются от прямолинейных вследствие необходимости обхода запретных районов, суверенных территорий, природных особенностей и т. п. Например, для воздушного транспорта в целях разумного ограничения пролета над иностранной территорией, облета воздушного пространства городов, повышения безопасности прокладываются воздушные коридоры, которые используются для прокладки различных маршрутов.

Естественные пути для перемещения являются наиболее древними транспортными сетями. Главным образом это реки и пригодные для перемещения внедорожных транспортных средств участки земной поверхности.

Основное количество грузов и пассажиров перемещается по *дорогам*. Дороги по особенностям перемещения делятся на рельсовые и безрельсовые. Из рельсовых дорог несколько особенностей стоят монорельсовые дороги не только потому, что они используют один рельс, но и по причине особенностей привода используемых на них транспортных средств, расположения их над или под рельсом и т. п. Среди

безрельсовых дорог можно выделить транспортные сети с направляющим устройством (механическим или бесконтактным), которые получают в последнее время все большее распространение не только в пределах производственных помещений, но и для городского транспорта (например, системы типа Translohr, которые используют трамваи на обычных автомобильных колесах с одним направляющим рельсом).

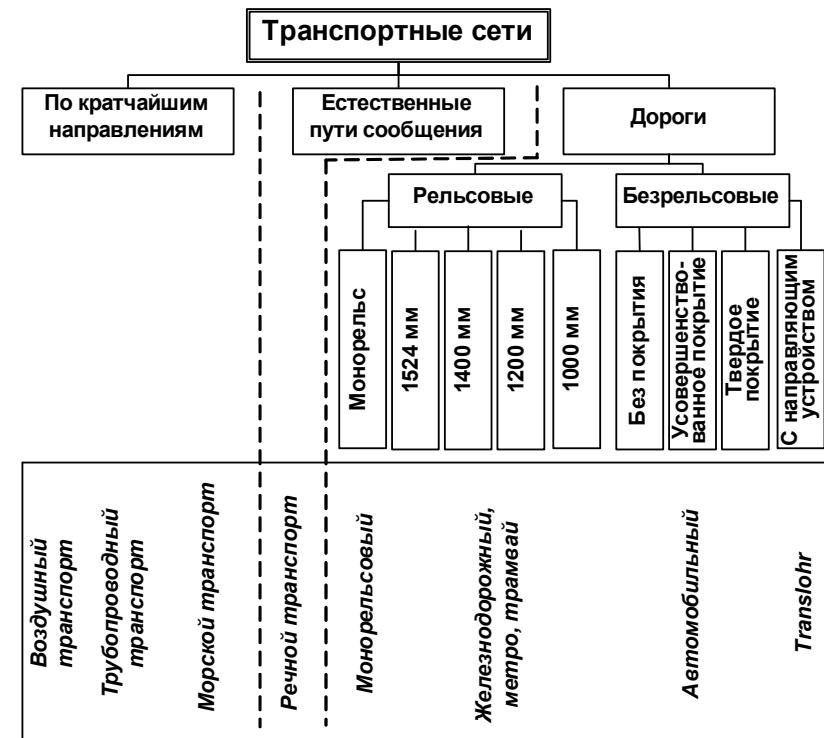


Рис. 2.8. Классификация транспортных сетей по использованию их видами транспорта

Необходимо отметить, что транспортная сеть никогда не соответствует дорожной сети. В зависимости от габаритов и массы груза, параметров используемых транспортных средств транспортная сеть будет тем или иным фрагментом дорожной сети. Например, не по всем улицам города разрешено движение грузовых автомобилей, и в транспортной сети для них эти улицы будут исключены. Не все же-

лезнодорожные пути электрифицированы, причем на некоторых направлениях может использоваться постоянный, а на некоторых – переменный ток и т. д. Таким образом, можно сказать, что отдельные дуги транспортной сети специализируются на пропуске потоков отдельного вида, что приводит к формированию определенных структурных свойств сети.

При проведении исследований из транспортной сети выделяют подсеть, предназначенную для движения определенного вида транспорта. Например, при исследовании пассажирских перевозок в городе выделяют подсети скоростного транспорта, электрического транспорта, пешеходного движения и т. п.

Важнейшей особенностью транспортных сетей является то, что они в общем случае, кроме промышленного транспорта, не входят в транспортную систему, а являются для нее внешней средой. При этом транспортные сети во многом определяют количественные и качественные характеристики работы транспортных систем. В то же время, если мы рассматриваем вопросы, связанные с движением транспортных средств, то транспортные сети включаются в исследуемую транспортную систему.

Городскую транспортную сеть образует совокупность улиц и транспортных проездов, а также подземные, надземные или наземные транспортные линии, которые могут быть не связаны с уличной сетью, например линии метрополитена, эстакадные или обособленные участки трамвайных линий и т. п. Определяющей особенностью городских транспортных сетей является их неразрывная связь с обслуживаемым городом, характеристиками расселения, особенностями застройки, рельефом местности, климатическими особенностями и т. д. Тесная связь между характеристиками транспортной сети и обслуживаемого города определяет присущую городским транспортным сетям индивидуальность, которая влияет на организацию работы транспорта, условия его работы, эффективность и т. п. Это объясняет невозможность избежать индивидуального изучения и оптимизации транспортной сети для конкретного города.

Много особенностей транспортных сетей связано с историей их развития. В исторических городах характеристики транспортных сетей определялись совершенно другими требованиями и достались нам в наследство из предыдущих эпох. Естественно, не всегда есть возможность и рационально модернизировать их под современные требования.

Транспортные сети новых городов планируют так, чтобы создать наиболее эффективные транспортные связи между различными районами и внешним транспортом и обеспечить их пропускную способность на перспективу. В соответствии с этим Строительные Нормы и Правила (СНиП) предусматривают районирование городов и четкую классификацию транспортных связей по назначению и характеристикам.

Основные свойства транспортных сетей определяются их **морфологическими характеристиками** (характеристики формы и строения сети). Для определения морфологических характеристик транспортная сеть представляется в виде графа. Простые конфигурационные части сети называются структурными элементами, а сложные – структурными компонентами. *Структурные элементы* включают замкнутые контуры – *циклы* и линейные элементы – *ветки*. Структурные компоненты слагаются из этих элементов. В зависимости от наличия в сети структурных элементов сети делятся на три типа:

- *древовидные*, состоящие только из веток (рис. 2.9, а);
- *циклические*, включающие и циклы, и ветви (рис. 2.9, б);
- *ячеистые*, состоящие только из циклов (рис. 2.9, в).

Совокупность циклов, в которой у каждого цикла есть хотя бы одно общее ребро с другим циклом, представляет собой *циклический остов*. Древовидная (незамкнутая) структурная компонента называется *дендритом*. Дендриты в зависимости от своего положения относительно циклических компонентов делятся на *соединительные, внутренние и внешние*. Вершина, общая для дендрита и циклического компонента, называется *корнем дендрита*. От корня ведется отсчет значений топологического радиуса дендрита и выделяются топологические ярусы разветвления.

Сложность сети характеризуется числом *топологических ярусов* – замкнутых колец циклов. Ярусы выделяются, начиная с внешней границы остова. Первый ярус выделяется путем кругового обхода всех циклов, примыкающих к внешней границе остова и имеющих хотя бы одну общую вершину с внешней границей. Совокупность циклов в этом внешнем кольце образует первый топологический ярус. Следующий ярус выделяется путем кругового обхода внутренней границы первого яруса и отнесением к нему тех циклов, которые имеют с этой границей хотя бы одну общую вершину.

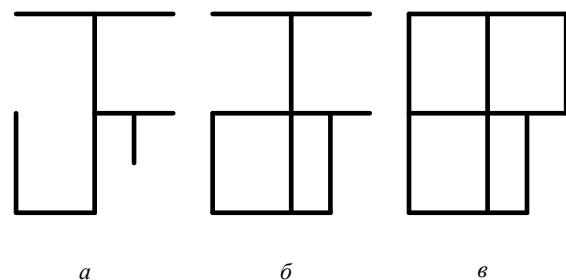


Рис. 2.9. Топологические типы транспортных сетей

Трамвайная сеть Санкт-Петербурга имеет один топологический ярус, т. е. является простейшей транспортной сетью без резервирования (рис. 2.10).

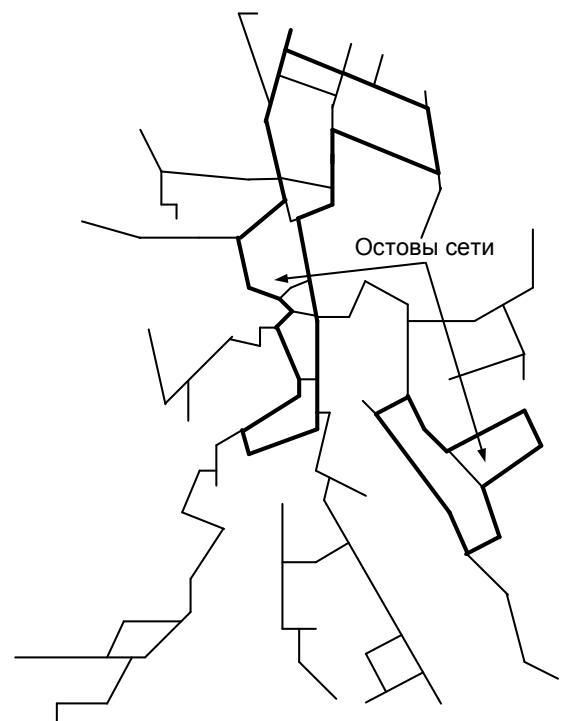


Рис. 2.10. Транспортная сеть трамвая в Санкт-Петербурге

Наибольшей надежностью отличаются сети с большим количеством циклов, так как в этом случае всегда имеется возможность использовать следующий элемент сети вместо элемента, вышедшего из строя. Сеть трамвая в Санкт-Петербурге имеет всего два циклических остова: один в центральной и северной частях города (от пересечения Садовой ул. с Лермонтовским пр. до пр. Просвещения), второй в восточной (Невский район). При этом если первый циклический остов включает 8 циклов, то второй – всего два. Это значит, что основная часть сети состоит из дендритов или веток. На таких участках выход из строя любого из них разрывает сеть.

В Санкт-Петербурге несколько сглаживает ситуацию самодостаточность дендритов. Все три дендрита на юге города обслуживаются собственными трамвайными парками. В восточной части города сеть дублируется двумя связями с трамвайными парками № 3 и 7. Район Веселого Поселка обслуживается циклом. А вот район Ржевка-Порожевые имеет развитый дендрит с критическим участком на Ириновском пр. Разрыв этого участка лишает возможности транспортного обслуживания всего района. В центральной части города высокий риск разрыва связей имеет трамвайный дендрит Васильевского острова, имеющий единственную связь с общей сетью по Кронверкскому пр. На северо-западе критическими являются связи по ул. Савушкина и пр. Испытателей. Наиболее благополучная ситуация с надежностью сети наблюдается в северной части города.

Кардинальным методом повышения надежности транспортной сети является строительство участков для образования циклов.

Модель транспортной сети может быть представлена в виде графа. Граф – это фигура, состоящая из точек (вершин) и соединяющих их отрезков (звеньев). Вершины графа – это точки на сети, наиболее важные для определения расстояний или маршрутов движения. Звенья графа – это отрезки транспортной сети, характеризующие наличие дорожной связи между соседними вершинами. Звенья графа характеризуются числами, которые могут иметь различный физический смысл. Чаще всего это расстояние, но может использоваться, например, и время движения. Ориентированные по направлению звенья графа называются дугами. Фактически всякое неориентированное звено графа включает в себя две равноценные, но противоположно направленные дуги. В зависимости от того, все или часть звеньев имеют направление, граф является ориентированным или смешанным.

Граф, каждая вершина которого может быть соединена некоторой последовательностью звеньев с любой его другой вершиной, называется *связанным графом*. Иначе говоря, каждая вершина связанного графа должна иметь как минимум одну входящую и одну выходящую дугу. Граф, моделирующий транспортную сеть, обязательно должен быть связанным, чтобы всегда был путь из любой вершины в любую другую вершину. Числа, характеризующие звенья такого графа, обычно выражают протяженность пути, время или стоимость проезда.

Для моделирования транспортной сети необходимо иметь:

- картографический материал; обычно это карты крупного масштаба, так как они позволяют с большой точностью делать замеры расстояний между пунктами;
- сведения о размещении основных объектов транспортной системы и ее среды (в зависимости от решаемой задачи: грузообразующие и грузопоглощающие предприятия, жилые массивы, места приложения труда и т. п.);
- дополнительные сведения из коммунальных и дорожных организаций в виде перечня улиц с характеристикой их проезжей части;
- сведения по организации дорожного движения, т. е. схемы организации движения на перекрестках, площадях и транспортных развязках, а также сведения о различных ограничениях движения, связанных с установленными дорожными знаками.

Основной проблемой при моделировании транспортной сети является выбор уровня детализации. Здесь приходится искать компромисс между точностью и затратами на исследования. Вероятно, 100 %-ная точность будет обеспечена, если мы учтем индивидуально маршруты поездок всех пользователей в течение всех дней в году. В то же время очевидна излишняя детализация такого подхода, так как во многих случаях будут совпадать точки отправления (остановочные пункты, гарики, склады), точки прибытия и маршруты следования. В аспекте времени тоже будет проявляться общность поведения пользователей. Для преодоления этих противоречий используется транспортное зонирование.

Транспортное зонирование – это способ агрегирования индивидуальных потребностей пользователей в использовании транспортной сети для целей моделирования. Транспортное зонирование имеет две взаимосвязанные характеристики: количество зон, описывающих сеть,

и их размер. Чем больше зон, тем соответственно меньше размер транспортных зон, которыми будет описываться транспортная сеть. Как правило, для решения разных задач используется транспортное зонирование с различным количеством зон. При решении стратегических задач транспортного планирования используется меньшее количество зон, каждая зона покрывает достаточно большую площадь, например несколько жилых кварталов. При анализе конкретных транспортных проблем используют большое количество небольших по размеру зон для детализации ситуации на сети.

Участки транспортной сети, не относящиеся к изучаемому региону, делят на *внешние транспортные зоны*. Их необходимость определяется наличием внешних транспортных связей с изучаемым регионом. Размер внешней зоны принимают в зависимости от расположения в ней основных объектов тяготения для транспорта, выезжающего или въезжающего в изучаемый регион. Например, это может быть станция метро, вокзал, крупный терминал и т. п.

Изучаемый регион делится на *внутренние транспортные зоны*, размер и количество которых зависят от многих факторов. Например, для стратегических транспортных исследований Лондона его территории площадью 1700 км² с населением 7,6 млн человек была разбита на 1 тыс. зон, а затем в процессе исследований они были объединены в 52 зоны (при исследовании перемещений на уровне 33 административных округов). При переходе на уровень исследования внутрирайонных связей на уровне города, наоборот, количество зон увеличилось до 2252 и в дальнейшем в свою очередь эти зоны делились на *подзоны* для детализации ситуации с дорожным движением.

Для удобства исследований зоны обычно разделяют на *селитебные*, в которых в основном проживает население, и *промышленные*, которые покрывают территории с производственными объектами.

Все атрибуты зоны условно привязывают к одной точке, которую называют *центром зоны* и которая не имеет физического аналога на местности. Центр зоны имеет с транспортной сетью *условную связь*, которая представляет средние затраты времени или среднее расстояние для приывающих или выезжающих из зоны автомобилей (жителей) относительно узла транспортной сети, к которому эта условная связь «привязывает» центр зоны.

При выполнении транспортного зонирования следует придерживаться следующих правил:

1. Внутри зоны должна обеспечиваться транспортная и пешеходная доступность территории.

2. При начертании границ зон необходимо использовать естественные препятствия в виде рек, железных дорог и т. п. Если есть возможность, границы зон удобно совмещать с какими-либо административными границами, например границами муниципальных образований, выборных участков и т. д. Это облегчает использование статистической информации. Границы зон не могут проходить по автомобильным дорогам и проводятся по возможности перпендикулярно им.

3. Зона должна включать (по возможности) территорию одного назначения: жилую, промышленную, рекреационную и т. п.

4. Площадь зон, как правило, коррелирует со скоростью перемещения. Чем выше скорость, тем больше площадь зоны и наоборот.

Имея эти данные, моделирование транспортной сети начинают с размещения вершин графа. За вершины графа принимают объекты транспортной системы, центры крупных жилых кварталов или небольших обособленных жилых пунктов и пересечения улиц. Каждой вершине присваивается порядковый номер или другое условное обозначение. После размещения вершин их связывают дугами или звенями, образуя направленный граф.

Пример представления транспортной сети приведен на рис. 2.11. Треугольниками отмечены центры зон, окружностями – узлы транспортной сети. Зоны 7 и 8 являются внешними к изучаемой территории.

При построении модели транспортной сети особое внимание следует уделить максимально возможному уменьшению числа вершин. В противном случае транспортная сеть будет излишне сложна и определение кратчайших расстояний потребует длительного времени. С целью снижения размерности и ускорения расчетов для транспортных сетей больших городов используется микро- и макрорайонирование.

Микрорайонирование транспортной сети заключается в использовании в качестве вершин не пересечений дорожной сети (перекрестков), а центров транспортных микрорайонов.

Макрорайонирование (агрегирование) транспортной сети заключается в разбиении ее на отдельные подсети, расчеты по которым могут выполняться отдельно, а затем объединяться для получения обще-

го результата. Этот способ особенно эффективен при пересчете расстояний из-за изменения дорожной обстановки, так как требуется пересчет только той подсети, в которой изменились транспортные связи.

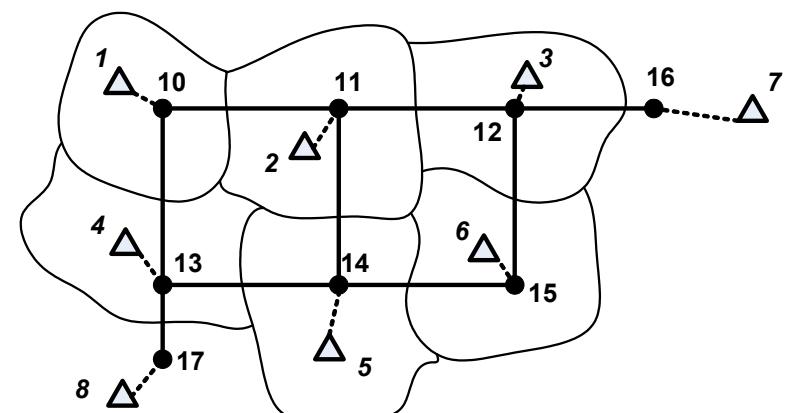


Рис. 2.11. Модельное представление транспортной сети

Уровень обслуживания определенного района транспортной сетью характеризуется таким показателем, как плотность. Плотность транспортной сети определяют отношением ее протяженности к площади обслуживаемого района:

$$\delta = L_c / F.$$

Если речь идет о пассажирском транспорте, то в качестве площади района берется только селитебная площадь (площадь жилой застройки).

Плотность транспортной сети характеризует ее доступность для обслуживаемого объекта независимо от ее топологии. Например, для пассажирского транспорта средняя пешеходная доступность транспортной линии связана с плотностью сети эмпирической формулой Зильберталя

$$l_{\text{п.д.т.л}} = 1/(3\delta).$$

Этот показатель не следует путать с пешеходной доступностью остановочного пункта, которая помимо плотности сети зависит также

и от расстояния между остановочными пунктами и обычно определяется по следующей зависимости:

$$l_{\text{п.д.о.п}} = k_{\text{пп}} k_{\text{в}} [1/(3\delta) + l_{\text{п}}/4],$$

где $k_{\text{пп}}$ – коэффициент непрямoliniейности подхода к остановочному пункту – обычно принимается 1,2; $k_{\text{в}}$ – коэффициент выбора остановочного пункта, учитывающий время пешеходного перемещения в общих затратах времени на поездку; $k_{\text{в}} = 1 + v_{\text{пеш}}/v_c$; $l_{\text{п}}$ – средняя длина перегона между остановочными пунктами; $v_{\text{пеш}}$ – скорость передвижения пешком; v_c – скорость сообщения.

Пешеходная доступность остановочных пунктов нормируется градостроительными нормативами.

Населенность зоны пешеходной доступности транспортных линий определяется отношением количества жителей, проживающих в зоне пешеходной доступности, к общему количеству жителей.

Коэффициент охвата сети – это отношение протяженности транспортной сети к общей протяженности городской уличной сети.

Емкость транспортной сети определяется максимальным количеством транспортных средств, которое может находиться на ней одновременно. Она характеризует не только протяженность, но и рядность входящих в сеть дорог.

Пропускная способность всей транспортной сети, в отличие от отдельных ее элементов, не имеет до сих пор единого критерия оценки. Специалисты придерживаются различных критериев оценки этого показателя. В их работах пропускная способность транспортной сети оценивается по ее плотности, емкости, суммарной пропускной способности входных дорог относительно площади обслуживаемого района, условию возникновения затора на любом отрезке сети и т. д.

Наиболее объективную оценку пропускной способности транспортной сети можно получить на основе *теории графов*. Такая оценка основана на понятиях максимального потока и минимального сечения (разреза) транспортной сети. Пропускная способность сечения оценивается как сумма пропускной способности всех проходящих через него дуг графа транспортной сети. Распределение потока по дугам графа может быть жестким или выполнено по каким-либо алгоритмам, например по критерию кратчайшего расстояния. Оценка пропускной спо-

собности выполняется с помощью математического моделирования.

Задача о максимальном потоке может быть сформулирована следующим образом: два узла соединены транспортной сетью; каждому ее ребру соответствует определенная пропускная способность (по числу транспортных единиц, объему груза или количеству пассажиров). Требуется найти максимальный поток, который можно пропустить по сети из одного пункта, называемого *источником* s , в другой, называемый *стоком* S .

Пропускная способность ребра определяется максимальным количеством груза r_{ij} (или чего-то иного), которое может пропустить за единицу времени данное ребро. Количество груза, проходящего через ребро в единицу времени, называется *потоком по ребру* q_{ij} . Если поток по ребру меньше его пропускной способности, то ребро называют *ненасыщенным*, в случае равенства – *насыщенным*.

Совокупность потоков по всем ребрам $Q = \{q_{ij}\}$ называется *потоком по сети*. Для любой вершины, кроме истока и стока, количество груза, поступающего в эту вершину, равно количеству груза, выходящего из него. Это ограничение является *условием сохранения потока*. В промежуточных вершинах потоки не исчезают и не создаются. Как следствие, общее количество груза, выходящего из источника, совпадает с общим количеством груза, поступающего в сток. Это количество груза называется *мощностью потока на сети*.

Таким образом, если множество M задается системой линейных неравенств

$$M = \{q_{ij} : q_{ij} = -q_{ji}, \quad q_{ij} \leq r_{ij}, \quad i, j \in \overline{1, N}, \quad \sum_{j=1}^N q_{ij} = 0, \quad i \neq s, S\},$$

а $f(x) = \sum_{j=1}^N x_{sj}$, то задача максимизации $f(x)$ на M называется задачей о максимальном потоке в сети, имеющей N узлов.

Наиболее просто задача о максимальном потоке решается, когда сеть плоская, т. е. тогда, когда две ее вершины можно соединить ребром, не пересекая других ребер.

Задачу о максимальном потоке можно решить методом деревьев. Последовательность решения можно рассмотреть на конкретном примере. Так, требуется найти максимальный поток от вершины A до вершины F (рис. 2.12, а). Предполагается, что ребра сети допускают двух-

стороннее движение и их пропускная способность в обоих направлениях одинакова.

Вся сеть произвольно разбивается на два дерева. В одном должен находиться источник A , а в другом – сток F . Разбиение сети на деревья основывается на теореме Форда – Фалкерсона: на любой сети максимальная величина потока из источника s в сток S равна минимальной пропускной способности разреза, отделяющего s от S .

На рис. 2.12, б одно дерево состоит из четырех ребер: AB, AC, AD, CE , а другое – из одной вершины F .

Для пропуска потока необходимо два дерева соединить одним из возможных ребер, например EF , по которому можно пропустить насыщенный поток q_1 . Величина q_1 равна минимальной пропускной способности одного из ребер. На рис. 2.12, б таких ребер два: CE и EF . Пропускаем поток, равный 1, по маршруту $A-C-E-F$. После этого одно из ребер (выбираем EF) исключаем из сети.

Сеть опять разорвалась на два дерева. Соединим их ребром DF , по которому можно пропустить насыщенный поток q_2 . Его размер, определяемый минимальной пропускной способностью ребер маршрута $A-D-F$, равен 2 (рис. 2.12, в). Пропускаем этот поток и исключаем из сети ребро DF .

На рис. 2.12, г таким же образом пропускаем поток $q_3 = 1$ (часть пропускной способности ребра AC использована в первом маршруте) по ребрам $A-C-F$ и исключаем из сети ребро AC .

На рис. 2.12, д сеть состоит из двух деревьев: с вершинами A, B, D и с вершинами C, E, F . Эти два дерева соединяют ребром AE и определяем дополнительный поток q_4 , который можно пропустить от источника к стоку. На ребре CE он пойдет навстречу уже существующему потоку, поэтому его размер надо вычесть из ранее распределенного на это ребро потока. Поток q_4 равен 1 (рис. 2.12, е). На ребре поток становится равным 0. Теперь по этому же маршруту можно пропустить поток q_5 . Его величина определяется пропускной способностью ребра CE и равна 1.

На рис. 2.12, жс показан дополнительный поток q_6 , равный 2, а на рис. 2.12, з максимальный поток по сети, равный 8.

Задача поиска кратчайшего пути является основой для задач маршрутизации грузового и пассажирского транспорта. Поскольку ребрам сети можно приписать значения расстояния, стоимости или времени

поездки, одинаково просто найти кратчайшие расстояния, наименьшую стоимость или время поездки от одной вершины до всех остальных. Существует множество методов решения задачи о кратчайшем пути. Один из наиболее простых – метод потенциалов (метод Минти).

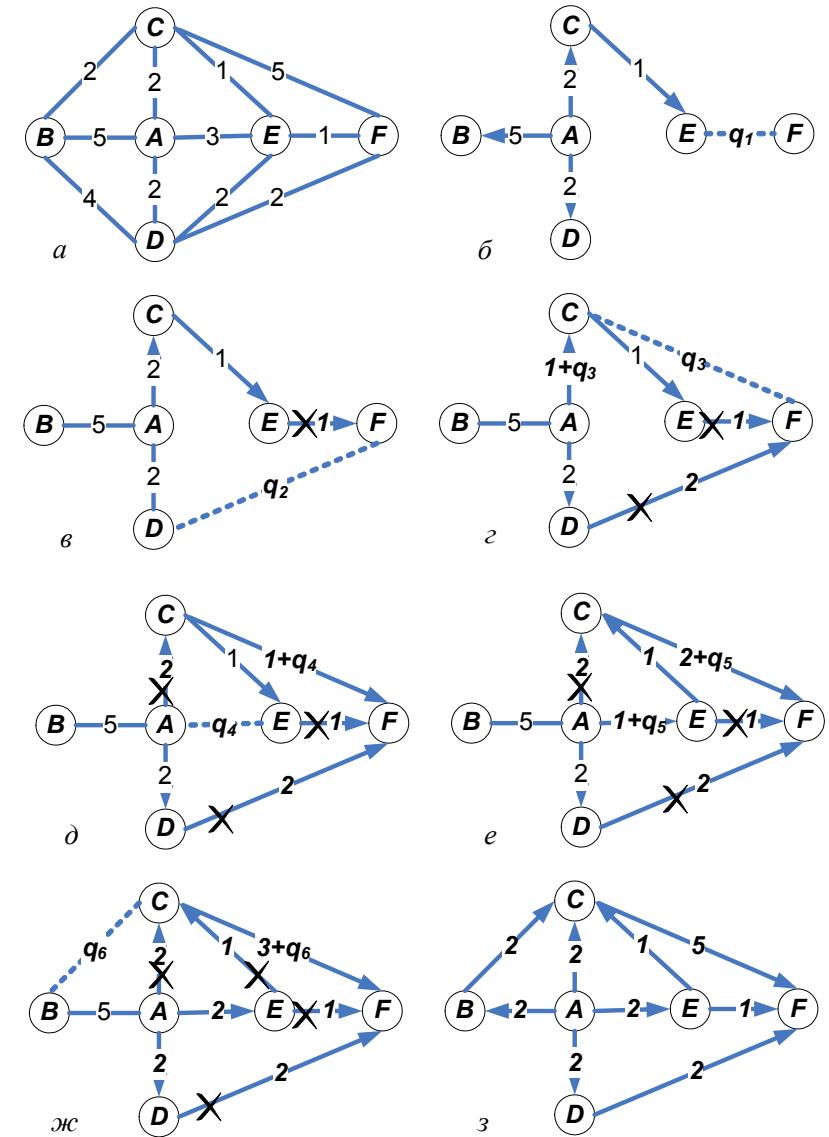


Рис. 2.12. Последовательность решения задачи о максимальном потоке

Построим дерево кратчайших расстояний от вершины A до всех остальных для сети, представленной на рис. 2.13. На первом шаге присвоим начальной вершине потенциал 0. Просмотрим все ребра, начальные вершины которых имеют потенциалы, а конечные – нет. Определим потенциалы конечных вершин как сумму потенциала начальной и расстояния от начальной до конечной вершины. Выберем конечную вершину с наименьшим потенциалом и отметим звено стрелкой. Второй шаг повторяем до тех пор, пока всем вершинам не будут присвоены потенциалы.

В нашем примере начальная вершина A , присваиваем ей потенциал 0. На втором шаге необходимо сравнить две величины: $0 + 3 = 3$ и $0 + 5 = 5$. Выбираем наименьшую, присваиваем вершине B потенциал 3 и отмечаем ребро AB стрелкой. Повторяя второй шаг. Сравниваем три числа: $3 + 18 = 21$, $3 + 8 = 11$, $0 + 5 = 5$. Наименьшее из них – потенциал вершины C . Продолжая процесс, получим потенциалы всех вершин. Ребра со стрелками образуют дерево кратчайшего пути.

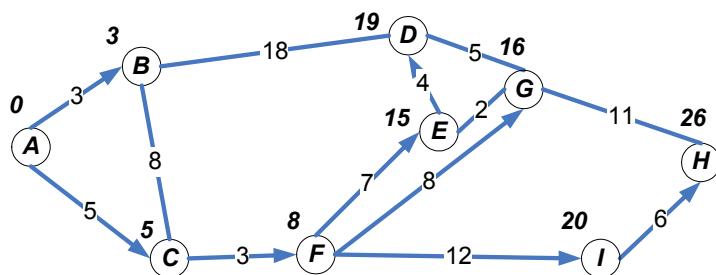


Рис. 2.13. Построение дерева кратчайших путей

Для **маршрутного транспорта** рассчитываются пропускные способности полосы движения, регулируемого перекрестка и остановочного пункта.

Пропускная способность полосы движения оценивается по допустимому из соображений безопасности интервалу между транспортными средствами. Минимальный интервал движения между транспортными средствами должен быть таким, чтобы в случае остановки впереди идущего транспортного средства следующий за ним мог своевременно остановиться, т. е. было исключено столкновение транспортных средств.

Мгновенное значение скорости задается первой производной расстояния перемещения по времени

$$v = dl/dt.$$

Ускорение (или замедление) определяется второй производной расстояния или первой производной скорости по времени:

$$a = dv/dt.$$

Применяя цепную подстановку, получаем:

$$a = \frac{dv}{dl} \left(\frac{dl}{dt} \right) = \left(\frac{dv}{dl} \right) v.$$

Преобразовывая выражение, получаем:

$$vdv = adl, \text{ или } v^2/2 = al,$$

откуда при постоянной величине замедления длина тормозного пути следующего первым транспортного средства $l_1 = v^2/2a_1$.

С учетом времени реакции водителя, следующего за первым начавшим торможение транспортным средством, длина его тормозного пути

$$l_2 = vt_p + v^2/2a_2.$$

С другой стороны, исходя из первоначального расстояния между транспортными средствами l , длины транспортного средства l_n и безопасного расстояния между ними после остановки l_6 необходимая пролежненность тормозного пути

$$l_2 = l + l_1 - l_n - l_6.$$

Отсюда минимально необходимое расстояние между транспортными средствами

$$l_{\min} = vt_p + v^2/2a_2 - v^2/2a_1 + l_n + l_6,$$

где t_p – время реакции водителя (в расчетах принимают обычно от 1 до 1,5 с).

Схема для понимания процесса торможения двух транспортных средств, следующих друг за другом, приведена на рис. 2.14.

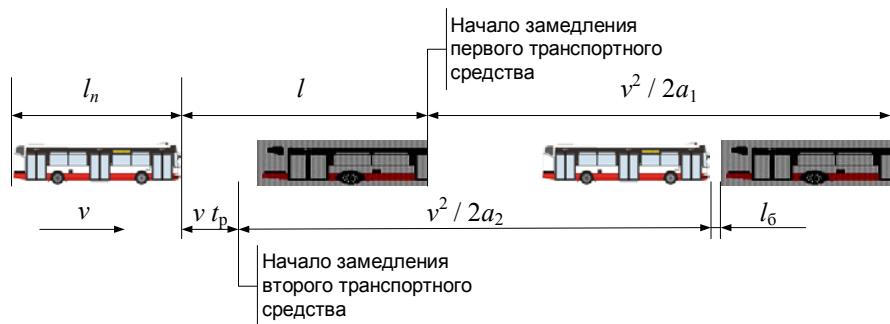


Рис. 2.14. Схема замедления двух транспортных средств

Анализируя процесс замедления, можно выделить три заслуживающих особого внимания величины, в зависимости от сочетания которых в процессе остановки двух транспортных средств выделяют 5 уровней безопасности, представленных в табл. 2.2:

- комфортабельное (нормальное) замедление – a_h ;
- экстренное торможение – a_s ;
- мгновенную остановку (например, при аварии) – a_m ($a_m = \infty$).

Таблица 2.2

Уровни безопасности при движении транспортных средств

Уровень безопасности	Замедление первого транспортного средства	Замедление второго транспортного средства
<i>A</i>	a_m	a_h
<i>B</i>	a_s	a_h
<i>V</i>	a_m	a_s
<i>G</i>	a_h	a_h
<i>D</i>	Без торможения	Без торможения

На рис. 2.15 в качестве примера приведены зависимости, которые показывают изменение минимально необходимого расстояния между автобусами ЛиАЗ-6213 ($l_n = 18$ м, $l_6 = 1$ м) при различном значении

скорости для приведенных в табл. 2.2 уровней безопасности. Значения замедления в этом примере следующие: $a_h = 1,4 \text{ м/с}^2$, $a_s = 4 \text{ м/с}^2$.

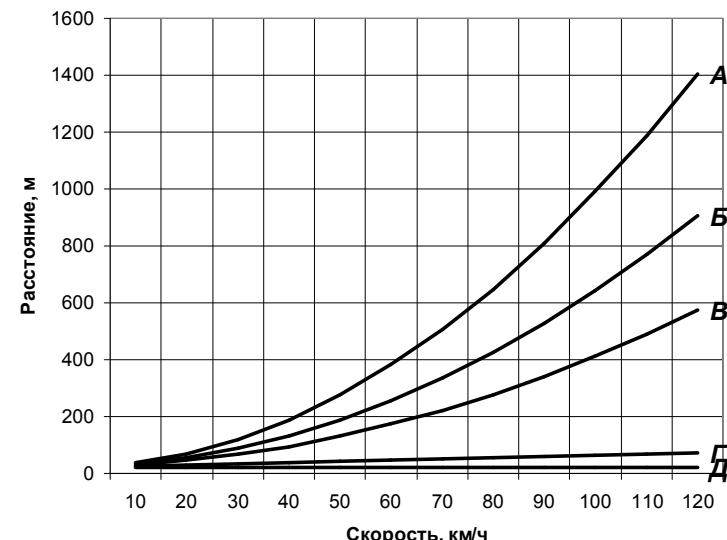


Рис. 2.15. Минимально необходимое расстояние между транспортными средствами в зависимости от скорости движения и уровня безопасности

Очевидно, что наиболее безопасный уровень *A* мало применим на практике как из-за психологии водителя, так и из-за соображений пропускной способности дороги, однако может использоваться при особых режимах перевозок. Уровень безопасности *B* наиболее близок к практике и является минимально допустимым для обеспечения безопасности дорожного движения. Уровень *D* на графике приведен для сравнения, однако стоит отметить, что зачастую водители выбирают именно такое расстояние при движении даже с высокой скоростью, что и является основной причиной попутных столкновений.

Основываясь на минимально необходимом расстоянии между транспортными средствами, делением на v можно определить минимально необходимый интервал между ними:

$$I_{\min} = t_p + v/2a_2 - v/2a_1 + (l_n + l_6)/v.$$

Для уровня безопасности B $a_1 = \infty$ и выражение можно упростить:

$$I_{\min} = t_p + v/2a_s + (l_n + l_o)/v.$$

Пропускная способность, определяемая для колонного движения транспортных средств с минимальными интервалами,

$$\begin{aligned} P_m &= 3600/I_{\min} = 3600/(t_p + v/(2a_s) + (l_n + l_o)/v) = \\ &= 3600v[v t_p + v^2/(2a_s) + (l_n + l_o)]. \end{aligned}$$

Выражение показывает, что пропускная способность P_m является функцией скорости движения транспортных средств. При $v = 0$ и $v = \infty$ получим $P_m = 0$. Следовательно $P_m(v)$ имеет максимальное значение в точке, в которой производная $dI_{\min}/dv = 0$. Тогда скорость, обеспечивающая максимальную пропускную способность,

$$v_{opt} = [2a_s(l_n + l_o)]^{1/2}.$$

Зависимость $P_m(v)$ показывает, что с ростом скорости транспортного потока пропускная способность полосы движения сначала монотонно возрастает, достигая максимума при $v = v_{opt}$, и при дальнейшем росте скорости падает. Это связано с тем, что с ростом скорости движения прогрессивно растет требующийся интервал движения между транспортными средствами I_{\min} и транспортный поток растягивается по длине полосы.

Скорость v_{opt} зависит только от длины транспортного средства, его тормозного замедления и принятого зазора безопасности между транспортными средствами. Например, для автобуса ЛиАЗ-6213

$$v_{opt} = [2 \cdot 4(18 + 1)]^{1/2} = 12,3 \text{ м/с} = 44 \text{ км/ч.}$$

Соответствующая этой скорости максимальная пропускная способность полосы движения

$$P_m = 3600/[1,5 + 12,3/(2 \cdot 4) + (18 + 1)/12,3] = 784 \text{ авт./ч.}$$

Некоторые сравнительные характеристики различных видов маршрутного транспорта приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Сравнительные характеристики маршрутных транспортных средств

Показатели	Виды транспорта				
	Автобус	Сочлененный автобус	Четырехосный трамвай	Шестиосный трамвай	Поезд метро
Количество транспортных средств в составе	1	1	1	1	6
Длина, м	12	18	15	22,5	18
Вместимость, пасс.	110	175	165	250	145
Расстояние безопасности, м	1	1	2	2	2
Время реакции водителя, с	1	1	1	1	0
Нормальное замедление, м/с^2	1,5	1,5	1,2	1,2	1,1
Экстренное замедление, м/с^2	4,0	4,0	3,0	3,0	1,8
Максимальная скорость, км/ч	90	80	70	90	100
Эксплуатационный режим безопасности	Б	Б	Б	Б	А
Типичная модель	ЛиАЗ-5256	ЛиАЗ-6213	ЛВС-2008 (71-153)	ЛВС-2005 (71-152)	Мюнхенское метро

На регулируемых пересечениях пропускная способность определяется, в основном, параметрами светофорного регулирования:

$$P_{np} = (3600/T_u)(t_3/t_n),$$

где T_u – продолжительность цикла светофорного регулирования, с; t_3 – продолжительность разрешенной фазы для рассматриваемого направления движения, с; t_n – интервал между следующими через перекресток маршрутными транспортными средствами, с.

Если принять наиболее распространенные значения переменных, то пропускная способность условного перекрестка для автобусов ЛиАЗ-6213, двигающихся по выделенной полосе,

$$P_{np} = (3600/90)(40/6) = 266 \text{ авт./ч.}$$

Пример подтверждает, что в городских условиях основным ограничивающим пропускную способность дороги фактором являются пересечения. При этом, чем сложнее структура цикла светофора (используется большее количество фаз) и меньше длительность цикла, тем меньше значение имеет время t_3 и, следовательно, меньше пропускная способность перекрестка.

При расчете пропускной способности остановочного пункта будем исходить из того, что она будет максимальной, если транспортное средство подходит к остановочному пункту со скоростью v на величину зазора безопасности $l_b = l_n$ в момент, когда предыдущее транспортное средство отходит от остановки на величину пути, равную своей длине l_n . На пути l_n транспортное средство затормаживается и останавливается у остановочного знака.

Минимальный интервал времени между транспортными средствами, проходящими остановочный пункт, будет определяться следующим образом:

$$I_{\min \text{ о.п.}} = t_t + t_{o.d} + t_{\pi.b} + t_{z.d} + t_{osc},$$

где t_t – время торможения, с; $t_{o.d}$ – время, затрачиваемое на открывание дверей транспортного средства (по опытным данным $t_{o.d} = 1,5–2$ с), с; $t_{\pi.b}$ – время на пассажирообмен, с; $t_{z.d}$ – время, затрачиваемое на закрывание дверей транспортного средства после посадки-высадки пассажиров ($t_{z.d} = 2–3$ с), с; t_{osc} – время на освобождение остановочного пункта, с.

Время торможения на пути $l_n = 0,5a_t t_t^2$ со служебным замедлением a_t при равнозамедленном движении будет

$$t_t = [(2l_n)/a_t]^{1/2} = [(2 \cdot 17,99)/1,5]^{1/2} = 4,9 \text{ с.}$$

Время, затрачиваемое на освобождение остановочного пункта (разгон на пути l_n со служебным ускорением a_n):

$$t_{osc} = [(2l_n)/a_n]^{1/2} = [(2 \cdot 17,99)/1,5]^{1/2} = 4,9 \text{ с.}$$

Время на пассажирообмен, затрачиваемое на посадку и высадку пассажиров исходя из того, что на остановке входят и выходят 10 % пассажиров относительно расчетной вместимости автобуса,

$$t_{\pi.b} = (k_{\pi.b} k_{n.d} k_k q_p t_{\text{пасс}})/n_d = (0,1 \cdot 0,9 \cdot 0,5 \cdot 175 \cdot 2)/4 = 4,0 \text{ с,}$$

где $k_{\pi.b}$ – доля входящих и выходящих пассажиров на остановке от расчетной вместимости автобуса; $k_{n.d}$ – коэффициент неравномерности посадки и высадки пассажиров по дверям автобуса; k_k – коэффициент, учитывающий влияние на время посадки и высадки пассажиров конструктивных особенностей автобуса (высота над посадочной площадкой пола салона, ширина дверей и т. п.); q_p – расчетная вместимость подвижного состава; $t_{\text{пасс}}$ – время посадки или высадки одного пассажира; n_d – количество дверей.

Таким образом, минимальный интервал времени между автобусами ЛиАЗ-6213, проходящими остановочный пункт,

$$I_{\min \text{ о.п.}} = 4,9 + 1,7 + 4,0 + 2,5 + 4,9 = 18,0 \text{ с.}$$

Пропускная способность остановочного пункта будет определяться исходя из минимального интервала движения транспортных средств, проходящих через остановочный пункт:

$$P_{\text{о.п.}} = 3600/I_{\min \text{ о.п.}} = 3600/18 = 200 \text{ авт./ч.}$$

Приведенный расчет показывает, что пропускная способность остановочного пункта намного ниже пропускной способности транспортной линии при безостановочном движении транспортных средств с оптимальной скоростью. При этом фактическая пропускная способность остановочного пункта вследствие различных сбоев в движении до 20 % ниже, чем рассчитанная по приведенной методике, т. е. составляет для данного примера около 160 авт./ч.

Адаптация расчетных методик, используемых за рубежом, для российских условий показала, что в них учитывается большее количество условий⁷. Так, в США для расчета пропускной способности остановочного пункта используется следующая формула, которая для рассматриваемого примера дает достаточно близкий результат:

⁷ Головных И. М., Зедгенизов А. В. Совершенствование нормативного обеспечения методики расчета пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сборник докладов восьмой международной научно-практической конференции. СПб.: СПбГАСУ, 2008. С. 176–183.

$$P_{\text{оп}} = 3600(t_3/T_{\text{ц}})/[t_{\text{осв}} + t_{\text{п.в.}}(t_3/T_{\text{ц}}) + Z_a C_v t_{\text{п.в.}}] = \\ = 3600(40/90)/[4,9 + 4(40/90) + 1,28 \cdot 0,54 \cdot 4] = 169 \text{ авт./ч},$$

где Z_a – коэффициент вероятности занятости остановочного пункта предыдущим автобусом (этую вероятность принимаем равной 10 %); C_v – коэффициент вариации времени на пассажирообмен.

Таким образом, расчетная пропускная способность остановочного пункта при большой интенсивности движения, когда на отдельных участках линий совпадает несколько маршрутов, как правило, является ограничивающим фактором при планировании маршрутной сети.

Основным назначением транспортной сети в транспортной системе является обеспечение перемещения транспортных средств. Упорядоченное транспортной сетью движение транспортных средств называют *транспортным потоком*, перемещение пассажиров и грузов – соответственно *пассажиропотоком* и *грузопотоком*, движение пешеходов – *пешеходным потоком*.

Для характеристики транспортных потоков используются следующие основные показатели: интенсивность движения, временной интервал, плотность движения, скорость.

Интенсивностью движения называют количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги в определенном направлении или направлениях в единицу времени:

$$N_a = n_a / t.$$

Интенсивность движения, приходящуюся на одну полосу дороги, называют *удельной интенсивностью движения*. В смешанном потоке автомобилей транспортные средства разного типа занимают различную площадь дороги, имеют разные динамические характеристики, поэтому для сопоставимости оценок количества транспортных средств определенного типа приводят к легковому автомобилю с помощью коэффициентов приведения. Таким образом получают *приведенную интенсивность движения*:

$$N_{\text{пр}} = \sum_n (N_{ai} K_{\text{пр}i})$$

где N_{ai} – интенсивность движения автомобилей данного типа; $K_{\text{пр}i}$ – соответствующие коэффициенты приведения для данной группы автомобилей; n – число типов автомобилей, на которые разделены данные наблюдений.

Именно приведенное значение $N_{\text{пр}}$ используется в расчетах транспортных потоков и дорог. Промежуток времени (час, сутки, год), за который определяется интенсивность движения, зависит от цели исследования. Необходимо учитывать, что интенсивность движения характеризуется значительными колебаниями как по времени суток, дням недели и времени года, так и по участкам улично-дорожной сети.

Коэффициентом загрузки дороги (полосы) называется отношение интенсивности транспортного потока к пропускной способности дороги

$$z = N_{\phi} / P_{\phi},$$

где N_{ϕ} – существующая интенсивность движения; P_{ϕ} – пропускная способность дороги.

Для обеспечения бесперебойного движения необходим резерв пропускной способности, и поэтому принято считать допустимым $z \leq 0,85$. Если он выше, то данный участок следует считать перегруженным.

Для маршрутных пассажирских перевозок или линейных грузовых величин, обратная интенсивности движения, определяет *временной интервал* между транспортными средствами:

$$t_u = 1/N_a.$$

Плотность транспортного потока является пространственной характеристикой, определяющей степень стесненности движения на полосе дороги. Ее измеряют числом транспортных средств, приходящихся на 1 км протяженности дороги. Предельная плотность достигается при неподвижном состоянии колонны автомобилей, расположенных вплотную друг к другу на полосе. Предельное значение q_{\max} составляет 170–200 авт./км в зависимости от состава потока.

При разных значениях плотности движения могут складываться разные уровни эксплуатационных условий по степени стесненности.

В зависимости от плотности потока движение по степени стесненности подразделяют на *свободное, частично связанное, насыщенное и колонное*.

Численные значения q_a в физических единицах (автомобилях), соответствующих этим состояниям потока, весьма существенно зависят от параметров дороги и в первую очередь от ее плана и профиля, коэффициента сцепления, а также от состава потока по типам транспортных средств, что в свою очередь влияет на выбиралую водителями скорость.

Скорость движения является важнейшим показателем транспортного потока, так как определяет эффективность транспортной сети.

Следует различать различные характеристики скорости. В зависимости от методов измерения и расчета различают указанные далее разновидности скорости.

Мгновенная скорость v_a фиксируется в отдельных типичных сечениях (точках) дороги и в значительной степени влияет на безопасность движения. Она определяет кинетическую энергию автомобиля, т. е. его тормозной путь и время, которое есть у водителя для оценки опасной ситуации.

Максимальная скорость v_m – наибольшая мгновенная скорость, которую может достигнуть транспортное средство. Для дорожного движения большое значение имеет максимальная скорость транспортного средства, которая ниже разрешенной. Такие транспортные средства становятся препятствием для нормального движения транспортного потока.

Крейсерская скорость v_k – скорость, с которой водитель стремится ехать в данных условиях. Если поток движется более медленно или более быстро, водитель испытывает дискомфорт. В зависимости от типа личности водитель быстрее ощущает усталость, становится невнимательным или раздраженным.

Разрешенная скорость $v_{\text{раз}}$ – скорость, разрешенная на данном участке дороги нормативными документами или средствами регулирования дорожного движения.

Рекомендуемая скорость $v_{\text{рек}}$ – скорость, с которой рекомендуется двигаться водителю и которая обеспечивает безопасность дорожного движения в данных условиях.

Безопасная скорость v_b – скорость, при которой водитель в состоянии предпринять необходимые действия при возникновении опас-

ной ситуации. Соблюдение безопасной скорости с большой вероятностью позволяет гарантировать безопасность поездки.

Экономичная скорость $v_{\text{ экон}}$ – скорость, при которой затраты на движение (в основном расход топлива) минимальны.

Скорость сообщения v_c – скорость, которая является измерителем времени доставки грузов и пассажиров. Скорость сообщения определяется как отношение расстояния между точками сообщения ко времени нахождения в пути (времени сообщения). Этот же показатель применяется для характеристики скорости по отдельным участкам дорог.

Между параметрами транспортного потока существуют определенные зависимости. Характер этих зависимостей достаточно сложный, и на них влияет громадное количество факторов, связанных не только непосредственно с транспортным потоком, но и с условиями его движения по дороге, метеоусловиями, временем года и суток и т. п. При исследовании транспортных потоков влияющие на них факторы могут рассматриваться как детерминированные или как вероятностные величины. Вероятностный подход более близок природе транспортного потока, но сложен для математического описания. Детерминированный подход легче реализовать в инженерных методиках, и при тщательном анализе исходных данных он дает достаточно точные для практики результаты.

При исследовании транспортных потоков используют два подхода. Первый предполагает исследование процессов, происходящих внутри потока, и поэтому он получил название *микроскопическое моделирование*. Микроскопическое моделирование рассматривает транспортный поток как взаимное положение следующих друг за другом автомобилей и основано на *теории следования за лидером*. Предполагается, что основное влияние на изменение параметров движения конкретного автомобиля (ведомого) оказывает изменение скорости движения находящегося перед ним автомобиля – лидера. Исследования показали, что влияние на изменение скорости ведомого автомобиля начинается, когда временной интервал между ним и ведомым автомобилем составляет на загородной дороге 9 с, а в городе – 6 с. Изменение ускорения ведомого автомобиля (м/с) прямо пропорционально разности скоростей между ним и лидером и обратно пропорционально расстоянию между ними:

$$a_{(n+1)(t+\tau)} = K(v_{nt} - v_{(n+1)t})/S_{n(n+1)t},$$

где $a_{(n+1)(t+\tau)}$ – ускорение ведомого автомобиля в момент времени $(t + \tau)$; τ – время реакции водителя; K – коэффициент, учитывающий максимально возможное изменение скорости лидера (обычно его значение близко к максимальному замедлению для данного типа автомобиля); v_{nt} – скорость лидера в момент времени t ; $v_{(n+1)t}$ – скорость ведомого в момент времени t ; $S_{n(n+1)t}$ – расстояние между автомобилями в момент времени t .

Представленная зависимость является простейшей линейной моделью следования за лидером. Более точные результаты можно получить, используя нелинейную модель, в которой учитывается зависимость поведения водителя от дистанции между автомобилями.

Основной областью использования микроскопического моделирования являются анализ эффективности организации движения по элементам транспортной сети и проектирование режимов работы технических средств организации движения.

Второй подход к изучению транспортных потоков представляет его как целостный процесс, характеризуемый только внешними параметрами. При таком подходе создаются **макроскопические модели**, которые рассматривают такие характеристики потока, как скорость, интенсивность, плотность и т. п. Модели такого типа появились в середине прошлого века и основаны на гидродинамической аналогии, когда поток автомобилей ассоциируется с потоком жидкости, имеющим определенные характеристики скорости и плотности.

Основной областью использования макроскопического моделирования является анализ распределения транспортных потоков по сети.

Проще всего математически описывается **равномерный транспортный поток**. Между переменными, описывающими движение автомобилей (интервал, расстояние между автомобилями, скорость), и переменными транспортного потока (интенсивность, плотность, средняя скорость потока) устанавливается однозначное соответствие. Это хорошо иллюстрирует диаграмма «время – расстояние между автомобилями», пример которой приведен на рис. 2.16.

На диаграмме движение отдельного автомобиля представлено прямой линией – траекторией движения, так как принято, что скорость движения постоянна, тогда наклон линии соответствует скорости движения $v = dl/dt$. Совокупность траекторий движения отдельных авто-

мобилей образует транспортный поток. Точки на диаграмме соответствуют положению отдельных автомобилей в соответствующий момент времени. Горизонтальная линия **A**, пересекаясь с траекториями движения автомобилей, представляет интервалы времени, через которые они проезжают определенное сечение дороги (мимо стационарно расположенного наблюдателя). Количество пересечений за единицу времени определяет интенсивность транспортного потока.

Вертикальная линия **B**, пересекаясь с траекториями движения отдельных автомобилей, представляет расстояния между ними. Количество пересечений соответствует числу автомобилей, находящихся на определенном отрезке дороги – плотности транспортного потока.

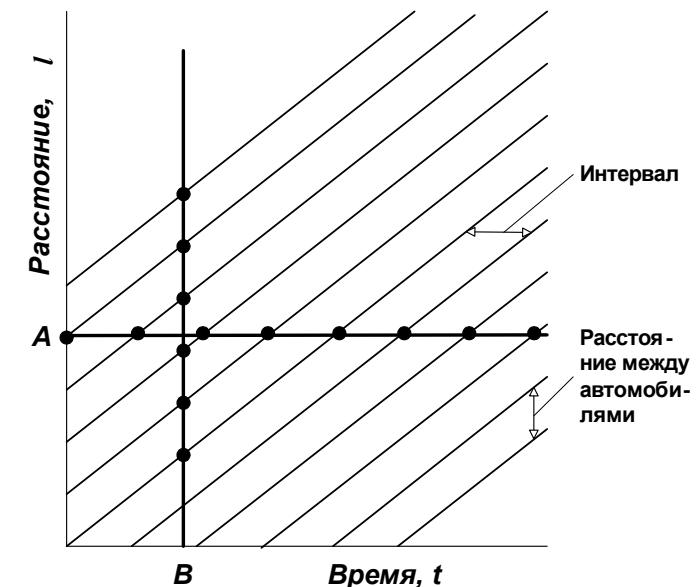


Рис. 2.16. Диаграмма «время – расстояние между автомобилями»

Реальный транспортный поток редко бывает равномерным. Скорость движения отдельных автомобилей и потока постоянно меняется, меняются и интервалы движения, поэтому траектории движения являются криволинейными.

Между скоростью движения, плотностью и интенсивностью существует соотношение, которое называется **фундаментальным выражением транспортного потока**,

$$N_a = v_a q_a.$$

Все три величины в этом выражении находятся в сложной взаимозависимости, поэтому нельзя анализировать его, фиксируя одну из них и произвольно изменяя значение другой. Повышение скорости движения снижает плотность потока, из-за чего интенсивность движения может возрастать, оставаться постоянной или снижаться в зависимости от относительной величины этих двух противодействующих факторов.

На рис. 2.17 представлены зависимости между плотностью, скоростью и интенсивностью транспортного потока. Зависимость между скоростью и плотностью монотонно убывает в соответствии с уже упомянутой закономерностью. Зависимости между скоростью и интенсивностью и между интенсивностью и плотностью являются параболами и имеют точку перегиба в значении максимальной интенсивности транспортного потока, соответствующую неким значениям скорости v_m и плотности q_m потока.

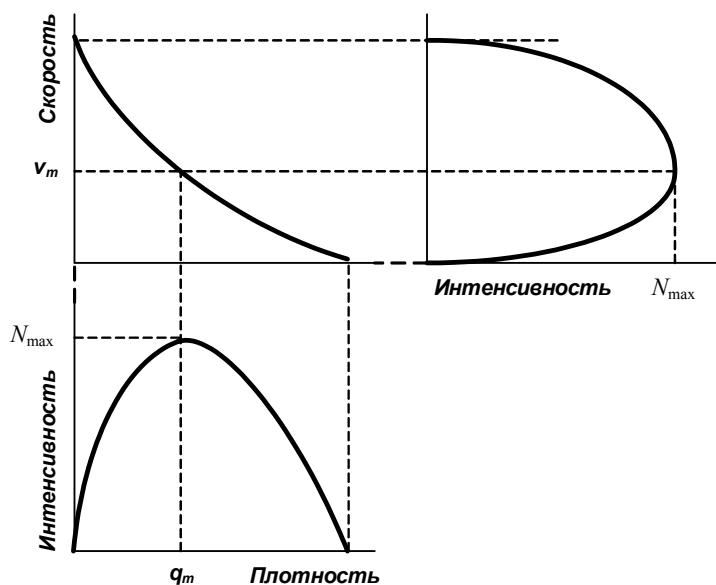


Рис. 2.17. Зависимости между плотностью, скоростью и интенсивностью транспортного потока

Таким образом, зависимость интенсивности транспортного потока можно представить в следующем виде:

$$N_a = q_a v_a(q_a).$$

Графически эта зависимость может быть изображена в виде так называемой **основной диаграммы транспортного потока** (рис. 2.18). Эта диаграмма строится из предположения, что в транспортном потоке соблюдается режим безопасности **Б** (см. табл. 2.2). Диаграмма отражает изменение состояния однорядного транспортного потока преимущественно легковых автомобилей в зависимости от увеличения его интенсивности и плотности.

Левая часть кривой (показана сплошной линией) отражает устойчивое состояние потока, при котором по мере увеличения плотности транспортный поток проходит фазы *свободного*, затем *частично связанного* и, наконец, *связанного* движения, достигая точки максимальной возможной интенсивности, т. е. *пропускной способности* (точка $N_{a \max} = P_a$). В процессе этих изменений скорость потока падает – она характеризуется тангенсом угла наклона α радиуса-вектора, проведенного от точки 0 к любой точке кривой, характеризующей изменение N_a . Соответствующие точке $N_{a \max} = P_a$ значения плотности и скорости потока считаются оптимальными по пропускной способности ($q_{a \text{ opt}}$ и $v_{a \text{ opt}}$). При дальнейшем росте плотности (за точкой P_a перегиба кривой) поток становится *неустойчивым* (эта ветвь кривой показана прерывистой линией).

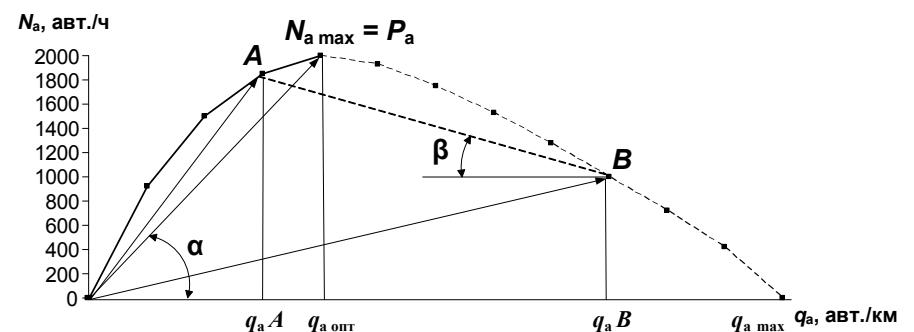


Рис. 2.18. Основная диаграмма транспортного потока

Переход потока в неустойчивое состояние происходит вследствие снижения плавности движения, например, при появлении препятствия на участке дороги, неблагоприятных погодных условиях и т. п. Снижение скорости лидером группы требует торможения разной интенсивности последующих автомобилей, а затем и разгонов, что создает пульсирующий, неустойчивый поток.

Дальнейшее снижение интенсивности потока до нуля при скорости потока, тоже равной 0, соответствует максимальной плотности потока $q_{a \max}$. Интересно отметить, что если бы существовала техническая возможность синхронного движения потока в состоянии максимальной плотности, то диаграмма представляла бы вертикальную линию из точки $q_{a \max}$.

Резкое торможение потока (находящегося в режиме, соответствующем точке **A**) и переход его в результате торможений к состоянию по скорости и плотности в положение, соответствующее, например, точке **B**, вызывает так называемую «ударную волну» (показана пунктиром **AB**), распространяющуюся навстречу направлению потока со скоростью, характеризуемой тангенсом угла β (значение скорости будет отрицательным). «Ударная волна» является, в частности, источником возникновения попутных цепных столкновений, типичных для плотных транспортных потоков. В точках 0 и $q_{a \max}$ интенсивность движения $N_a = 0$, т. е. соответственно на дороге нет транспортных средств или поток находится в состоянии затора (неподвижности).

Радиус-вектор, проведенный из точки 0 в направлении любой точки на кривой (например, **A** или **B**), характеризующей N_a , определяет значение средней скорости потока

$$\bar{v}_a = \frac{N_a}{q_a} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Зависимость между интенсивностью и скоростью транспортного потока (см. рис. 2.17) позволяет получить комплексную оценку условий движения автомобилей по транспортной сети при определенном уровне безопасности. Данную зависимость можно разделить на зоны, которые будут соответствовать определенным условиям движения с определенными сочетаниями значений интенсивности, скорости и плотности движения. Принцип такого выделения зон показан

на рис. 2.19, а сами зоны соответствуют определенному уровню обслуживания пользователей транспортной сети. Этот подход используется для оценки как условий движения подвижного состава, так и условий перевозки пассажиров. В США требования к уровням обслуживания определены в документе HCM-2000⁸, который является основным документом при проектировании автодорожных систем. Характеристика уровней обслуживания, принятая в США и в нашей стране для загородных дорог, приведена в табл. 2.4.

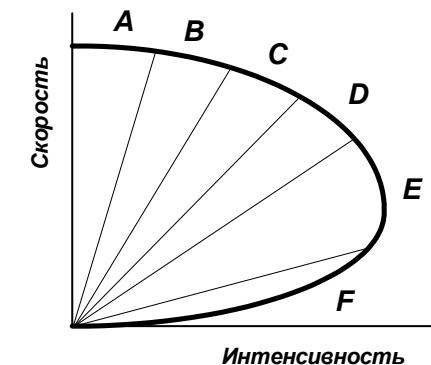


Рис. 2.19. Графическая интерпретация уровней обслуживания

Для элементов транспортной сети типа регулируемых и нерегулируемых пересечений, развязок и т. п. используются дополнительные показатели, с помощью которых формируется соответствующая оценка уровня обслуживания.

Характеристика условий движения на любых типах дорог для каждого уровня обслуживания заключается в следующем:

- Уровень обслуживания **A** – свободный поток автомобилей может двигаться с максимальной разрешенной скоростью. Свободные условия для выполнения маневров. Задержек на регулируемых пересечениях нет или они минимальны.
- Уровень обслуживания **B** – сохраняются условия движения свободного потока при несколько большей плотности автомобилей на дороге.

⁸ Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000. 1134 p.

- Уровень обслуживания **C** – стабильный поток автомобилей, но его скорость может снижаться до 50 % от скорости свободного потока. Возможности маневра и задержки могут возрастать.
- Уровень обслуживания **D** – в этих условиях могут значительно снижаться скорость потока и возрастать его плотность. Условия движения становятся некомфортными. Воздрастают задержки движения.
- Уровень обслуживания **E** – нестабильные условия движения с резким колебанием скорости потока.
- Уровень обслуживания **F** – крайне нестабильные условия движения с длительными задержками.

Таблица 2.4

Характеристика уровней обслуживания

Используемая в США		Предложенная проф. В. В. Сильяновым			
Уровень обслуживания	Максимальная интенсивность на полосу	Условия движения	Уровень удобства	Коэффициент загрузки	Условия движения
A	600	Свободный поток	A	< 0,2	Свободный поток
B	990	Устойчивый поток	Б	0,2–0,45	Частично связанный поток
C	1430	Устойчивый поток	В	0,45–0,7	Связанный поток
D	1910	Близкий к неустойчивому	Г-а	0,7–1,0	Насыщенный поток
E	2250	Неустойчивый поток	Г-б	≥ 1,0	Плотно насыщенный поток

2.4. Транспортные процессы

Функционирование транспортной системы реализуется посредством выполнения транспортных процессов. Выполняя те или иные транспортные процессы, система достигает своей цели. При этом необходимо учитывать, что транспортные процессы всегда реализуются в рамках выделенных ресурсов и в системе ограничений, связанных

с пропускной способностью транспортной сети, пропускной способностью транспортных узлов, мощностью перегрузочных устройств и пересадочных или остановочных пунктов, емкостью складов.

Транспортные процессы могут быть *скалярными* и *векторными* (потоковыми). Это зависит от того, изменяет ли данный процесс состояние системы. Естественно, в разных системах один и тот же процесс может присутствовать в двух формах. Например, в системе управления перевозками процесс укрупнения грузовой единицы на складе является скалярным, так как груз остается на складе, с точки зрения перевозочной системы груз находится в процессе подготовки к перевозке и никак не изменяет состояние системы. Процесс выполняется в скалярной форме. В системе управления складом процесс укрупнения грузовой единицы вызывает перемещение отдельных грузовых мест, изменяется количество груза в ячейках хранения или они вообще освобождаются – структура (состояние) системы меняется. Процесс выполняется в векторной форме.

Процессы в векторной форме (потоковые) имеют пространственно-временную информацию о перемещении материальных потоков. С точки зрения цели функционирования транспортной системы такие процессы имеют ключевое значение, однако на практике груз в процессе перемещения находится всего лишь 20 % от общего времени доставки. Остальное время занимают скалярные относительно перемещения груза процессы.

В качестве *основных субъектов* транспортной системы можно выделить грузоотправителя, грузополучателя, экспедитора, оператора и перевозчика. Транспортные процессы в транспортной системе на самом верхнем (наиболее общем) уровне представляются процессами планирования, управления, доставки, слежения (vehicle tracking)⁹ и трассирования (vehicle tracing)¹⁰ транспортных средств. Процессы верхнего уровня включают коллекции процессов, реализующих более детальные функции. Каждый субъект реализует определенный набор процессов, соответствующих цели его деятельности.

В качестве основных процессов, составляющих *процесс доставки*, можно выделить цепочку: отправка груза у отправителя – перевоз-

⁹ Слежение – систематический мониторинг и запись текущей позиции и состояния транспортного средства.

¹⁰ Трассирование – деятельность по поиску текущей позиции транспортного средства путем реконструкции его маршрута.

ка – перегрузка – перевозка – сдача груза получателю. Комбинируя транспортные и перегрузочные процессы, можно определить возможное количество цепочек поставок. Переходы между подпроцессами будут показывать точки перехода ответственности за груз.

Процесс доставки и *процесс управления* тесно связаны между собой и используют одни и те же компоненты. В то же время процесс управления доставкой грузов дополняет компоненты в управлении цепочкой поставок.

Процессы планирования, слежения и трассирования относятся к деятельности перевозчика или экспедитора и оператора, ответственного за функционирование всей цепочки поставок.

Материальные и информационные потоки делятся между двумя процессами. Материальный поток существует в пределах процесса доставки и перемещается по цепочке поставок от одного субъекта к другому. Информационный поток достигает субъектов транспортной системы в рамках процесса управления.

Процессы управления, планирования, слежения и трассирования являются иерархическими, так как распределяются между субъектами, ответственными за всю цепочку поставок, и субъектами, ответственными за выполнение отдельных операций и функций. Это деление помогает различить операторов, заинтересованных в оптимизации выполнения отдельных функций, и операторов, заинтересованных в оптимизации всей транспортной системы.

Целесообразно потоки данных разделять между процессами в соответствии с их семантикой (содержанием) на следующие группы:

- потоки данных с заказами и материалами контрактов на перевозки. Основной объем этих данных циркулирует вне пределов процессов по перевозке грузов;
- потоки данных с информацией о заказе транспортных средств;
- потоки данных с накладными (коносаментами) и грузовой сопроводительной документацией;
- потоки данных с управленческой информацией. Основной объем этих данных циркулирует внутри объектов или субъектов транспортной системы;
- потоки данных, относящихся к сопровождению транспортных средств и грузов;
- потоки данных с прочей информацией.

Для описания потоков данных в транспортной системе необходимо определить систему описания процессов, которая позволила бы провести их иерархию и привязать потоки данных к каждому уровню иерархии. Система описания процессов транспортной системы в виде схемы приведена на рис. 2.20.

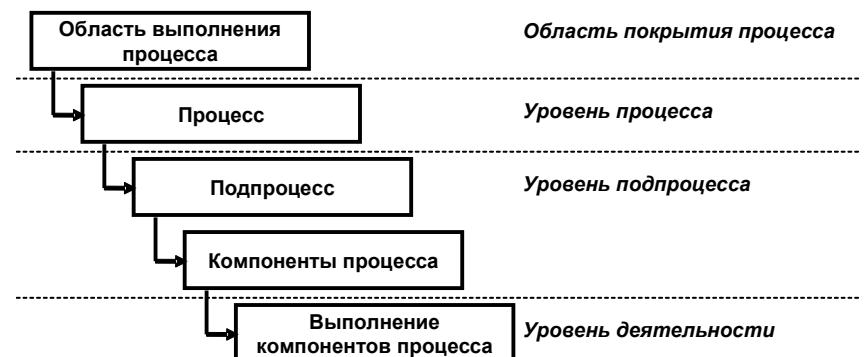


Рис. 2.20. Схема иерархии описания процессов

Иерархию процессов формируют подпроцессы. Подпроцесс самого нижнего уровня обеспечивает выполнение элементарного действия в рамках данного процесса. Подпроцессы верхних уровней содержат коллекцию подпроцессов нижнего уровня. Таким образом, *процесс* – это группа подпроцессов, образующая единую логическую сущность. Каждый процесс имеет начальную и конечную точки, а также входной и выходной потоки. Компонент процесса – это общее условие выполнения процесса или подпроцесса.

Процессы удобно описывать с помощью *таблицы процессов*, пример которой приведен в табл. 2.5. Краткое описание процесса удобно дополнять диаграммой, на которой графически показаны связи между подпроцессами, а также между потоками данных. Пример такой диаграммы приведен на рис. 2.21. На этой диаграмме фрагмент процесса представлен двумя подпроцессами, которые выполняются двумя субъектами транспортной системы. Между процессами 1.1.1 и 1.2.1 передается материальный поток, который инициируется и сопровождается информационными потоками между всеми процессами, отображенными на схеме.

Пример таблицы процессов

Процесс	Описание	Начало	Конец	Примечание
Процессы верхнего уровня				
1. Доставка	Перевозка груза от отправителя к получателю в соответствии с заказом	Готовность груза к отправке Готовность плана доставки	Готовность груза и данных для получателя	Все стадии процесса доставки генерируют данные для процессов отправки, слежения и т. п.
2. Планирование	Планирование цепочки доставки груза и ее логистического обслуживания	Определена технология перевозки	Начало перевозки груза	Процесс планирования предваряет перевозку, а ее сопровождает процесс управления
3. Управление	Управление цепочкой поставок грузов и ее логистическим обслуживанием	Начало перевозки груза	Завершение доставки груза	—
4. Слежение и трассировка	Сбор, хранение данных и распределение их среди пользователей. Подготовка запросов	Определена необходимость процесса	Данные удалены	—
Подпроцессы доставки				
1.1. Отправка	Подготовка груза к перевозке и передача его перевозчику	Готовность груза к отправке Готовность плана доставки	Груз и ответственность переданы перевозчику	Иерархия процесса зависит от вида транспорта
1.2. Перевозка	Перевозка груза от пункта отправления ТС до пункта прибытия	Груз и ответственность переданы перевозчику	Груз и ответственность сняты с перевозчика	Процесс влечет необходимость выполнения процессов погрузки и разгрузки
1.3. Перегрузка	Передача с одного этапа доставки на другой	Груз и ответственность получены	Груз и ответственность сняты	Может сопровождаться процессами хранения, сортировки груза и т. п.
1.4. Получение	Получение отправленного груза	Груз и ответственность получены	Товар готов к использованию на следующей стадии	Процесс влечет необходимость выполнения процессов разгрузки

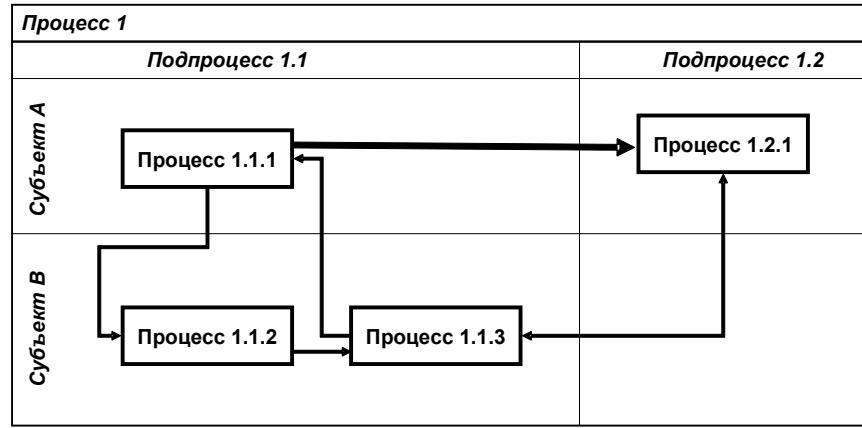


Рис. 2.21. Пример диаграммы процесса

На рис. 2.22 приведены основные процессы доставки грузов. Взаимосвязи между ними показывают тонкие стрелки, соответствующие информационным потокам, и толстые, – соответствующие материальным потокам (перемещению груза). Подразумевается, что в процессе доставки участвует несколько операторов (перевозчиков). Более подробно бизнес-процессы раскрыты для текущего перевозчика на одном из этапов доставки. Операторы транспортной инфраструктуры (дорожные службы, ГИБДД) помимо общих функций управления движением подвижного состава принимают более активную роль в процессе доставки в случае перевозки опасных, негабаритных и других ненормативных грузов. В этом случае с ними должны согласовываться маршрут движения, время перевозки и т. п.

Количественно выполнение транспортных процессов характеризуется соответствующими **измерителями**. Основные из них:

- **транспортная масса** – объем перевозок в тоннах или количество перевезенных пассажиров Q ;
- **транспортный путь** – фактическое расстояние перевозки L , км;
- **транспортное время** – промежуток времени T , необходимый для выполнения перевозки. Может измеряться в минутах, часах или сутках.

Из этих трех основных измерителей могут быть получены другие производные измерители по формуле

$$I = Q^x L^y T^z,$$

где x, y, z – показатели степени.

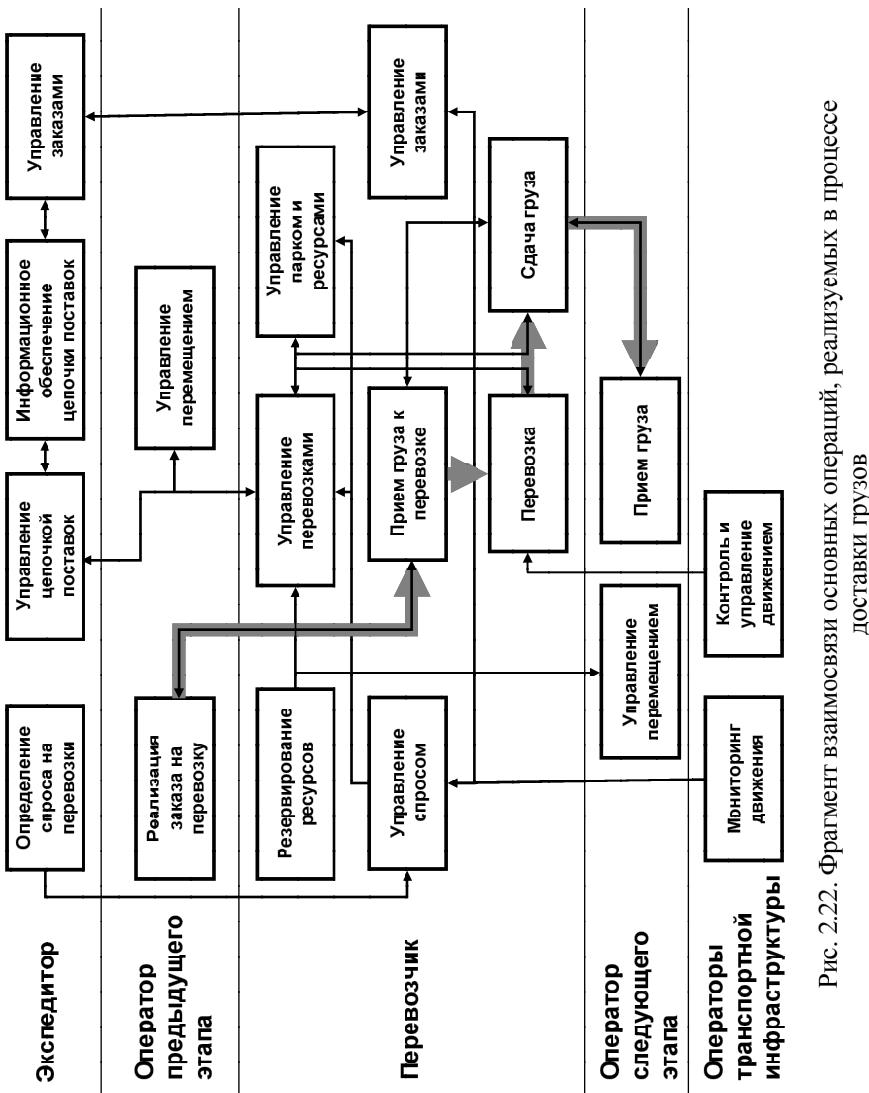


Рис. 2.22. Фрагмент взаимосвязи основных операций, реализуемых в процессе доставки грузов

Приведем в качестве примера несколько измерителей, полученных из трех основных:

- при $x = 0, y = 1, z = -1$ $I = L/T$ – скорость перевозки, км/ч;
- при $x = 1, y = 0, z = -1$ $I = Q/T$ – грузопоток, т/ч;
- при $x = 1, y = 1, z = 0$ $I = QL$ – транспортная работа, ткм;
- при $x = 1, y = 3, z = -2$ $I = QLv^2$ – тран¹¹, ткм³/ч².

Контрольные вопросы

1. Каково значение транспортных систем в экономике?
2. Приведите классификацию транспортных систем.
3. Назовите особенности транспортно-логистических систем.
4. Опишите функциональную структуру транспортной системы.
5. Дайте характеристику объектов управления в транспортной системе.
6. Приведите классификацию транспортных сетей.
7. Что такое морфологическая характеристика транспортных сетей?
8. Дайте представление о построении модели транспортной сети.
9. На чем основаны показатели уровня обслуживания транспортной сетью?
10. Опишите задачу о максимальном потоке в транспортной сети.
11. Опишите задачу поиска кратчайшего расстояния в транспортной сети.
12. Назовите основные принципы расчета пропускной способности элементов транспортной сети для маршрутного транспорта.
13. Приведите основные характеристики транспортных потоков. Что такое основная диаграмма транспортного потока?
14. Назовите основные системные характеристики транспортных процессов.
15. Дайте характеристику измерителям транспортного процесса.

¹¹ Величина тран предложена для объективного учета энергетической сущности транспортного процесса, так как учитывает затраты мощности на перемещение путем учета в выражении квадрата скорости от отличие от учета работы транспорта в ткм.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

3.1. Цели и задачи исследования

Транспортные системы занимают важнейшее место в обеспечении практически всех сфер деятельности экономики и общества. Естественно, повышение эффективности их функционирования является необходимым условием развития и совершенствования экономики и качества жизни населения.

Повышение эффективности транспортных систем предполагает решение совокупности взаимосвязанных задач, многие из которых можно отнести к задачам более высокого уровня, так как они выходят за рамки узко транспортных проблем. Процесс оптимизации транспортных систем заключается в отыскании оптимальных пропорций между количественными значениями и тенденциями изменения материальных, технологических и организационных факторов, связанных с функционированием транспортных систем. Для осуществления таких расчетов необходимо иметь формализованное описание закономерностей функционирования транспортных систем, в котором количественные значения возможных изменений учитываемых факторов были бы связаны между собой и с экономическими показателями или показателями качества работы транспортных систем математическими соотношениями. Например, это могут быть соотношения балансового типа, в которых количественные значения учитываемых факторов связаны функциональными зависимостями; соотношения, описывающие динамику изменения факторов во времени или экономических показателей при изменении количественных значений факторов и т. д.

Составление таких зависимостей, образующих в совокупности математическую модель объекта исследований, является непростой задачей. Прежде всего, достаточно сложно правильно выбрать саму структуру зависимостей, например перечисленных выше факторов, от технологических и технических параметров транспортных систем. Далее, в рамках выбранной структуры необходимо учесть, что транспортные системы работают в условиях неопределенности внешней и внутренней среды, связанной с большим количеством взаимодействую-

ющих субъектов, параллельно функционирующих объектов и человеческим фактором. Например, планируя перевозку, мы не можем точно предусмотреть реальные погодные условия, возможность внезапных заторов на пути следования, количество машин других перевозчиков, прибывающих одновременно на пункты погрузки и разгрузки, и т. п.

Оптимальное планирование работы транспортных систем, принципиально позволяющее преодолеть большинство из перечисленных трудностей, опирается на систему взаимосвязанных математических моделей, в рамках которых удается учесть такие особенности транспортных систем, как нечеткость имеющейся информации, противоречия в интересах партнеров, многоцелевой характер оценки выбираемых режимов функционирования и т. д. На основе этих моделей появляется возможность формализовать задачи оптимизации и использовать соответствующий математический аппарат. Специалисты выделяют несколько классов задач оптимизации транспортных систем.

Задачи маршрутизации перевозок и движения транспортных средств заключаются в выборе рациональных или оптимальных схем перемещения грузов или пассажиров между конечным числом пунктов. В качестве исходных данных в таких задачах используются необходимые объемы перевозок, характеристики используемых транспортных средств и транспортной сети, условия доставки, ограничения по времени, данные по затратам. Целевой функцией, которая подлежит минимизации, является сумма произведений объема перевозок q на весовой коэффициент c , в качестве которого могут использоваться пробег транспортного средства, себестоимость перевозок, время и т. д.

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m c_{ij} q_{ij} \rightarrow \min.$$

Рациональными считаются те маршруты, которые обеспечивают непревышение требуемых значений целевой функции, а оптимальными – те маршруты, которые обеспечивают наилучшие из достижимых значений.

В этот класс задач входит и транспортная задача, которая заключается в распределении перевозок однородного груза между отправителями и получателями. Эта, пожалуй, исторически первая оптимиза-

ционная задача на транспорте впервые в математическом виде была сформулирована в 1930 г. А. Н. Толстым. Позже венгерский математик Б. Эгервари заложил основы метода, позволяющего решать задачу в общем виде и получившего название венгерского. В том виде, в котором задача встречается наиболее часто, она была поставлена в 1941 г. Ф. Хичкоком, а в 1949 г. Л. В. Канторович и М. К. Гавурин предложили метод потенциалов.

Задачи загрузки транспортных средств определяют номенклатуру, объем и схему размещения груза при перевозке. Сложность задачи повышается, когда кроме объема и массы груза необходимо учитывать условия совместности грузов (особенно для опасных), последовательность загрузки, неразрывность партий груза, перевозимых по одному документу, и т. д. В качестве целевой функции, как правило, максимизируется доход от перевозки:

$$\sum_{i=1}^n c_i q_i \rightarrow \max.$$

При условиях

$$\sum_j l_j \leq L; \sum_k b_k \leq B; \sum_m h_m \leq H; \sum_i q_i \leq Q,$$

которые определяют непревышение габаритов грузового отсека транспортного средства, контейнера или прочей тары уложенным грузом соответственно по длине, ширине и высоте, а также по грузоподъемности. В этом случае c_i – тариф на перевозку груза вида i .

Условия задачи могут быть дополнены требованиями к последовательности укладки груза, совместности и т. п.

Задачи составления графиков движения возникают при обслуживании технологических процессов производственных предприятий (перевозка бетона), выполнении перевозок по технологии «точно в срок», при загрузке или разгрузке транспортных средств на крупных складах и терминалах, пассажирских перевозках. Показателями, определяющими качество составления графиков движения, служат минимальное количество используемых транспортных средств, время простоя и связанные с этими показателями доходы и затраты.

Задачи планирования использования трудовых и технических ресурсов в транспортном узле решаются для оптимизации использования общеузловых и специализированных для каждого вида транспорта ресурсов с целью снижения простоев всех видов ресурсов, повышения производительности транспортного узла. Основное направление решения таких задач заключается в составлении согласованных графиков работы всех видов транспорта с учетом их технических и технологических особенностей, рационального распределения объемов прямой и складской перевалки грузов и т. д.

Задачи планирования работы транспортных предприятий затрагивают транспортную (планирование перевозок) и эксплуатационную (выполнение ТО и ТР, использование кадров) деятельность предприятия. В качестве целевой функции выступают суммарные затраты на использование трудовых и технических ресурсов, которые подлежат минимизации.

Задачи перспективного развития транспорта играют особую роль в больших городах. Их решение определяет возможности развития города, строительства новых предприятий и жилых районов. При решении этих задач определяются приоритеты в развитии того или иного вида транспорта в зависимости от необходимых объемов перевозок и среднего времени поездки. Развитие транспорта определяет возможности освоения природных ископаемых, привлекательность тех или иных районов для развития бизнеса, туризма, привлекательности для населения. В качестве критерия в этих задачах используется минимальный срок окупаемости суммарных затрат на тот или иной вариант развития транспорта.

Задачи производственно-транспортного планирования касаются логистических систем, когда по критерию минимума суммарных затрат на производство и доставку продукции определяется план производства, распределения и складирования готовой продукции при наличии альтернативных источников поставки и потребления взаимозаменяемых изделий.

Задачи определения оптимальных тарифов позволяют максимизировать доход транспортного предприятия за счет проведения той или иной маркетинговой политики. Например, если грузовладелец предлагает определенную номенклатуру грузов, объемы которых можно представить массивом Q , тарифы на перевозку этих грузов – массивом

T , а стоимость грузов – массивом C , то участники торговой сделки могут менять свои предложения в определенных границах, которые можно выразить множествами Π_Q , Π_T и Π_C .

Поведение участников торговой сделки в рассматриваемом случае соответствует поведению участников антагонистической игры, в которой один игрок (грузовладелец) располагает множеством стратегий Π_Q , другой игрок (покупатель и перевозчик груза) располагает множеством стратегий Π_T , а платежная функция $f(Q, T)$ описывает доход грузовладельца. При этом каждый из участников игры может получить для себя наилучшее гарантированное значение функции $f(Q, T)$, которое для грузовладельца составит

$$\max_{Q \in \Pi_Q} \min_{T \in \Pi_T} f(Q, T),$$

а для другого участника игры соответственно

$$\min_{T \in \Pi_T} \max_{Q \in \Pi_Q} f(Q, T).$$

Таким образом, задача определения тарифов на перевозки грузов в рассматриваемой ситуации формулируется в виде следующей оптимационной задачи

$$\max_{Q \in \Pi_Q} \{ \max_{T \in \Pi_T} \langle Q, T \rangle - \langle Q, T \rangle \} \rightarrow \min_{T \in \Pi_T},$$

которая в соответствии с принятой в математике терминологией называется минимаксной задачей, являясь задачей отыскания наилучшей стратегии одного из игроков в указанной антагонистической игре.

3.2. Модели и моделирование

При изучении систем различной природы исследователь сталкивается с проблемой их отображения, а также использования в познава-

тельной и практической деятельности. Объект фиксируется терминами языка, отображается на бумаге чертежами, графиками, фотографиями, уравнениями и формулами, а также макетами, механизмами, устройствами. Потом эти отображения применяются для научного исследования (например, наблюдения, эксперимента) либо практической деятельности. Отображения объектов называются *моделями*, процесс их создания – *моделированием*, а использование соответственно в науке называется модельным исследованием (модельным экспериментом, численным экспериментом, модельным наблюдением) и модельной практикой в практической деятельности. Способы построения моделей получили название методов моделирования. Они очень разнообразны. Практически каждая наука имеет свой арсенал методов моделирования. В зависимости от используемых средств конкретной научной теории различают геометрическое, физическое, химическое, биологическое, экономическое, социальное, политическое, культурологическое и математическое моделирование.

Модель представляет собой систему, исследование которой служит средством получения информации о другой системе. Обе системы могут быть и материальными, и абстрактными. В соответствии с этим положением модели делятся на материальные и абстрактные, а также выделяют промежуточную между этими видами моделей группу – знковые модели.

Материальные модели отображают оригинал за счет установления между ними определенного подобия. Различают три следующих вида подобия:

- *физическое (прямое)*, при котором модель воспроизводит изучаемый процесс с сохранением изучаемых свойств. Это, например, масштабные модели транспортных средств;
- *косвенное*, проявляющееся в виде совпадения или близости между оригиналом и моделью абстрактных моделей; особенно распространен этот вид подобия в аналоговых моделях: часы – аналог времени, автопилот – аналог летчика, электрические схемы – аналог транспортных потоков и т. п.;
- *условное*, достигаемое в результате соглашений. Это, например, карты местности, удостоверение личности и т. п.

Абстрактные модели создаются посредством мышления. Различают *внутренние абстрактные модели*, которые отображают меха-

низм мышления и, в конечном счете, выражаются в языковых конструкциях, и *внешние*, предназначенные для коллективной деятельности.

В свою очередь *внешние абстрактные модели* делят на *иррациональные* (например, театральные спектакли) и *языковые*, которые могут выражаться как на естественном языке, так и в специальной языковой форме. В последней группе особую роль при технических исследованиях занимают *математические модели*, когда модель представляет собой математическое описание объекта моделирования.

Знаковые модели – это материальные модели с абстрактным содержанием. Среди этой группы моделей в управлении деятельностью наиболее значимы *информационные модели*, или модели данных. Информационные модели – это средство формирования представления о данных, их составе и использовании в конкретных условиях. Для описания информационной задачи используются три вида представления информационной модели:

- *концептуальное* – охватывающее всю задачу с точки зрения администратора информационной системы, т. е. лица, ответственного в целом за работу модели;
- *внешнее* – отражающее представление о задаче с точки зрения конкретного пользователя, т. е. лица, решающего узкую задачу работы системы на конкретном рабочем месте. Следовательно, каждая информационная модель будет иметь несколько внешних представлений;
- *внутреннее* – отражающее представление об информационной задаче разработчика (программиста) с учетом особенностей и возможностей конкретной СУБД и компьютеров, на которых будет реализовываться решаемая задача. На основе внутренней модели непосредственно создается логическая модель размещения и обработки данных, которая и служит основой для непосредственного проектирования информационной системы.

Наличие различных видов представлений информационной модели объясняется тем, что только философы могут позволить себе иметь дело с реальным миром. При решении конкретных задач реальная действительность воспроизводится с существенными ограничениями, зависящими от области деятельности, поставленных целей и мощности вычислительных средств. Взаимосвязь трех видов представлений информационной модели можно показать в виде схемы, приведенной на рис. 3.1.

Таким образом, реальные процессы отображаются через восприятие служебных функций отдельных пользователей, объединяются с точки зрения работы системы в целом, и на этой основе разрабатывается информационная модель, которая физически реализуется в виде программы для компьютера и баз данных, размещенных на физическом носителе информации (магнитном диске). При этом необходимо отметить, что если, например, математическая модель может быть реализована в виде компьютерной программы для повышения быстроты расчетов, но может использоваться и без компьютера, то информационная модель в принципе без компьютерной программы (физического воплощения) не реализуема.

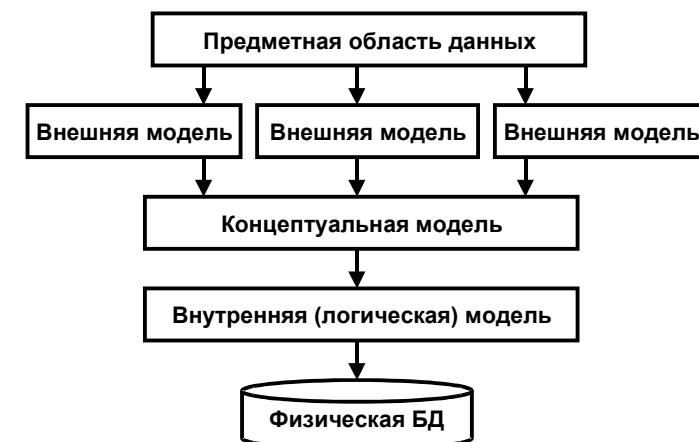


Рис. 3.1. Различные виды представления информационной модели

Необходимыми и достаточными *признаками модели* являются следующие условия:

- между моделью и оригиналом имеется отношение сходства, форма которого явно выражена и точно зафиксирована (*условие отражения*);
- модель в процессе научного познания является заместителем изучаемого объекта (*условие репрезентативности*);
- изучение модели позволяет получить информацию (сведения) об оригиналe (*условие экстраполяции*).

Совокупность признаков модели обеспечивает первое и естественно возникающее требование к модели – ее соответствие моделируемому

му объекту или системе. Это требование реализуется в условии изоморфизма модели и моделируемого объекта относительно изучаемых свойств. Две системы объектов с определенными для них свойствами и отношениями называются ***изоморфными***, если между ними установлено такое взаимно-однозначное соответствие, что соответствующие друг другу объекты обладают соответствующими свойствами и находятся в соответствующих отношениях между собой. На практике изоморфные модели не приводят к упрощению исследовательской задачи, являющемуся важнейшим стимулом для моделирования, поэтому в исследованиях используются модели, представляющие упрощенный образ моделируемого объекта. В этом случае говорят о гомоморфизме моделей. ***Гомоморфизм*** сохраняет все определенные для исходной системы свойства и отношения только в одну сторону: от моделируемого объекта к его модели. При этом модель может использовать и существенно более сложные отношения, если это обеспечивает упрощение исследований.

Таким образом, система объектов *A* будет моделировать систему объектов *B*, если некоторый гомоморфный образ *A* и некоторый гомоморфный образ *B* изоморфны между собой. Согласно этому определению моделям должны быть присущи следующие свойства:

- ***рефлексивность*** – любая система есть своя собственная модель;
- ***симметричность*** – любая система есть модель каждой своей модели;
- ***транзитивность*** – модель модели есть модель исходной системы.

Исследованиями методов построения и свойств моделей занимается специальный раздел математики – ***теория моделей***, возникший при применении методов математической логики в алгебре. В рамках этой теории под моделью понимается произвольное множество с заданным на нем набором свойств (предикатов) и/или операций независимо от того, удается ли такую модель описать аксиоматическими средствами.

С точки зрения управления какой-либо системой ее модель представляет ценность не столько для получения объяснений различных явлений, сколько для предсказания поведения системы в будущем в зависимости от изменения тех или иных факторов. Процесс исследования системы с помощью ее модели можно разбить на ряд этапов:

1) формулировка общей задачи для определения объекта исследований. Формулировка требований к исходным данным. Изучение свойств моделируемого объекта;

2) создание модели. Результаты эмпирических исследований переводятся со специфического языка исследуемого объекта на универсальный математический язык, выбирается схема модели, вводятся основные переменные, параметры и функциональные зависимости. Для полученной модели выбираются соответствующие методы ее анализа. При необходимости производится упрощение модели. Она не должна утратить существенных специфических черт исследуемого объекта и в то же время попасть под класс структур, уже изученных математикой;

3) математический анализ модели. Качественные выводы позволяют обнаружить неизвестные ранее свойства системы: динамику развития, устойчивость к внешним факторам и т. п. Количественные выводы позволяют получить оптимальные планы работы системы и ее объектов, прогноз изменения показателей системы;

4) проверка полученных результатов. Она обычно проводится на экспертном уровне или на основе анализа работы подобных систем и/или объектов;

5) внедрение модели в систему управления. Оно требует ее реализации в удобной для использования форме. В основном – это специальная компьютерная программа, интегрированная в общую информационную систему управления.

По способу представления свойств объекта моделирования ***математические модели*** можно классифицировать, как это показано на рис. 3.2.

Аналитические модели представляют явные выражения выходных параметров как функций входных и внутренних параметров. Процессы функционирования элементов системы записываются в виде алгебраических, интегральных, дифференциальных и других соотношений и условий.

Численные модели выражают связи выходных параметров в форме численного алгоритма.

Имитационные модели отражают поведение объекта во времени и пространстве при задании внешних воздействий на объект. В отличие от других типов абстрактных моделей, в имитационной модели сохранены и легко узнаваемы такие черты моделируемого объекта, как структура, связи между компонентами, способ передачи информации.

С имитационными моделями также обычно связывают и требование иллюстрации их поведения с помощью принятых в данной прикладной области графических образов. Недаром имитационными обычно называют модели предприятий, экологические и социальные модели. Имитационная модель обычно рассматривается как специальная форма математической модели. В этой модели:

- декомпозиция системы на компоненты производится с учетом структуры проектируемого или изучаемого объекта;
- в качестве законов поведения могут использоваться экспериментальные данные, полученные в результате натурных экспериментов;
- поведение системы во времени иллюстрируется заданными динамическими образами.

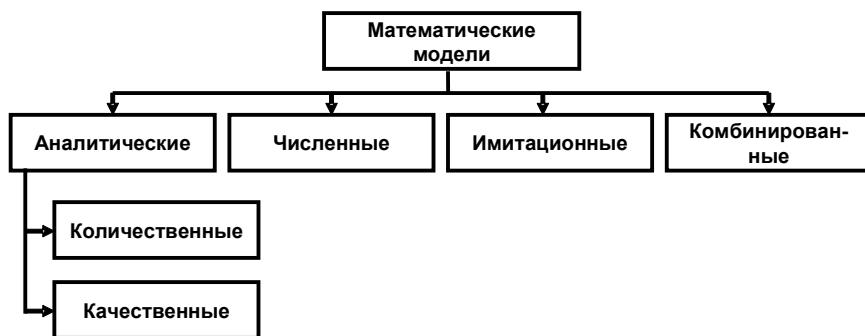


Рис. 3.2. Классификация математических моделей

Имитационное моделирование на ЭВМ является одним из наиболее мощных средств исследования, в частности, сложных динамических систем. Как и любое компьютерное моделирование, оно дает возможность проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми из-за соображений безопасности или дороговизны нецелесообразны. В то же время благодаря своей близости по форме к физическому моделированию этот метод исследования доступен более широкому кругу специалистов.

Комбинированные модели объединяют достоинства вышеперечисленных моделей. При моделировании сложной системы ее модель чаще

всего представляет собой иерархический набор подмоделей. В зависимости от моделируемого объекта каждая подмодель может быть реализована с достаточной степенью самостоятельности и представлять собой аналитическую модель массового обслуживания, численную модель, реализующую какой-либо точный алгоритм, и т. д.

Системное моделирование представляет собой совокупность конкретных разновидностей моделирования, наиболее важные из них:

- *атрибутивное*, направленное на систематизацию информации о свойствах объектов. При этом используются различного рода классификации, матрицы, таблицы, которые позволяют систематизировать свойства объектов, выделить главные и второстепенные;
- *структурное*, обеспечивающее представление структуры объекта или процесса моделирования;
- *организационное*, предполагающее изучение организации системы;
- *функциональное*, ориентированное на построение и исследование функций изучаемого явления;
- *структурно-функциональное*, ставящее своей целью исследование взаимосвязи структуры и функции изучаемого объекта или процесса;
- *вitalное*, направленное на представление и изучение тех или иных этапов жизненного пути системы.

Важнейшим назначением системного моделирования выступает не просто получение знаний о системе, а ее **оптимизация**. Это поиск оптимума характеристик системы в соответствии с некоторыми критериями оптимальности. Математика оперирует понятием «оптимум функции». Оптимум функции $f(x)$ на множестве M есть частное значение $f(x_0)$ этой функции, удовлетворяющее одному из следующих соотношений: $f(x_0)$ больше и равно $f(x)$ для всех x из M (глобальный максимум) или для всех $f(x_0)$ меньше и равно $f(x)$ для всех x из M (глобальный минимум). Точка оптимума функции $f(x)$ на множестве M является одной из точек экстремума этой функции на множестве M .

Системное моделирование ориентировано на поиск в системной модели оптимальных характеристик в целях преобразования реальных объектов для их наиболее эффективного функционирования.

3.3. Модели спроса на транспортное обслуживание

Удовлетворение спроса на транспортное обслуживание является основной целью транспортной системы. Соответствие возможностей транспортной системы и спроса на ее услуги определяется сбалансированностью спроса и мощностей транспортной системы. **Условие сбалансированности** будет выполняться, если для любого θ , принадлежащего периоду t_1, t_2 , выполняется следующее условие:

$$\int_{\Theta}^{t_2} p_c(t) dt \leq \int_{\Theta}^{t_2} p_T(t) dt,$$

где $p_c(t)$ – плотность заявок на транспортные услуги в момент t ; $p_T(t)$ – потенциал транспортной системы, обеспечивающий их удовлетворение.

В соответствии с приведенным условием спрос и возможности транспортной системы сбалансирыны, если, как показано на рис. 3.3, площадь под кривой совпадает с площадью прямоугольника $ABCD$ и при этом отсутствуют периоды, когда транспортная система простаивает.

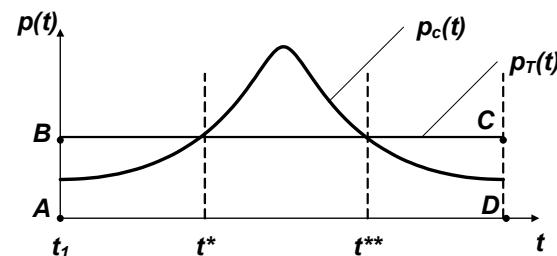


Рис. 3.3. Соотношение спроса и предложения на транспорте

Естественно, это самое общее условие не позволяет избежать периодов отсутствия баланса. Например, в период t^*-t^{**} спрос будет превышать возможности транспортной системы, что может быть ликвидировано повышением мощности транспортной системы. На практике всегда приходится решать задачу допустимости нарушения баланса по величине и времени, так как повышение мощности системы – это дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты.

В связи с этим весьма актуальным является точное определение **спроса на транспортные услуги**. В процессе определения спроса можно выделить 4 основных этапа:

- 1) определение необходимости транспортировки и ее цели (генерация поездок);
- 2) определение места завершения транспортировки (распределение поездок по зонам);
- 3) выбор способа транспортировки (вид транспорта и технология перевозок);
- 4) выбор маршрута движения (распределение поездок по сети).

Эти 4 этапа составляют традиционную для транспортных исследований **четырехшаговую процедуру определения спроса**, структура которой представлена на рис. 3.4. На каждом шаге в модели предусматриваются ее верификация и калибровка, что подразумевает включение итерационных процедур и возврат при необходимости к предыдущим шагам. Как правило, в модели закладывается возможность прогнозирования ситуации на будущие периоды. С момента своего появления в конце 1950-х годов эта процедура постоянно совершенствуется в направлении насыщения каждого шага дополнительными функциями для учета большего количества факторов, их динамики, распределения по времени, для повышения достоверности прогноза и т. п.

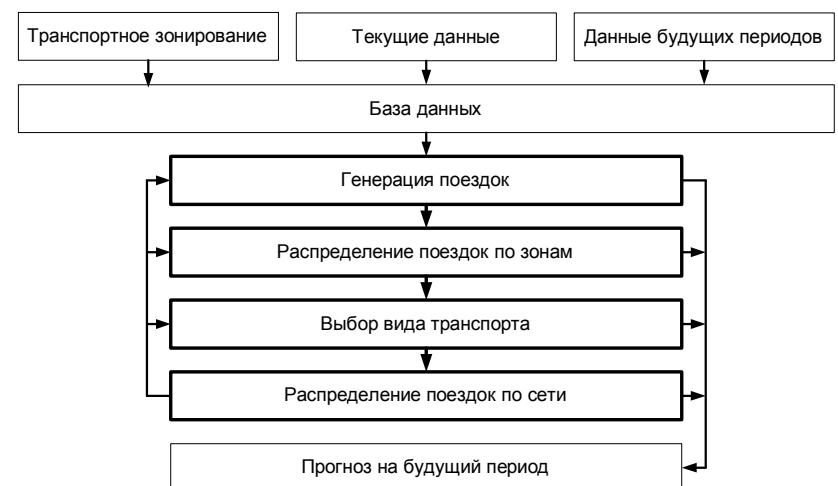


Рис. 3.4. Структура классической четырехшаговой транспортной модели

Спрос характеризуется массивом корреспонденций Q . Для того чтобы определить корреспонденцию Q_{ij} , необходимо сформировать транспортные пары (i, j) и найти соответствующие объемы перевозок и их структуру.

В транспортном планировании для характеристики транспортных пар (i, j) различают понятия *отправление–прибытие* и *зарождение–притяжение* поездок. С точки зрения начала и конца поездки это идентичные понятия. Однако на стадии генерации поездок содержание этих понятий различно и может быть пояснено схемой, приведенной на рис. 3.5.

Как правило, каждая зона, выделяемая в качестве пункта отправления и прибытия поездок, имеет *резидентов* – жителей для пассажирских корреспонденций или источники грузов для грузовых и *нерезидентов* – места приложения труда, учебы или потребления грузов. На рис. 3.5 приведен типичный пример, в котором житель зоны i утром едет на работу в зону j , а вечером возвращается домой. Соответственно в терминах *отправление–прибытие* совершаются две поездки: утром из i в j и вечером из j в i . Эти зоны попеременно являются зонами отправления и прибытия. В терминах *зарождение–притяжение* поездка ассоциируется не с направлением, а с отношением потребителя поездки к ее конечной точке. Зарождение поездки относится к поездкам, которые выполняются резидентами данной зоны, а притяжение – нерезидентами. На рис. 3.5 зона i имеет 2 поездки зарождения, а зона j – 2 поездки притяжения. Смысл такого представления поездок заключается в том, что спрос на поездки резидентами является статистически более устойчивым. Население реже меняет место жительства, чем место работы или учебы, склады и заводы также более стабильны по месту расположения, чем магазины и сервисные службы. По резидентам легче получить статистические данные, необходимые для прогнозирования количества поездок. К тому же именно такие поездки составляют основную часть транспортных передвижений, в частности, формируют «час пик». Необходимо отметить, что в терминах *зарождение–притяжение* не учитываются поездки, совершаемые нерезидентами между различными зонами, например с работы в магазин. Такие поездки необходимо учитывать отдельно; как правило, они составляют 15–20 % от всех поездок.

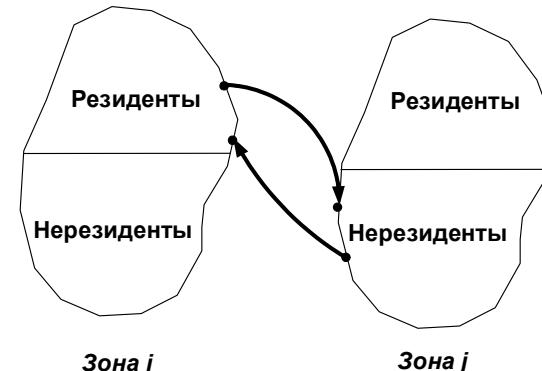


Рис. 3.5. Классификация поездок

Наиболее распространенной моделью генерации поездок является модель **многофакторного анализа**, в которой поездки распределяются по целям и на основе статистических исследований определяется среднее число поездок в семье в зависимости от различных факторов. В табл. 3.1 в качестве примера приведена такая модель для поездок на индивидуальном транспорте, полученная на основе обработки многолетних статистических данных в США¹².

Из приведенного в табл. 3.1 примера видно, что в модели количество поездок прямо пропорционально уровню дохода семьи и ее численности. Часто в подобных моделях учитывается также количество автомобилей в семье. Количество жителей в населенном пункте влияет на число поездок более сложным образом.

Для распределения поездок по зонам они разделяются *по источникам возникновения* (из дома – резиденты или нет) и по целям: трудовые (на работу или учебу), деловые (по рабочим делам), бытовые (в магазины и сервисные службы), социально-культурные (кино, театр) и т. п. Также поездки следует различать по времени суток на пиковый и межпиковый периоды. Так, в пиковый период около 90 % от всех поездок приходится на трудовые поездки. Для большинства магистралей в этот период движение наиболее интенсивно. В выходные дни

¹² Martin W. A., McGuskin N. A. Travel Estimation Techniques for Urban Planning / National Cooperative Research Program Report 365. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, DC. 1998.

из-за преобладания бытовых и социально-культурных поездок загруженка дорог может быть иная, чем в рабочие дни.

Для прогнозирования грузовых перевозок используются аналогичные модели, в которых количество поездок связывается с объемом перевозок, количеством работающих, вместимостью складов и т. п.

Таблица 3.1

Среднесуточное количество поездок на одну семью

Численность населения в городе, тыс. чел.	Уровень дохода	Количество человек в семье				
		1	2	3	4	5 и более
От 50 до 200	Низкий	3,6	6,5	9,1	11,5	13,8
	Средний	3,9	7,3	10,0	13,1	15,9
	Высокий	4,5	9,2	12,2	14,8	18,2
Средневзвешенное значение		3,7	7,6	10,6	13,6	16,6
От 200 до 500	Низкий	3,1	6,3	9,4	12,5	14,7
	Средний	4,8	7,2	10,1	13,3	15,5
	Высокий	4,9	7,7	12,5	13,8	16,7
Средневзвешенное значение		3,7	7,1	10,8	13,4	15,9
От 500 до 1000	Низкий	3,6	7,1	9,0	12,0	14,0
	Средний	4,8	7,1	9,8	12,7	14,6
	Высокий	4,8	7,8	11,5	13,6	16,6
Средневзвешенное значение		4,0	7,3	10,2	13,0	15,4
Свыше 1000	Низкий	3,7	6,3	8,1	10,0	11,8
	Средний	4,9	7,6	9,1	12,3	15,1
	Высокий	5,4	7,9	10,3	12,4	15,3
Средневзвешенное значение		4,2	7,3	9,3	12,0	14,8

Представим, что искомые пары поездок (i, j) образуются наложением на транспортную сеть двух пространственных структур: поля возникновения перевозок – источников и поля завершения перевозок – стоков. Генерируемую при этом пространственную структуру можно назвать *потребительским полем*. Степень агрегирования транспортной сети при этом должна соответствовать потребительскому полю в зависимости от того, что подразумевается под вершинами сетевой

структурой i, j : регионы, транспортные районы, остановочные пункты транспорта, терминалы и т. п. Соответственно формирование транспортных пар (i, j) , объемов и структуры корреспонденций зависит от факторов, определяющих структуру и свойства потребительского поля. Эти факторы можно разбить на две группы:

- *топологические*, связанные с плотностью потребительского поля (уровнем дискретности), взаимным расположением его элементов и т. п.;
- *генетические*, связанные с характером размещения пунктов возникновения и завершения перевозок, численностью и структурой населения, показателями социальной принадлежности, структурой мест приложения труда.

В соответствии с указанными факторами можно выделить четыре класса задач моделирования корреспонденций, как это представлено в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Классификация задач моделирования корреспонденций

Генетические факторы	Топологические факторы	
	Сильно дискретное потребительское поле, корреспонденции планируют изолированно	Слабо дискретное потребительское поле, корреспонденции планируют с учетом взаимовлияния
Детерминированный характер транспортных связей	Класс 1. Задачи отыскания оптимальных транспортных связей	Класс 3. Задачи распределения поездок по сети с учетом детерминированного спроса
Вероятностный характер транспортных связей	Класс 2. Задачи планирования отдельных транспортных связей с учетом вероятностных факторов спроса на перевозки	Класс 4. Задачи распределения поездок по сети с учетом поведенческих гипотез

Сильно дискретное потребительское поле характерно для разреженного размещения точек возникновения и поглощения корреспонденций. В этом случае их можно планировать независимо друг от друга, так как возможности их замещения сильно ограничены такими внешними для системы факторами, как численность населенных пунктов, количество мест приложения труда и т. п.

Слабо дискретное потребительское поле характеризуется высокой плотностью размещения на исследуемой территории точек возникновения и поглощения корреспонденций. В такой ситуации необходимо учитывать взаимовлияние корреспонденций, так как под действием внутренних для системы факторов в этом случае возникают задачи самоорганизации.

К задачам **класса 1** относятся практически все задачи планирования грузовых перевозок. Этот класс задач относится к *задачам распределения*, так как процесс формирования корреспонденций может быть представлен как централизованно управляемый. Соответственно модели этого класса являются *оптимизационными*, чаще всего линейными, с целевой функцией технико-экономического содержания. К типичным задачам этого класса можно отнести транспортную задачу закрепления грузоотправителей однородного груза за грузополучателями, задачи маршрутизации при помашинных и мелкопартионных перевозках и т. п.

Задачи **класса 2** возникают при планировании пассажирских перевозок в пригородном и дальнем сообщениях на различных видах транспорта, а также при планировании грузовых перевозок на перспективу. Модели этого класса статистические самых разных видов: от простейших однофакторных до динамических многофакторных. Особенno распространены здесь *гравитационные модели*, которые в общем виде могут быть представлены следующей зависимостью:

$$Q_{ij} = v_i d_j \varphi_{ij}.$$

Модель получила название гравитационной потому, что корреспонденция Q_{ij} , т. е. сила связи между зонами (точками), пропорциональна произведению v_i и d_j , характеризующих «потенциал» этих районов, и некоторой функции взаимного притяжения этих районов φ_{ij} . Величины v_i и d_j обычно связаны с объемом отправлений и прибытий между зонами, а функция φ_{ij} в простейшем виде может быть принята в следующем виде:

$$\varphi_{ij} = a/C_{ij}^k,$$

где a – некоторая константа; k – коэффициент, учитывающий трудность транспортных связей между зонами (обычно принимается равным 2);

C_{ij} – расстояние между i и j или иной показатель, например затраты времени или стоимость поездки¹³.

Первая математическая модель корреспонденции между двумя транспортными районами гравитационного типа появилась более 100 лет назад, когда венский инженер фон Лилль исследовал железнодорожные пассажирские перевозки по направлению Вена – Брюнн – Прага и вывел математическую зависимость, которая впоследствии получила широкое распространение при расчетах транспортных потоков.

Для сбалансированности модели необходимо, чтобы все поездки из зоны зарождения были равны сумме прибытий из этой зоны в зоны притяжения, т. е. выполнялось следующее условие:

$$v_i = \sum_x Q_{ix} = av_i \sum_x \frac{d_x}{C_{ix}^k},$$

где x – количество зон притяжения поездок.

Из последнего выражения можно получить значение константы a , обеспечивающее сбалансированность генерируемых поездок:

$$a = \left(\sum_x \frac{d_x}{C_{ix}^k} \right)^{-1}.$$

С учетом этого выражения получаем *классическую форму гравитационной модели*

$$Q_{ij} = v_i \frac{d_j / C_{ij}^k}{\sum_x (d_x / C_{ix}^k)}.$$

Для иллюстрации использования гравитационной модели рассмотрим следующий пример. Исследуемый район разбит на 4 зоны.

¹³ Этот показатель часто называют сопротивлением транспортным связям между зонами или трудностью сообщения, так как он влияет на количество корреспонденций обратно пропорционально.

В табл. 3.3 приведены прогнозируемые объемы поездок по зонам, а в табл. 3.4 – расстояния между зонами.

Таблица 3.3
Характеристика транспортных зон

Зона	Объем поездок зарождения	Коэффициент притяжения
1	1500	0
2	0	3
3	2600	2
4	0	5

Таблица 3.4

Расстояния между зонами с учетом внутризонных перемещений

Зоны зарождения поездок i	Зоны притяжения поездок j			
	1	2	3	4
1	5	10	15	20
2	10	5	10	15
3	15	10	5	10
4	20	15	10	5

Выполним расчеты количества корреспонденций между зонами в табл. 3.5 для зон с наличием резидентов. Значение коэффициента k примем равным 2.

Для практического использования гравитационная модель нуждается в калибровке, которая заключается в определении значения коэффициента k . По сути, этот коэффициент определяет зависимость между фактором затрат времени на поездки и трудностью сообщения между зонами.

Фактором затрат времени называется величина, которая определяется из выражения

$$F_{ij} = 1/C_{ij}^k.$$

Для калибровки модели это выражение используется в логарифмическом виде, в котором коэффициент k определяет наклон линии, выражающей зависимость между логарифмами фактором затрат времени и трудностью сообщения:

$$\ln F = -k \ln C.$$

Процедура калибровки носит итерационный характер, в ходе которой добиваются приемлемого соответствия результатов расчетов и реальных объемов поездок между зонами, полученных на основе наблюдений.

Таблица 3.5

Результаты расчетов

j	d_j	C_{ij}^k	d_j / C_{ij}^k	Q_{ij}
$i = 1, v_1 = 1500$				
1	0	25	0	0
2	3	100	0,03	891
3	2	225	0,008	238
4	5	400	0,0125	371
Сумма			0,0505	1500
$i = 3, v_3 = 2600$				
1	0	225	0	0
2	3	100	0,03	488
3	2	25	0,08	1300
4	5	100	0,05	812
Сумма			0,16	2600

К **классу 3** можно отнести задачи определения трудовых корреспонденций в региональных транспортных системах, когда точно известны места приложения труда, их емкости и размещение потенциальных кадров на перспективу. В этом классе моделей, как и в моделях предыдущего класса, наиболее распространены гравитационные модели, но более усложненного вида за счет учета дополнительных условий.

К динамическим моделям этого класса в первую очередь относятся модели формирования транспортных связей, определяющие перспективный объем перевозок на основе прогнозирования роста существующего. Разновидности таких моделей приведены в табл. 3.6.

В модели общего фактора роста в качестве исходной информации используются фактические величины корреспонденций между транспортными районами города и прогноз их роста. Но в связи с тем, что он не учитывает динамику развития соотношений между отдельными параметрами города и соответственно приводит к грубым ошибкам.

кам, на практике он используется довольно редко, в основном – только лишь для приближенных оценок возможных транспортных потоков в условиях проектирования отдельных элементов города на ближайшую перспективу.

Таблица 3.6
Динамические модели прогнозирования перевозок

Наименование модели	Выражение для определения перспективных корреспонденций
Модель общего фактора роста	$Q_{ij}^{(n)} = F Q_{ij}$
Модель среднего арифметического фактора роста	$Q_{ij}^{(n)} = 0,5 (F_i + F_j) Q_{ij}$
Детройтский метод (модель среднего геометрического фактора роста)	$Q_{ij}^{(n)} = (F_i F_j / F) Q_{ij}$
Метод Фратара	$Q_{ij}^{(n)} = 0,5 F_i F_j (L_i + L_j) Q_{ij}$ при $L_i = \sum Q_{ij} / (\sum t_{ij} F_j),$ $L_j = \sum Q_{ij} / (\sum t_{ij} F_i),$ где t_{ij} – время поездки из i в j (трудность сообщения)

Модель среднего арифметического фактора роста, как и предыдущая, основывается на материалах обследования существующих корреспонденций между районами. Для расчетов используются средние коэффициенты роста для каждого из транспортных районов, которые рассчитываются на основании фактического и прогнозируемого потоков для этих районов. Хотя средние коэффициенты роста и учитывают различные темпы развития тех или иных районов города, однако при значительном росте подвижности населения, появлении новых жилых массивов или крупных промышленных зон этот метод приводит к большим погрешностям, а потому в проектной практике почти не применяется.

Детройтский метод, впервые примененный при проектировании системы магистралей Детройта в 1953 г., в отличие от предыдущей модели, помимо коэффициентов роста отдельных районов учитывает также и коэффициент роста для всего города. Он не сложен для расчетов, но позволяет получить более высокую точность прогноза, чем в предыдущем методе. Однако и он имеет некоторые недостатки. В частности, такой прогноз может значительно отличаться от окончательных корреспонденций. И это отличие будет тем больше, чем боль-

ше отличаются темпы роста отдельного района от темпа города в целом.

Метод Фратара был разработан в начале 50-х годов прошлого столетия в США профессором Томасом Дж. Фратаром. В нем используется итерационный процесс приближения к окончательному решению. Причем результаты расчета каждого промежуточного шага являются исходными данными для последующего. Этот процесс ведется до тех пор, пока не будет достигнуто равенство между заранее определенной величиной транспортного оборота района и суммой корреспонденций, полученной в результате расчета для этого района. Метод Фратара получил наибольшее распространение среди всех экстраполяционных методов формирования матрицы корреспонденций. Трудоемкие расчеты, предусмотренные этим методом, выполняются, как правило, при помощи компьютера.

К задачам **класса 4** относится прежде всего формирование пассажирских корреспонденций по всем видам поездок, включая культурно-бытовые и рекреационные поездки. При этом определяющую роль играют вероятностные факторы коллективного поведения. Модели этого класса, в основном, энтропийные.

Энтропийные модели представляются в форме нелинейной оптимизационной задачи математического программирования, причем целевая функция носит не технико-экономический, а «термодинамический» характер и включает вероятностные характеристики коллективного поведения. Вероятность появления корреспонденции можно оценить в соответствии со следующей формулой:

$$P_{ij} = t_{ij} / \sum t_{ij} \text{ при } \sum P_{ij} = 1.$$

Мера неопределенности возникновения той или иной корреспонденции определяется величиной энтропии

$$H = -\sum P_{ij} \log P_{ij}.$$

Энтропийная модель позволяет вместо средних величин характеристик передвижения учесть формирование корреспонденций, которое произойдет при отсутствии ограничений в транспортной системе за счет задания априорных условий. Задаются априорные условия в виде матрицы вероятностей X_{ij} , в которой можно учесть предпочтете-

ния для перемещений из зоны i в зону j , предпочтения по выбору вида транспорта и т. п. Это означает, что отыскиваются не просто сбалансированные значения Q_{ij} , но и наиболее близкие по вероятности к тем, которые сложились в реальной транспортной системе, т. е. соответствующие максимуму энтропии. Энтропийная модель этого вида может быть определена следующим образом:

$$\sum_{ij} Q_{ij} \ln \frac{X_{ij}}{Q_{ij}} \rightarrow \max,$$

$$\sum_j Q_{ij} = V_i, \quad \sum_i Q_{ij} = D_j, \quad Q_{ij} \geq 0.$$

Любая транспортная система имеет определенные ресурсные ограничения, поэтому в ограничениях модели необходимо учесть дополнительное условие

$$\sum_{ij} R_{ij}^k = R^k,$$

где R^k определяет ресурс системы k -го типа.

Третьим этапом определения спроса на транспортные услуги является **выбор пользователем способа поездки** (перевозки груза). Необходимо сразу отметить существенное влияние на этот выбор наряду с общими закономерностями индивидуальных предпочтений или субъективных факторов. В первую очередь на выбор влияют качественные характеристики данного способа поездки. Разные способы перемещения часто выбираются в зависимости от цели поездки. Например, часто для поездок на работу люди выбирают общественный транспорт, а для поездок с социальными целями – личный автомобиль. В процессе поездки выбор пользователя может измениться в зависимости от ситуации или изменившихся обстоятельств, не зависимых от поездки. На выбор способа поездки также влияют изменения стоимости стоянки, топлива, самочувствие человека, погодные условия и т. п. Нельзя исключать из рассмотрения и варианты мультимодальных поездок, когда одна поездка разделяется между несколькими видами транспорта, в том числе и по системе «Park and Ride».

В дополнение к перечисленным факторам при выборе способа совершения поездки необходимо учитывать социально-экономические характеристики групп населения. Основные из них – это возрастная группа, уровень дохода, количество автомобилей в семье и т. п.

Таким образом, факторы, влияющие на выбор пользователем способа поездки, можно разбить на три группы:

- характеристики данного вида транспорта;
- социально-экономический статус населения;
- характеристики поездки.

В модель выбора способа поездки факторы этих трех групп будут входить как независимые переменные и формировать долю населения, пользующуюся тем или иным видом транспорта.

Наиболее простые модели выбора способа поездки используют *эмпирические модели*, разделяющие спрос между видами транспорта по наиболее представительному фактору, как это показано на рис. 3.6. В этом примере определяется, какой вид транспорта будет выбран для поездки (личный или общественный – ГПТ) на основании разницы по продолжительности времени поездки.

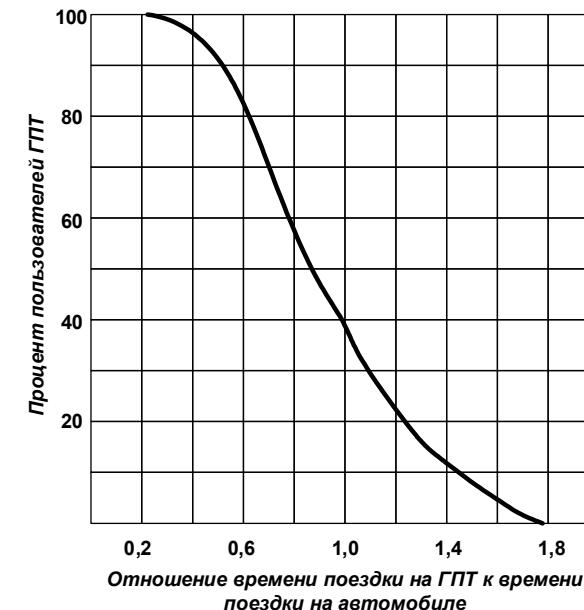


Рис. 3.6. Простейшая модель деления спроса по видам поездок

Более сложные эмпирические модели учитывают социально-экономический статус населения, характеристики способа передвижения и маршрута поездки. Например, профессор А. С. Михайлов предложил критерий выбора способа передвижения, основанный на следующей функции:

$$K_i = a_{1i} + a_{2i}L + (a_{3i}L + a_{4i})/D,$$

где a_{1i} – затраты времени, не зависящие от расстояния перемещения; a_{2i} – затраты времени на единицу расстояния перемещения; a_{3i} – издержки на единицу расстояния перемещения; a_{4i} – издержки, не зависящие от расстояния перемещения; L – расстояние перемещения; D – душевой доход субъекта перемещения; i – номер альтернативы выбора (пешее перемещение, на ГПТ, личном транспорте и т. п.).

В настоящее время эмпирические модели вытесняются *моделями, основанными на вероятностном дискретном выборе*. В качестве критерия выбора используется максимизация полезности для пользователя или минимизация его затрат. В модели дискретного выбора пользователь i , выбирающий способ поездки K , приобретает случайную полезность U_{ik} . Следовательно, обычно предполагается, что пользователь i максимизирует свою полезность, выбирая K таким образом, что U_{ik} – наибольшая из всех U_{ir} , $r = 1, \dots, K$. Вероятность того, что пользователь i выбирает K , можно вычислить, если известны распределения, лежащие в основе функции полезности. Для вычисления этой вероятности на транспорте наиболее широко используются логит-модели, так как они позволяют представить функцию полезности в наиболее простом линейном виде.

Логит-модель – это регрессионная модель оценки вероятности принятия биномиальной зависимой переменной одного из значений в диапазоне от 0 до 1. Термин «логит» был введен американским исследователем Джозефом Берксоном в 1944 г., так как в основе модели лежит использование логистической функции вида

$$F(z) = 1/(1 + e^{-z}),$$

где z представляется в виде линейной регрессии $z = a + a_1x_1 + \dots + a_kx_k$.

Вид этой функции приведен на рис. 3.7.

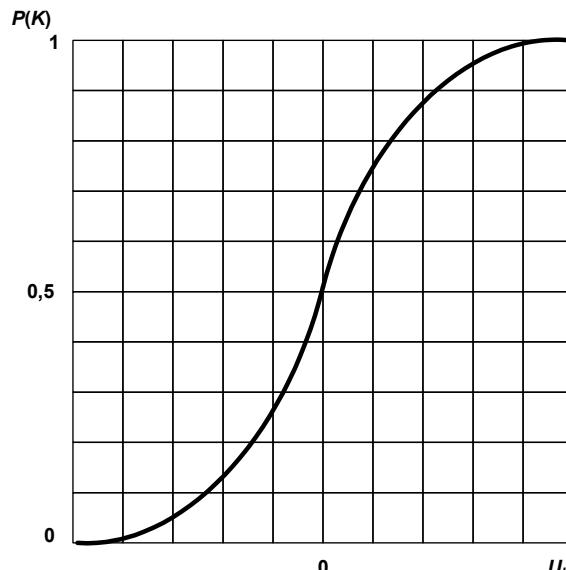


Рис. 3.7. Логистическая функция

Логистическая функция имеет следующие свойства, которые составляют основное преимущество перед линейными моделями:

1. Как видно из графика, вероятность положительного исхода в модели принимает значения из интервала от 0 до 1.
2. Предельный эффект переменной z непостоянен на всей протяженности функции и изменяется с изменением значения z .
3. Переменная z может принимать любые значения на множестве от минус до плюс бесконечности.

Мультиоминальная логит-модель вычисляет вероятность выбора пользователем способа поездки K , если этот выбор происходит в соответствии со следующей зависимостью:

$$P(K) = \frac{e^{U_K}}{\sum_X e^{U_K}}.$$

Рассмотрим применение логит-модели на примере определения количества поездок на личном и общественном транспорте. Исследования показали, что функция полезности при выборе способа поездки имеет следующий вид:

$$U_k = a_k - 0,025X_1 - 0,032X_2 - 0,015X_3 - 0,002X_4.$$

На горизонт прогноза при общем числе поездок 5000 в день исходные данные будут соответствовать значениям, приведенным в табл. 3.7.

Калибровка модели показала, что постоянная составляющая функции полезности – коэффициент a для личного транспорта будет равен 0, а для автобусного составит –0,1. Тогда результаты расчета можно представить в виде табл. 3.8.

Таблица 3.7

Исходные данные для логит-модели

Способ поездки	Доступность X_1 , мин	Время ожидания X_2 , мин	Время поездки X_3 , мин	Затраты X_4 , р.
Личный автомобиль	5	0	20	100
ГПТ	10	15	40	50

Таблица 3.8

Результаты расчетов

Показатель	Способ поездки	
	Личный автомобиль	ГПТ
Значение функции полезности U_K	–0,625	–1,53
Вероятность выбора $P(K)$	0,71	0,29
Число поездок в день	3550	1450

В этом примере функция полезности имеет отрицательное значение, так как в качестве исходных данных фигурируют затратные компоненты. Чем выше их значение, тем меньше желания у пользователя использовать этот способ поездки.

Подход, продемонстрированный в этом примере, позволяет не только спрогнозировать спрос на поездки, но и исследовать послед-

ствия принятия различных мер транспортной политики: повышение стоимости проезда, сокращение времени поездки и т. д.

Если исследуется развитая транспортная сеть, то используется *вложенная логит-модель*. Эта модель позволяет использовать дерево выбора различных альтернатив. Например, на первом уровне выбор может осуществляться между личным автомобилем и ГПТ, а на следующем уровне – между автобусом и трамваем.

Последний, *четвертый, этап* четырехшаговой процедуры определения спроса на транспортные услуги заключается в *распределении поездок по сети*. На этом этапе прогнозируется, каким путем пользователь будет перемещаться между зонами, и тем самым формируются различного вида транспортные потоки по сети. Решение задачи на этом этапе можно представить себе как *равновесную модель* между спросом на поездки, которые сформировались на предыдущих этапах процедуры, и возможностями путей сообщения с соответствующим уровнем обслуживания. Таким образом, на этом этапе необходимо исследовать возможности транспортной сети по пропуску транспортных потоков.

Количество возможных путей между какими-либо парами зон зависит от способа выполнения поездки. При поездке на личном автомобиле, как правило, водитель имеет выбор между несколькими вариантами маршрута. К тому же этот маршрут может быть изменен в процессе поездки. Поездка же на общественном транспорте может быть выполнена по ограниченному или даже по единственному возможному маршруту.

Перед распределением поездок по сети коснемся различия между поездкой пользователя и поездкой, выполняемой транспортным средством. Во-первых, необходимо учитывать *количество пользователей, перемещающихся в одном транспортном средстве*. Относительно общественного транспорта это определяется коэффициентом наполняемости, который может принимать различные значения в зависимости от типа ГПТ, интервала движения, дня недели, времени суток и т. п. Также необходимо учесть, что коэффициент наполняемости может дать разные значения числа пассажиров в ГПТ в зависимости от нормы наполняемости, которая в различной документации на подвижной состав может принимать значение от 3 до 8 чел./м². Для личных автомобилей количество пользователей в нем существенно зависит от цели поездки. Как правило, минимальные значения характерны для деловых поезд-

док, а максимальные – для рекреационных. Обычно вопрос количества пользователей в транспортном средстве решается на стадии выбора способа выполнения поездки путем использования вложенных логит-моделей, в которых на определенном подуровне прогнозируется количество поездок с одним водителем, водителем и пассажиром, водителем и двумя пассажирами и т. п.

При распределении потоков на сети необходимо определить их изменение в течение суток. Как правило, выполняют три отдельных распределения для утреннего «часа пик», вечернего «часа пик» и остального периода с учетом суточного баланса поездок. Естественно, наиболее критичным для пропускной способности транспортной сети является период утреннего «часа пик». В этот период поездки имеют направление от зон зарождения к зонам поглощения, тогда как вечером это направление изменяется на противоположное. В связи с этим на данном этапе матрицы зарождения–поглощения заменяются матрицами отправления–прибытия.

Ключом распределения транспортных потоков по сети является выявление закономерностей поведения пользователей. В 1952 г. профессор Вардроп предложил два независимых принципа выбора маршрута движения. Первый принцип заключается в том, что пользователи выбирают маршрут, минимизируя время поездки – пользовательское распределение. Согласно второму принципу пользователи распределяются по сети таким образом, что среднее время поездки всех пользователей одинаково – системное или нормативное распределение. Второй принцип Вардропа обеспечивает минимальные затраты на обеспечение поездок. Позднее был сформулирован третий принцип распределения поездок – случайное распределение, который исходит из того, что пользователь имеет неполную информацию о маршруте, обеспечивающем минимальное время поездки, и таким образом выбирает маршрут не перед, а в процессе поездки, который не объективно, а только с его точки зрения является самым быстрым.

Обычно критерием распределения поездок по сети является время поездки, которое ассоциируется с затратами пользователя. В развитых моделях в качестве критерия используется понятие общих затрат, которые учитывают время поездки, потребление топлива, плату за дороги, среднюю скорость, количество остановок и т. п.

Необходимо обратить внимание, что только второй и третий принципы обеспечивают распределение поездок по всей транспортной сети,

тогда как первый принцип Вардропа распределяет поездки только по маршрутам с минимальным временем поездки от пункта отправления до пункта назначения.

Из сути трех принципов распределения поездок следует, что *â ёþ á î ñёó÷åå â èô î ñí î åå èåæèò построение дерева кратчайших расстояний*. На следующем шаге на дуги сети, входящие в дерево кратчайших расстояний, необходимо распределить поездки. Здесь используется несколько подходов. Первый подход получил название «все или ничего» и заключается в том, что все поездки между зонами распределяются на дуги, входящие в дерево кратчайших расстояний. Таким образом, все пользователи для поездки выбирают одни и те же маршруты. На самом деле так не происходит, поэтому ближе к действительности второй подход, при котором поездки распределяются по нескольким путям в порядке возрастания трудности сообщения. Вероятность выбора того или иного пути может быть определена из следующего соотношения:

$$P(r) = \frac{W_{ijr}^{-1}}{\sum_x W_{ijx}^{-1}},$$

где W_{ijr} – трудность сообщения от i до j по маршруту r ; x – количество возможных маршрутов.

На практике два описанных подхода не могут быть использованы в чистом виде, так как возникает противоречие между стремлением распределить возможно большее количество поездок по наиболее коротким маршрутам для сокращения времени их выполнения и снижением скорости транспортного потока при повышении его интенсивности. Поэтому необходимо не допускать слишком высокой интенсивности поездок по дугам сети. В качестве ограничения распределения поездок на отдельную дугу используется метод, когда трудность сообщения корректируется в зависимости от количества поездок, распределенных на данный маршрут. Для этого может использоваться следующая зависимость для трудности сообщения в зависимости от интенсивности движения по данному пути¹⁴:

¹⁴ Traffic Assignment Manual // Bureau of Public Roads. Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington. 1964.

$$W = W_0 [1 + \alpha(N/N_{\max})^\beta],$$

где W_0 – трудность сообщения без учета интенсивности движения; N – интенсивность движения по данному пути; N_{\max} – предельная интенсивность движения установившегося потока.

Значения параметров α и β зависят от типа дороги, ограничения скоростного режима, используемых технических средств регулирования движения и т. п. Например, для скоростной дороги непрерывного движения при ограничении скорости 110 км/ч $\alpha = 0,83$ и $\beta = 5,5$. Для многополосной городской дороги $\alpha = 0,71$ и $\beta = 2,1$.

В Великобритании для оценки потерь пользователя при выборе маршрута поездки используются следующие зависимости¹⁵:

$$W = \begin{cases} \frac{L}{v_0} & N < N_0 \\ \frac{L}{v_0 + \frac{v_0 - v_{\max}}{N_0 - N_{\max}} N_0 - \frac{v_0 - v_{\max}}{N_0 - N_{\max}} N} & N_0 < N < N_{\max}, \\ \frac{L}{v_{\max}} + \frac{N/N_{\max} - 1}{8} & N > N_{\max} \end{cases}$$

где L – протяженность поездки; v_0 – скорость свободного потока; N_0 – интенсивность движения при свободном потоке; v_{\max} – скорость потока при интенсивности движения N_{\max} , когда условия свободного потока остаются превалирующими.

Типичные значения в этой зависимости приведены в табл. 3.9.

Результаты, наиболее приближенные к практике, дают модели, в которых учитывается психология поведения водителей. Исследования показали, что водители при выборе маршрута пытаются найти компромисс между длиной маршрута и временем поездки. В общем виде такая оценка может быть представлена в следующем виде:

$$C = aL + bT,$$

где a и b – весовые коэффициенты предпочтения пользователей; T – время поездки.

Таблица 3.9

Типичные значения скорости потока и его интенсивности по одной полосе дороги, используемые в Великобритании

Тип дороги	v_0 , км/ч	v_{\max} , км/ч	N_0 , ед./ч	N_{\max} , ед./ч
Однополосная загородная	63	55	400	1400
Двухполосная загородная	79	70	1600	2400
Однополосная городская	45	25	500	1000

Моделирование выбора пользователем поездки на общественном транспорте является во многом более трудной задачей, чем распределение поездок автомобилей по сети по следующим причинам:

- Транспортная сеть ГПТ помимо автомобильных дорог может включать внеуличные отрезки пути рельсового транспорта. По некоторым улицам могут проходить выделенные полосы для движения ГПТ, общественный транспорт перемещается между остановками, и поэтому сеть общественного транспорта более сложна для моделирования.

- На общественном транспорте моделируется движение пассажиров, а не автомобилей. Пассажир должен достичь остановки, выбрать вид транспорта и маршрут для достижения цели поездки. Задача существенно усложняется, если пассажир имеет возможность выбора между несколькими маршрутами и видами ГПТ для достижения одного и того же пункта. Вблизи остановки он может зайти в магазин или кафе и только потом воспользоваться общественным транспортом. Все это требует наличия в модели дополнительных моделирующих поведение пользователя алгоритмов.

- Прямые затраты владельца автомобиля в целом прямо пропорциональны расстоянию поездки. Это не может быть распространено на пассажира ГПТ и зависит от тарифной системы, используемого способа оплаты проезда (разовый билет на поездку, на определенное время или количество дней или на несколько поездок).

При выборе пользователем способа поездки на общественном транспорте его затраты могут быть представлены следующим выражением:

¹⁵ Traffic Appraisal Manual // Department of Transport. HMSO, London. 1985.

$$C = a_1 t_{\text{д}} + a_2 t_{\text{п}} + a_3 t_{\text{ож}} + a_4 t_{\text{пер}} + a_1 t_3 + a_5 c_{\text{т}},$$

где $t_{\text{д}}$ – время поездки на ГПТ между требуемыми остановками; $t_{\text{п}}$ – время пешего передвижения до остановочного пункта отправления и от остановочного пункта прибытия; $t_{\text{ож}}$ – время ожидания прибытия ГПТ; $t_{\text{пер}}$ – время пересадки между маршрутами или видами ГПТ; t_3 – среднее время случайной задержки; $c_{\text{т}}$ – величина оплаты проезда; a_1 – a_5 – весовые коэффициенты для указанных составляющих затрат.

Задачу выбора оптимальной стратегии поездки от i до j можно описать следующей линейной функцией, минимизирующей сумму переменных, отображающих затраты, связанные с продолжительностью поездки и ожидания пассажиров:

$$\min \left\{ \sum_s Q_k t_{\text{д}} + \sum_{ij} \tau_{\text{ож}} \right\},$$

$$\tau_{\text{ож}} = Q_{ij} / \sum_{k \in S_{ij}} n_k,$$

где Q_k – количество пассажиров на участке маршрута k , прилегающем к узлу i ; s – массив участков, прилегающих к узлу i и входящих в возможный маршрут от i до j ; $\tau_{\text{ож}}$ – величина, отображающая затраты пассажиров на ожидание транспорта; Q_{ij} – количество пассажиров, желающих воспользоваться маршрутным транспортом от i до j ; n_k – интенсивность отправления пассажиров (частота движения) по участку маршрута k .

Учитывая, что количество пассажиров, которые могут воспользоваться участком маршрута k , равно сумме прибывающих в узел i пассажиров по всем участкам, можно выразить ограничение для количества пассажиров, которые могут воспользоваться участком k :

$$Q_k \leq n_k \tau_{\text{ож}}.$$

Тогда стратегию выбора можно представить следующей гиперболической функцией:

$$\min \left\{ \sum_{ij} \frac{Q_{ij} \left(\sum_s t_{\text{д}} n_k + 1 \right)}{\sum_{k \in S_{ij}} n_k} \right\}.$$

Данная стратегия реализована, например, в программном комплексе EMME/2 канадской компании INRO Consultants Inc., предназначенному для перспективного планирования городского транспорта.

В транспортных исследованиях традиционно наиболее широко представлены работы в области оптимизации движения легкового транспорта в городах и менее всего внимания уделяется грузовым автомобилям. Однако в последнее время более жесткие требования к охране окружающей среды, в том числе к шуму, заставляют специалистов более подробно исследовать проблемы оптимизации грузового движения.

Для **оптимизации грузового движения** используется традиционный четырехшаговый подход, учитывающий характерные особенности перевозки грузов.

Непосредственный анализ географии и объемов по большинству грузовых потоков может быть выполнен по отдельным видам грузов на основании исследования статистики работы различных отраслей промышленности. Это дает надежные результаты для междугородных перевозок, но плохо подходит для исследования перевозок грузов в городе.

Хорошие результаты могут быть получены на основе анализа статистики по объемам производства и потребления продукции в исследуемом регионе.

Для прогноза изменения грузопотоков могут использоваться традиционные методы, в том числе рассмотренные выше.

Для оценки потребности в грузовых перевозках широко используются линейные регрессионные зависимости, по которым определяют соотношение между численностью и социальным составом жителей и объемами потребления товаров, вывоза бытовых отходов и т. п. Также при этом могут учитываться такие показатели, как емкость складов, площади торговых центров и зон отдыха.

Для распределения грузовых перевозок по зонам традиционная гравитационная модель используется в следующей форме:

$$Q_{ij} = A_i B_j O_i D_j \exp(-\beta C_{ij}),$$

где A_i, B_j – факторы, величина которых определяется для зон отправления и прибытия при балансировке модели; O_i – объем отправления грузов; D_j – объем прибытия грузов; β – коэффициент калибровки модели; C_{ij} – затраты на перемещение единицы продукции между зонами.

В связи с тем, что коэффициент использования пробега, как правило, имеет значение около 0,5, т. е. на каждую груженую езду приходится холостая, это необходимо учитывать при планировании загрузки транспортной сети. Обычно в простейшем случае холостые ездки учитываются как некоторая доля от ездок с грузом, но в обратном направлении. Тогда суммарное количество поездок между зонами

$$z_{ij} = \frac{1}{q_\Phi} (Q_{ij} + k Q_{ji}),$$

где q_Φ – фактическая грузоподъемность транспортного средства; k – коэффициент, определяемый опытным путем как функция от объема перевозок и расстояния между зонами.

Как правило, задача распределения по зонам решается отдельно для каждого типа груза по укрупненной номенклатуре.

Затраты на доставку грузов принято определять по следующей зависимости, хотя, если имеются точные данные, их использование предпочтительнее:

$$C_{ij} = c_{ij} + b_1 t_{ij} + b_2 \sigma t_{ij} + b_3 \tau_{ij} + b_4 p_{ij},$$

где c_{ij} – стоимость перевозки для заказчика услуги из зоны i в зону j ; t_{ij} – продолжительность перевозки; σt_{ij} – отклонение времени доставки; τ_{ij} – время между заказом и моментом доставки; p_{ij} – вероятность повреждения или потери груза во время перевозки; $b_1 - b_4$ – весовые коэффициенты для используемых факторов.

Анализируя форму гравитационной модели для грузовых перевозок, легко заметить, что если значение коэффициента β стремится к 0,

то стоимость перевозки не влияет на предпочтения заказчиков. Если значение β достаточно велико, то стоимость становится решающим фактором и проблема сводится к распределительной задаче линейного программирования.

$$\min \left\{ \sum_{ij} Q_{ij} C_{ij} \right\} \text{ при } \sum_i Q_{ij} = D_j; \sum_j Q_{ij} = O_i.$$

Распределение перевозок по сети выполняется в зависимости от возможности проезда грузовых автомобилей по дорожной сети отдельно по группам грузоподъемности.

3.4. Имитационное моделирование транспортных систем

Имитационное моделирование – это разновидность математического моделирования, в котором описание модели задается в виде алгоритмов поведения и взаимосвязи элементов моделируемой системы. Используемые алгоритмы позволяют имитировать как поведение элементов системы, так и всей системы в целом, а также определять требуемые параметры функционирования системы.

Имитационное моделирование может быть детерминированным или стохастическим, статическим или динамическим.

В *стохастических статических моделях* значения исходных вероятностных параметров формируются с помощью датчиков случайных чисел, после чего определяются значения других параметров по задаваемым функциональным зависимостям. Многократный прогон модели позволяет собрать статистику о параметрах модели и по ней определить их статистические характеристики.

Динамические модели имитируют поведение системы во времени и позволяют исследовать работу системы в заданном временном диапазоне или прогнозировать ее работу в будущем. В таких моделях используются понятия *событие*, *процесс*, *активность*. *Событие* – это изменение состояния системы, причем событие происходит мгновенно. В промежутке между двумя событиями модель остается неизменной. *Процесс* – это последовательность логически или технологически связанных единой целью активностей, а *активность* – это элемен-

тарная работа по переводу системы из одного состояния в другое. Активность начинается и завершается событием (рис. 3.8).

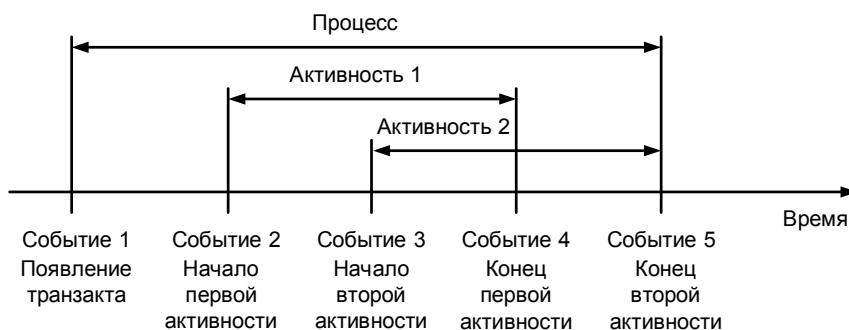


Рис. 3.8. События, активности и процессы

В имитационных динамических моделях используется пять подходов к ее описанию (концепций):

- **просмотр активностей.** Он позволяет определить реакцию системы на поступление команд, возникновение потребности в информационных или материальных ресурсах. Активность характеризуется временем выполнения и потребляемыми ресурсами. Каждый элемент системы имеет определенный набор активностей для реакции на определенные воздействия. В ходе их проявления складываются картина функционирования системы, достигаемые показатели и требуемые для этого ресурсы. Этот подход наиболее близок к объектно-ориентированному подходу;
- **реализация событий.** Эти события представляют собой переход элемента или в целом системы из одного состояния в другое. События характеризуются условиями возникновения и допустимыми реакциями элемента или системы, для которого произошло данное событие. События возникают в системе по определенным законам и вызывают в качестве реакции выполнение в ней различных процессов;
- **обслуживание транзактов** – абстрактных понятий элементов моделируемой системы. Транзакты могут отражать реальные объекты или объекты, введенные в модель для выполнения каких-либо действий. Это, например, счетчики времени – таймеры. С каждым типом транзакта связана своя логическая схема операций, задающая условную или

безусловную последовательность операций, выполняемых с транзактом данного типа. Такая схема называется *сегментом*. Операция характеризуется временем выполнения, которое может быть детерминированным или стохастическим. Таким образом, состояния транзакта определяются операциями, с которыми связан транзакт;

- **управление агрегатами.** Оно предусматривает описание модулей модели по унифицированной структуре. Полученный набор агрегатов отражает поведение элементов и их взаимодействие в системе;
- **выполнение процессов.** Процесс характеризуется длительностью выполнения, результатом, необходимыми ресурсами, условиями запуска и останова. Процесс в системе может быть активен (выполняться) или находиться в ожидании.

Практически любая система может быть описана одним из пяти перечисленных подходов. В зависимости от особенностей системы это влияет на трудоемкость моделирования, затраты времени и объем создаваемой модели.

Фундаментальным понятием имитационного моделирования является **модельное время** и управление им. Модельное время T_s – это представление *физического времени* T_p в модели. Так, работу предприятия в модельном времени можно представить отрезком времени от 8 до 17 ч, за единицу модельного времени h можно принять временной интервал в 1 мин, 10 мин, 30 мин, 1 ч и т. д. $T_s = T_p/h$.

Продолжительность работы модели при ее работе (прогоне) на компьютере называется *процессорным временем*. Так, например, моделирование предприятия может занять 1 ч работы на компьютере. Иногда (при использовании тренажеров) продвижение модельного времени должно быть синхронизировано с процессорным. Такое моделирование называют *моделированием в реальном времени*. Для управления модельным временем в модели используется специальный счетчик модельного времени – таймер. Таймер может управляться двумя способами.

При имитации *по способу фиксированного шага* значение таймера увеличивается с постоянным шагом. На каждом шаге проверяется наступление в системе события. Если событие зафиксировано, то в модели выполняются соответствующие действия по заданному алгоритму и таймер выполняет следующий шаг. Если событие не наступило, то таймер отсчитывает шаги до наступления события.

При имитации по способу шагов до следующего события таймер меняет значение модельного времени только в моменты наступления событий. Процесс моделирования выполняется от события к событию. Этот способ получил большее распространение из-за повышения скорости моделирования.

При разработке имитационной модели последовательно выполняются следующие *этапы работы*:

- 1) формулировка задачи, выбор целевой функции и ограничений системы;
- 2) формализация описания системы, определение характеристик элементов и взаимозависимостей;
- 3) подготовка исходных данных для модели, включая контрольный пример с известными результатами для верификации работы модели;
- 4) разработка модели и ее реализация в виде компьютерной программы – трансляция модели;
- 5) планирование машинного эксперимента для определения числа прогонов модели;
- 6) проведение моделирования;
- 7) анализ полученных результатов, их интерпретация, документирование и реализация в исследуемой системе.

При имитационном моделировании используется различная математическая основа. Это марковские процессы, дифференциальные уравнения, конечные и вероятностные автоматы и т. д. Существенная часть имитационных моделей на транспорте строится на основе **теории массового обслуживания**. Первые труды по теории массового обслуживания принадлежат датскому ученому А. К. Эрлангу, которые были опубликованы в 1909 г. и выполнены на примере проектирования телефонных сетей.

С помощью теории массового обслуживания решаются задачи организации и планирования процессов, в которых, с одной стороны, постоянно в случайные моменты времени возникает требование выполнения каких-либо работ, а с другой – постоянно происходит удовлетворение этих требований, время выполнения которых является также случайной величиной. Перед теорией стоит задача достаточно полно описать суть происходящих явлений и установить с достаточной для практики точностью количественную связь между числом постов

обслуживания, характеристиками входящего потока требований (заявок) и качеством обслуживания. При этом под качеством обслуживания понимается, насколько своевременно проведено обслуживание поступивших в систему требований.

Система массового обслуживания (СМО) характеризуется структурой, которая определяется составом входящих в нее элементов и функциональными связями между ними.

Требование – это запрос на удовлетворение некоторой потребности в выполнении работ.

Очередь требований – это число требований, которые ожидают обслуживания. Очередь характеризуется своей величиной, которая, как правило, переменная, и средним временем простоя одного требования в ожидании обслуживания ($t_{\text{об}}$).

Входящий поток – совокупность требований, поступающих с определенной закономерностью. Входящий поток характеризуется своей интенсивностью λ , нагрузкой на одно требование q и законом распределения, который описывает распределение требований по времени.

Выходящий поток – это поток требований, покидающих систему обслуживания. Требования этого потока могут быть обслужены или не обслужены в системе. Этот поток может оказаться входящим для другой группы обслуживающих устройств.

Обслуживающие устройства – средства, которые осуществляют обслуживание. Обслуживающие устройства характеризуются в первую очередь своей производительностью v и законом времени обслуживания требований.

Обслуживающая система – совокупность обслуживающих устройств.

Производительность обслуживающего устройства, которая часто называется интенсивностью обслуживания, определяется по формуле

$$v = 1/t_{\text{об}}.$$

Интенсивность поступления требований – это среднее число требований, поступающих в систему или покидающих ее за единицу времени:

$$\lambda = 1/T,$$

где T – среднее значение интервала между поступлением очередных требований.

Для автомобилей *нагрузка на одно требование* будет совпадать со средней величиной фактической грузоподъемности автомобилей.

Представить случайные события в виде потока во времени можно с помощью рис. 3.9, на котором τ_j – интервал между событиями (случайная величина); t_{ci} – момент совершения i -го события (отсчитывается от $t = 0$); T_h – время наблюдения.

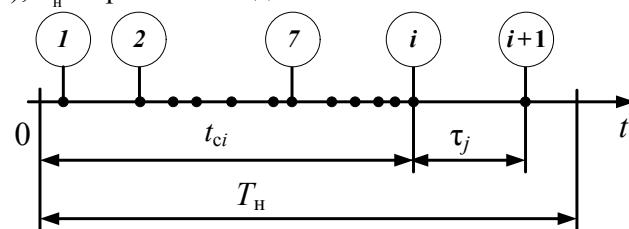


Рис. 3.9. Поток случайных событий

Любая СМО имеет *дисциплину очереди*, т. е. порядок обслуживания поступающих требований. Например, первое поступившее требование обслуживается первым, первым обслуживается последнее поступившее требование, принимается случайный порядок обслуживания поступающих требований, обслуживание определенных заявок в первую очередь (требования с приоритетом) и т. п.

Процесс поступления в систему массового обслуживания потока требований и время их обслуживания являются *случайными величинами*, которые могут быть дискретными и непрерывными. Множество значений *дискретной случайной величины* конечно. Например, входящий поток прибывающих на заправочную станцию автомобилей дискретен, так как прибытие автомобилей происходит в определенные моменты времени. Множество значений *непрерывной случайной величины* представляет собой множество всех точек, принадлежащих какому-либо интервалу числовой оси. Например, время заправки автомобилей является непрерывной случайной величиной, так как может иметь в определенном диапазоне любые числовые значения.

Для того чтобы задать случайную величину, необходимо задать множество значений, которые она может принимать. Однако одного перечня значений случайной величины еще недостаточно для каких-

либо существенных выводов. Нужно еще знать, как часто, т. е. с какой вероятностью, она принимает эти значения. Ответ на поставленный вопрос дает исчерпывающая характеристика случайной величины – закон ее распределения.

Закон распределения представляет собой соотношение, позволяющее определить вероятность появления случайной величины в любом интервале (и, в частности, вероятности любых значений случайной величины). Основными формами закона распределения являются ряд распределения, функция распределения и плотность распределения.

Ряд распределения представляет собой таблицу, в которой перечислены возможные значения случайной величины и соответствующие им вероятности:

$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$ – i -е значение случайной величины.

$p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_n$ – вероятность появления i -го значения величины x .

При этом $\sum p_i = 1$.

Эмпирический ряд распределения представляет собой таблицу, в которой перечислены наблюдаемые значения (фактические реализации) случайной величины и соответствующие им частоты:

$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$ – i -я фактическая реализация случайной величины.

$m_1 \ m_2 \ m_3 \ \dots \ m_n$ – количество появлений (частота) величины x .

Ряды распределения, образованные из значений случайной величины, характеризующей качественный признак, называются *атрибутивными*. Ряды распределений, образованные из значений случайной величины, характеризующей количественный признак явления (события), называются *вариационными*.

Ряд распределения не может служить характеристикой непрерывной случайной величины, поскольку значения этой величины нельзя перечислить, так как множество их несчетно. Для характеристики непрерывной случайной величины определяют вероятность появления значения случайной величины меньшего x , где x – текущая переменная, т. е. определяют вероятность события $X < x$. Вероятность этого события зависит от x , т. е. является функцией x . Эта функция называется *функцией распределения* случайной величины X и обозначается $F(x)$:

$$F(x) = P(X < x).$$

Таким образом, функцией распределения случайной величины X называется функция аргумента x , равная вероятности того, что случайная величина X примет любое значение, меньшее x .

Вероятность попадания случайной величины в полузамкнутый интервал $[a, b)$ равна разности значений функции распределения в точках b и a :

$$P(a \leq X < b) = F(b) - F(a).$$

Функция распределения есть неубывающая функция, значения которой начинаются с нуля и доходят до единицы. Функцию распределения дискретной случайной величины можно определить, зная ее ряд распределения, по формуле

$$F(x) = \sum P(x_i) \text{ для } x_i < x.$$

Следует отметить, что функция распределения дискретной случайной величины увеличивается скачками каждый раз, когда X при своем изменении проходит через какое-нибудь из возможных значений x , причем величина скачка равна вероятности этого значения. Между двумя соседними значениями величины X функция $F(x)$ постоянна.

Поскольку для непрерывной случайной величины нельзя использовать в качестве характеристики вероятность появления ее отдельных значений, то определяют вероятность появления случайной величины в пределах малого интервала $[x, x + \Delta x]$, примыкающего к x . Разделив эту вероятность на длину интервала Δx , находят среднюю плотность вероятности и при неограниченном уменьшении длины интервала переходят к пределу, который является плотностью распределения в точке x ,

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x \leq X < x + \Delta x)}{\Delta x}.$$

Плотность распределения $f(x)$ есть предел отношения вероятности попадания случайной величины на малый участок и длины этого участка при ее неограниченном уменьшении.

Вероятность попадания случайной величины на произвольный участок $[a, b)$

$$P(a \leq X < b) = \int_a^b f(x) dx.$$

График плотности распределения называется *кривой распределения*, лежащей в верхней полуплоскости. Кривая распределения совместно с осью абсцисс ограничивает площадь, равную единице (рис. 3.10).

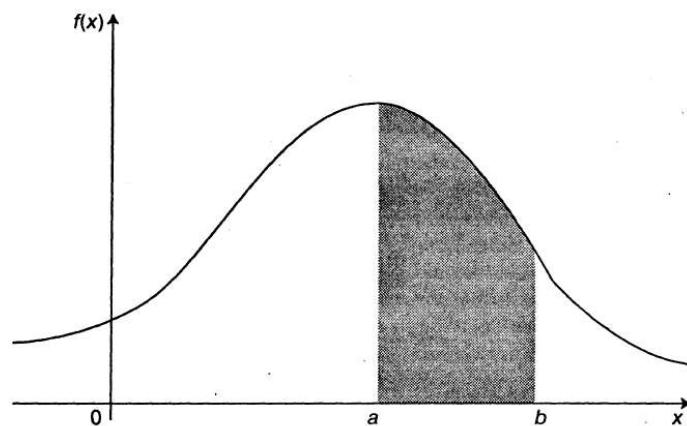


Рис. 3.10. График плотности распределения

Вероятность попадания на участок $[a, b)$ равна площади, ограниченной кривой распределения, опирающейся на участок $[a, b)$.

Для оценки особенностей законов распределения случайных величин определяют числовые характеристики этих величин.

Среднее значение, или математическое ожидание дискретной случайной величины, вычисляется по формуле

$$M[x] = m_x = a = \sum_{i=1}^n x_i p_i.$$

Для непрерывной случайной величины X математическое ожидание определяется интегралом:

$$M[x] = a = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx.$$

Дисперсией называется математическое ожидание квадрата отклонений случайной величины от своего математического ожидания:

$$D_x = \sigma_x^2 = M[(X - m_x)^2].$$

Чем больше дисперсия, тем в среднем больше отклонение значений случайной величины относительно математического ожидания, т. е. будет больше рассеивание случайной величины.

Дисперсия дискретной случайной величины вычисляется по формуле

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p(x_i).$$

Дисперсия непрерывной случайной величины

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 p(x)dx.$$

Наряду с дисперсией случайной величины в качестве характеристики рассеивания случайной величины используется *среднее квадратическое отклонение* σ , которое равно положительному значению корня квадратного из дисперсии. Среднее квадратическое отклонение имеет одинаковую размерность со случайной величиной, в этом состоит ее преимущество относительно дисперсии.

Величины σ^2 и σ показывают абсолютное отклонение от среднего значения случайной величины, что недостаточно характеризует уровень ее рассеивания. Относительной характеристикой рассеивания является *коэффициент вариации*, вычисляемый как отношение среднего квадратического отклонения и эмпирической средней:

$$V = \sigma/a.$$

Коэффициент вариации может использоваться для сравнения меры рассеивания случайных величин, имеющих различную размерность.

Для моделирования случайных величин наиболее удобно использовать известные законы распределения. Для **дискретных величин** наиболее часто используются биномиальное распределение и распределение Пуассона.

Биномиальное распределение. Это распределение числа X – появления события A в серии из n независимых испытаний. Вероятность наступления события A в каждом испытании равна p , а вероятность его отсутствия $q = 1 - p$. В каждом испытании возможны два исхода: наступление или ненаступление события A . При сформулированных условиях ряд распределения числа появления события A определяется формулой Бернуlli

$$P_n(X = m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}, \quad m = 1, 2, \dots, n,$$

где $P_n(X = m)$ – вероятность появления события A – равна m раз в серии из n испытаний.

Характер биномиального распределения определяется двумя параметрами: p и n . На рис. 3.11 показаны примеры биномиального распределения для некоторых значений этих величин.

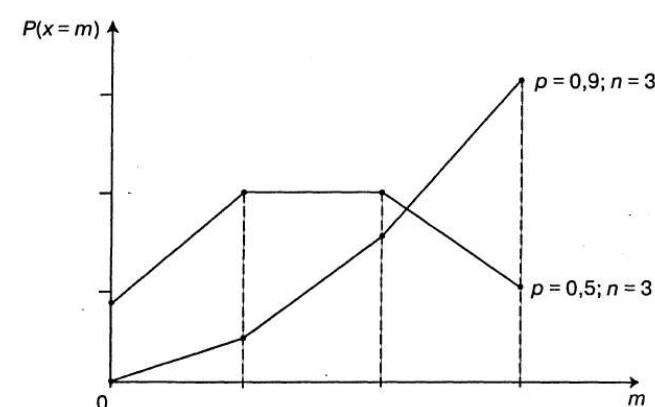


Рис. 3.11. Примеры биномиального распределения

Математическое ожидание $a = np$, дисперсия $D_x = np(1 - p)$.

Использование биномиального распределения можно пояснить следующим далее примером. Известно, что 10 % автомобилей не соответствует требованиям по содержанию вредных веществ в выхлопных газах. Определить вероятность наличия автомобилей, не соответствующих требованиям, среди четырех, выбранных случайным образом.

Вероятность, что среди четырех выбранных все автомобили будут соответствовать требованиям, $P_4(0) = (4!/(0! 4!))0,1^0 \cdot 0,9^4 = 0,6561$; один не будет соответствовать требованиям, $P_4(1) = (4!/(1! 3!))0,1^1 \times 0,9^3 = 0,2916$; два не будут соответствовать требованиям, $P_4(2) = (4!/(2! 2!))0,1^2 \cdot 0,9^2 = 0,0486$; три не будут соответствовать требованиям, $P_4(3) = (4!/(3! 1!))0,1^3 \cdot 0,9^1 = 0,0036$; все четыре не будут соответствовать требованиям, $P_4(4) = (4!/(4! 0!))0,1^4 \cdot 0,9^0 = 0,0001$.

Распределение Пуассона. Данное распределение является предельным случаем биномиального распределения. Предположим, что в биномиальном распределении $p \rightarrow 0$, а $n \rightarrow \infty$, так, что $np \rightarrow a > 0$. Тогда плотность вероятности биномиального распределения принимает вид распределения Пуассона:

$$P(x = m) = (a^k/k!) \exp(-a), k = 1, 2, \dots, m.$$

Заметим, что распределение Пуассона зависит только от одного параметра – математического ожидания. Дисперсия случайной величины X , имеющей распределение Пуассона, численно равна ее математическому ожиданию. Этим свойством пользуются для оценки близости эмпирического распределения к распределению Пуассона. На рис. 3.12 показаны примеры распределения Пуассона, отвечающие различным значениям математического ожидания.

Для **непрерывных величин** наиболее часто используются следующие далее законы распределения.

Нормальное распределение. Наиболее известным непрерывным распределением является нормальное. Плотность нормального распределения определяется по формуле

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma_x^2}\right].$$

Отклонения случайной величины X от математического ожидания практически заключены в интервале $\pm 3\sigma$, при этом вероятность попадания X в данный интервал равна 0,9973, а в интервале $\pm 2\sigma - 0,954$.

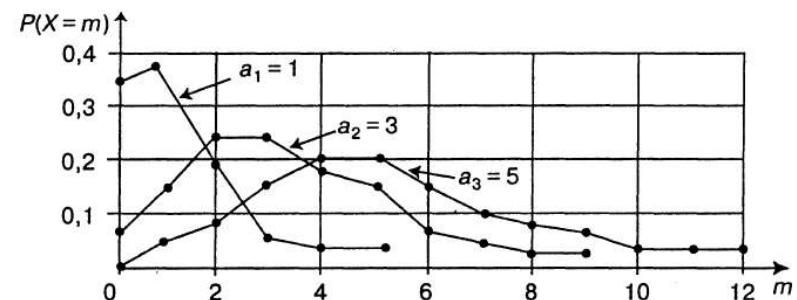


Рис. 3.12. Примеры распределения Пуассона

При значениях $a = 0$ и $\sigma_x = 1$ нормальную кривую называют нормированной, а соответствующий закон распределения **стандартным нормальным законом распределения**. Его функция распределения имеет вид

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz.$$

Значения функции стандартного нормального закона распределения табулированы и могут быть найдены в соответствующих справочниках.

Путем подстановки $z = (x - a)/\sigma_x$ нормальное распределение с произвольными параметрами a и σ_x приводится к стандартному виду.

Гамма-распределение и распределение Эрланга. Неотрицательная случайная величина X имеет гамма-распределение, если ее плотность распределения вычисляется по формуле

$$f(x) = [\lambda^k x^{k-1} \exp(-\lambda x)]/\Gamma(k),$$

где $k > 0$ и $\lambda > 0$; $\Gamma(k)$ – гамма-функция

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} \exp(-t) dt.$$

Если k – целое неотрицательное число, то $\Gamma(k) = k!$

Математическое ожидание случайной величины X , подчиненной гамма-распределению, $a = k/\lambda$. При этом дисперсия величины X

$$D_x = k/\lambda^2.$$

При целом $k > 1$ гамма-распределение превращается в распределение Эрланга k -го порядка, т. е.

$$f(x) = [\lambda x^{k-1} \exp(-\lambda x)]/(k-1)!$$

Закону Эрланга k -го порядка подчинена сумма независимых случайных величин $x_1 + x_2 + \dots + x_k$, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону с параметром λ .

При $k = 1$ гамма-распределение превращается в экспоненциальное распределение с параметром λ .

Экспоненциальное распределение. Непрерывная случайная величина X имеет экспоненциальное распределение, если ее плотность распределения выражается формулой

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x), x > 0.$$

Положительная величина x является параметром показательного распределения. Функция распределения случайной величины X выглядит следующим образом:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x), \lambda > 0, x > 0.$$

Математическое ожидание случайной величины X , имеющей экспоненциальное распределение, обратно его параметру, т. е. $m_x = 1/\lambda$. Дисперсия

$$D_x = 1/\lambda^2.$$

Отсюда $\sigma_x = 1/\lambda$, т. е. $\sigma_x = m_x$. Следовательно, коэффициент вариации случайной величины X , имеющей экспоненциальное распределение, равен 1.

Существует важное соотношение между пуассоновским и экспоненциальным распределениями. Если случайная величина подчинена закону Пуассона и представляет собой число отказов в единицу времени, то случайная величина, которая определяет промежуток времени между двумя последовательными отказами, распределена по экспоненциальному закону. Экспоненциальное распределение можно, в сущности, вывести из распределения Пуассона.

Равномерное распределение. Непрерывная случайная величина X имеет равномерное распределение на отрезке $[a, b]$, если на этом отрезке плотность распределения постоянна, а вне его – равна 0.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b; \\ 0, & x \geq b, \quad x \leq a. \end{cases}$$

Кривая равномерного распределения показана на рис. 3.13.

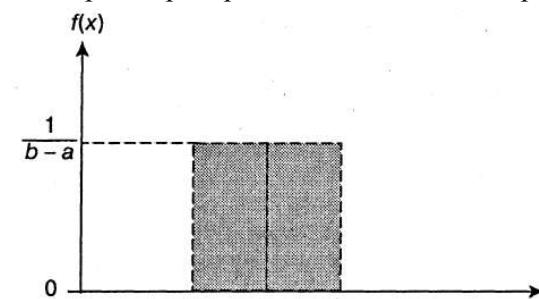


Рис. 3.13. Кривая равномерного распределения

Значения $f(x)$ в крайних точках a и b участка (a, b) не указываются, так как вероятность попадания в любую из этих точек для непрерывной случайной величины X равна 0.

Математическое ожидание случайной величины X , имеющей равномерное распределение на участке $[a, b]$, $m_x = (a+b)/2$. Дисперсия вычисляется по формуле $D_x = (b-a)^2/12$, отсюда $\sigma_x = (b-a)/3,464$.

Моделирование случайных величин. Для моделирования случайной величины необходимо знать ее закон распределения. Наиболее общим способом получения последовательности случайных чисел, распределенных по произвольному закону, является способ, в основе которого лежит их формирование из исходной последовательности случайных чисел, распределенных в интервале $(0; 1)$ по равномерному закону.

Равномерно распределенные в интервале $(0; 1)$ последовательности случайных чисел можно получить тремя способами:

- по специально подготовленным таблицам случайных чисел;
- с применением физических генераторов случайных чисел (например, бросанием монеты);
- алгоритмическим методом.

Для таких чисел величина математического ожидания должна быть равна $0,5$, а дисперсия – $1/12$. Если необходимо, чтобы случайное число X находилось в интервале $(a; b)$, отличном от $(0; 1)$, нужно воспользоваться формулой $X = a + (b - a)r$, где r – случайное число из интервала $(0; 1)$.

В связи с тем, что практически все модели реализуются на компьютере, почти всегда для получения случайных чисел используют встроенный в ЭВМ алгоритмический генератор (ГСЧ), хотя не составляет проблем использовать и таблицы, предварительно переведенные в электронный вид. Следует учитывать, что алгоритмическим методом мы всегда получаем псевдослучайные числа, так как каждое последующее сгенерированное число зависит от предыдущего.

На практике всегда необходимо получить *случайные числа, распределенные по заданному закону распределения*. Для этого используются самые разнообразные методы. Если известно аналитическое выражение для закона распределения F , то можно использовать *метод обратных функций*.

Достаточно разыграть случайное число, равномерно распределенное в интервале от 0 до 1 . Поскольку функция F тоже изменяется в данном интервале, то случайное число X можно определить взятием обратной функции по графику или аналитически: $x = F^{-1}(r)$. Здесь r – число, генерируемое ГСЧ в интервале от 0 до 1 ; x_1 – сгенерированная в итоге случайная величина. Графически суть метода изображена на рис. 3.14.

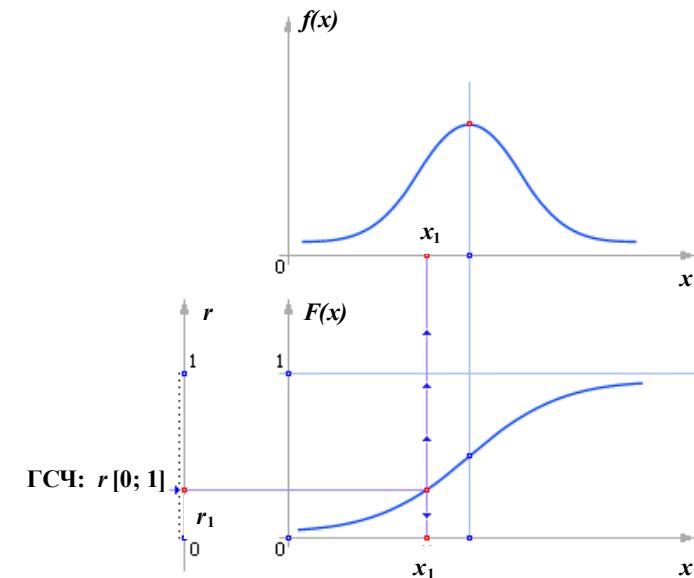


Рис. 3.14. Иллюстрация метода обратной функции для генерации случайных событий X , значения которых распределены непрерывно. На рисунке показаны графики плотности вероятности и интегральной плотности вероятности от x

Рассмотрим в качестве примера экспоненциальный закон распределения. Функция распределения этого закона имеет вид $F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$. Так как r и F в данном методе предполагаются аналогичными и расположены в одном интервале, то, заменив F на случайное число r , имеем $r = 1 - \exp(-\lambda x)$. Выражая искомую величину x из этого выражения (т. е. обращая функцию $\exp()$), получаем $x = -1/\lambda \cdot \ln(1-r)$. Так как в статистическом смысле $(1-r)$ и r – это одно и то же, то $x = -1/\lambda \cdot \ln(r)$.

Алгоритмы моделирования некоторых распространенных законов распределения непрерывных случайных величин приведены в табл. 3.10.

Например, необходимо смоделировать время погрузки, которое распределено по нормальному закону. Известно, что средняя продолжительность погрузки составляет 35 мин, а среднеквадратичное отклонение реального времени от средней величины составляет 10 мин. То есть по условиям задачи $m_x = 35$, $\sigma_x = 10$. Тогда значение случайной величины будет рассчитываться по формуле $R = \sum r_i$, где r_i – случайные

числа из ГСЧ в диапазоне $[0; 1]$, $n = 12$. Число 12 выбрано как достаточно большое на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей (теоремы Ляпунова): «Для большого числа N случайных величин X с любым законом распределения их сумма есть случайное число с нормальным законом распределения». Тогда случайное значение $X = \sigma_x(R - n/2) + m_x = 10(R - 3) + 35$.

Таблица 3.10

Алгоритмы моделирования случайных величин

Распределение	Плотность вероятности	Алгоритм датчика
Равномерное	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 0, & x < a, x > b \end{cases}$	Встроен в ЭВМ
Экспоненциальное	$f(x) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda x), & x \geq 0; \\ 0, & x < 0 \end{cases}$	$x = -\frac{1}{\lambda} \ln r$
Нормальное	$f(x) = \frac{\exp\left(\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}$	$x = a + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right)$
Вейбулла	$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\sigma} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^{\lambda-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^\lambda\right), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$	$x = \sigma(-\ln r)^{\frac{1}{\lambda}}$

Моделирование случайного события. Случайное событие подразумевает, что у некоторого события есть несколько исходов и который из исходов произойдет в очередной раз, определяется только его вероятностью. То есть исход выбирается случайно с учетом его вероятности. Например, допустим, что нам известна вероятность выпуска бракованных изделий $P_b = 0,1$. Смоделировать выпадение этого события можно, разыграв равномерно распределенное случайное число из диапазона от 0 до 1 и установив, в какой из двух интервалов (от 0 до 0,1 или от 0,1 до 1) оно попало (рис. 3.15). Если число попадает в диапазон $(0; 0,1)$, то выпущен брак, т. е. событие произошло, иначе – событие не произошло (выпущено кондиционное изделие). При значительном числе экспериментов частота попадания чисел в интервал от 0 до 0,1 будет приближаться к вероятности $P_b = 0,1$, а частота попадания чисел в интервал от 0,1 до 1 будет приближаться к $P_k = 0,9$.

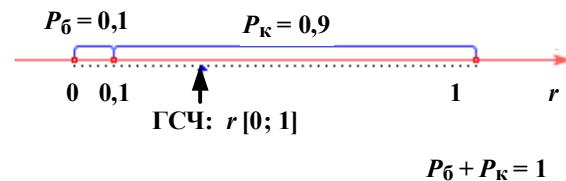


Рис. 3.15. Схема использования генератора случайных чисел для генерирования события

События называются *несовместными*, если вероятность появления этих событий одновременно равна 0. Отсюда следует, что суммарная вероятность группы несовместных событий равна 1. Обозначим через a_1, a_2, \dots, a_n события, а через P_1, P_2, \dots, P_n – вероятности появления отдельных событий. Так как события несовместны, то сумма вероятностей их выпадения равна 1: $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$. Снова используем для имитации выпадения одного из событий генератор случайных чисел, значение которых также всегда находится в диапазоне от 0 до 1. Отложим на единичном интервале $[0; 1]$ отрезки P_1, P_2, \dots, P_n . Понятно, что в сумме отрезки составят точно единичный интервал. Точка, соответствующая выпавшему числу из генератора случайных чисел на этом интервале, укажет на один из отрезков. Соответственно в большие отрезки случайные числа будут попадать чаще (вероятность появления этих событий больше!), в меньшие отрезки – реже (рис. 3.16).

При необходимости моделирования *совместных событий* их необходимо привести к несовместным. Например, чтобы смоделировать появление событий, для которых заданы вероятности $P(a_1) = 0,7$; $P(a_2) = 0,5$ и $P(a_1, a_2) = 0,4$, определим все возможные несовместные исходы появления событий a_1, a_2 и их одновременного появления:

1. Одновременное появление двух событий $P(b_1) = P(a_1, a_2) = 0,4$.
2. Появление события $a_1 P(b_2) = P(a_1) - P(a_1, a_2) = 0,7 - 0,4 = 0,3$.
3. Появление события $a_2 P(b_3) = P(a_2) - P(a_1, a_2) = 0,5 - 0,4 = 0,1$.
4. Непоявление ни одного события $P(b_4) = 1 - (P(b_1) + P(b_2) + P(b_3)) = 0,2$.

Теперь вероятности появления несовместных событий b необходимо представить на числовой оси в виде отрезков. Получая с помо-

щью ГСЧ числа, определяем их принадлежность тому или иному интервалу и получаем реализацию совместных событий a .

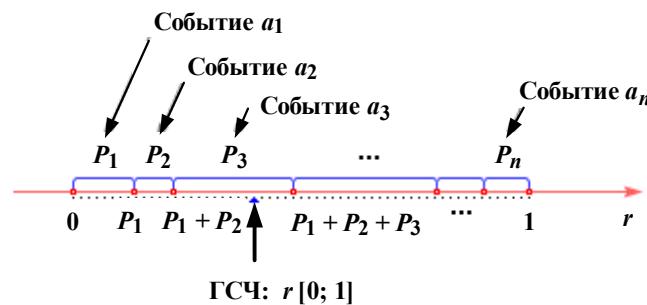


Рис. 3.16. Схема генерации несовместных случайных событий с помощью генератора случайных чисел

Часто на практике встречаются *системы случайных величин*, т. е. такие две (и более) различные случайные величины X, Y (и другие), которые зависят друг от друга. Например, если произошло событие X и приняло какое-то случайное значение, то событие Y происходит хотя и случайно, но с учетом того, что X уже приняло какое-то значение.

Например, если в качестве X выпало большое число, то в качестве Y должно выпасть тоже достаточно большое число (если корреляция положительна, и наоборот, если отрицательна). На транспорте такие зависимости встречаются достаточно часто. Большая длительность задержек более вероятна на маршрутах существенной протяженности и т. д.

Если случайные величины зависимы, то

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1)f(x_2 | x_1)f(x_3 | x_2, x_1) \cdot \dots \cdot f(x_n | x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_2, x_1),$$

где $x_j | x_{j-1}, \dots, x_1$ – случайные зависимые величины: выпадение x_j при условии, что выпали x_{j-1}, \dots, x_1 ; $f(x_j | x_{j-1}, \dots, x_1)$ – плотность условной вероятности появления x_j , если выпали x_{j-1}, \dots, x_1 ; $f(\mathbf{x})$ – вероятность выпадения вектора \mathbf{x} случайных зависимых величин.

Коэффициент корреляции q показывает, насколько тесно связаны события X и Y . Если коэффициент корреляции равен единице, то зависимость событий X и Y взаимно однозначная: одному значению X соответствует одно значение Y (рис. 3.17, а)¹⁶. При q , близких к единице,

¹⁶ Конечно, два случайных числа не могут однозначно зависеть друг от друга, рис. 3.17, а приведен для ясности понятия корреляции.

возникает картина, показанная на рис. 3.17, б, т. е. одному значению X могут соответствовать уже несколько значений Y (точнее, одно из нескольких значений Y , определяемое случайным образом); т. е. в этом событии X и Y менее коррелированы, менее зависимы друг от друга.

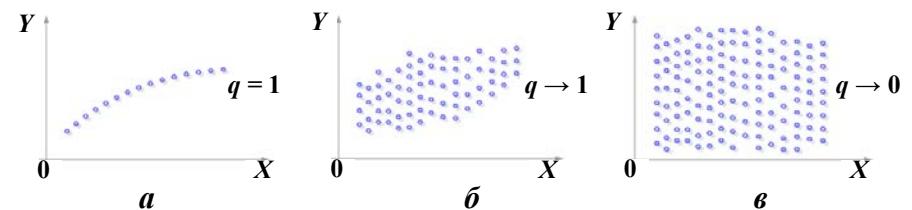


Рис. 3.17. Вид зависимости двух случайных величин при положительном коэффициенте корреляции:
а – при $q = 1$; б – при $0 < q < 1$; в – при q , близком к 0

И, наконец, когда коэффициент корреляции стремится к нулю, возникает ситуация, при которой любому значению X может соответствовать любое значение Y , т. е. события X и Y не зависят или почти не зависят друг от друга, не коррелируют друг с другом (рис. 3.17, в).

Для примера возьмем нормальное распределение, как самое распространено. Математическое ожидание указывает на самые вероятные события, здесь число событий больше и график событий гуще. Положительная корреляция указывает, что большие случайные величины X вызывают к генерации большие Y . Нуловая и близкая к нулю корреляция показывает, что величина случайной величины X никак не связана с определенным значением случайной величины Y . Легко понять сказанное, если представить себе сначала распределения $f(X)$ и $f(Y)$ отдельно, а потом связать их в систему, как это представлено на рис. 3.18.

В рассматриваемом примере X и Y распределены по нормальному закону с соответствующими значениями m_x, σ_x и m_y, σ_y . Задан коэффициент корреляции двух случайных событий q , т. е. случайные величины X и Y зависимы друг от друга, Y не совсем случайно.

Тогда возможный алгоритм реализации модели будет следующим:

1. Разыгрывается шесть случайных равномерно распределенных на интервале $[0; 1]$ чисел: $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$; находится их сумма S :

$S = \Sigma b_i$. Находится нормально распределенное случайное число x по следующей формуле: $x = \sigma_x(S - 6) + m_x$.

2. По формуле $m_{y/x} = m_y + q\sigma_y/\sigma_x(x - m_x)$ находится математическое ожидание $m_{y/x}$ (знак y/x означает, что y будет принимать случайные значения с учетом условия, что x уже принял какие-то определенные значения).

3. По формуле $\sigma_{y/x} = \sigma_y \sqrt{1 - q^2}$ находится среднеквадратическое отклонение $\sigma_{y/x}$.

4. Разыгрывается 12 случайных равномерно распределенных на интервале $[0; 1]$ чисел r_i ; находится их сумма k : $k = \Sigma r_i$. Находится нормально распределенное случайное число y по следующей формуле: $y = \sigma_{y/x}(k - 6) + m_{y/x}$.

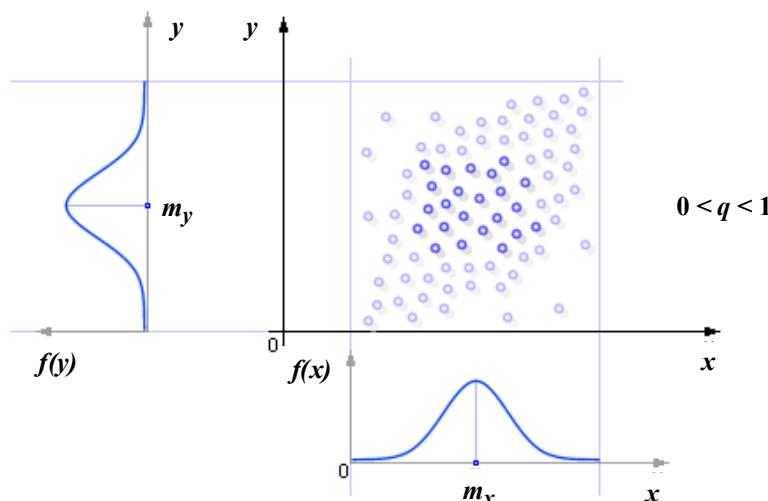


Рис. 3.18. Генерация системы случайных величин при положительном коэффициенте корреляции

Моделирование потока событий. Когда событий много и они следуют друг за другом, то они образуют **поток**. Заметим, что события при этом должны быть однородными, т. е. похожими чем-то друг на друга. Например, появление водителей на АЗС, желающих заправить свой автомобиль. То есть однородные события образуют некий ряд. При этом считается, что статистическая характеристика этого

явления (интенсивность потока событий) задана. Интенсивность потока событий указывает, сколько в среднем происходит таких событий за единицу времени. Но когда именно произойдет каждое конкретное событие, надо определить методами моделирования. Важно, что, когда мы генерируем, например, за 200 ч 1000 событий, их количество будет равно примерно величине средней интенсивности появления событий $1000/200 = 5$ событий в час. Это является статистической величиной, характеризующей этот поток в целом.

Интенсивность потока в некотором смысле является математическим ожиданием количества событий в единицу времени. Но реально может так оказаться, что в один час появится 4 события, в другой – 6, хотя в среднем получается 5 событий в час, поэтому одной величины для характеристики потока недостаточно. Второй величиной, характеризующей, насколько велик разброс событий относительно математического ожидания, является, как и ранее, дисперсия. Именно эта величина определяет случайность появления события, слабую предсказуемость момента его появления.

Случайные потоки бывают:

- ординарные – вероятность одновременного появления двух и более событий равна нулю;
- стационарные – частота появления событий λ постоянна;
- без последействия – вероятность появления случайного события не зависит от момента совершения предыдущих событий.

При моделировании СМО в подавляющем числе случаев рассматривается **пуассоновский (простейший) поток – ординарный поток без последействия**, в котором вероятность поступления в промежуток времени t ровно m требований задается формулой Пуассона:

$$P_m(t) = [(\lambda t)^m / m!] \exp(-\lambda t).$$

Пуассоновский поток может быть стационарным, если $\lambda(t) = \text{const}(t)$, или нестационарным в противном случае.

В пуассоновском потоке вероятность того, что ни одно событие не наступит,

$$P_0(t) = [(\lambda t)^0 / 0!] \exp(-\lambda t) = \exp(-\lambda t).$$

На рис. 3.19 приведена зависимость P_0 от времени. Очевидно, что чем больше время наблюдения, тем вероятность, что ни одно событие не произойдет, меньше. Кроме того, чем более значение λ , тем круче идет график, т. е. быстрее убывает вероятность. Это соответствует тому, что если интенсивность появления событий велика, то вероятность того, что событие не произойдет, быстро уменьшается со временем наблюдения.

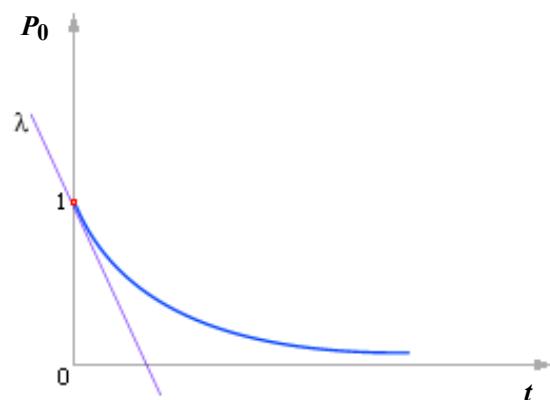


Рис. 3.19. График вероятности того, что ни одного события не произойдет в зависимости от времени

Вероятность появления хотя бы одного события $P_1 = 1 - \exp(-\lambda t)$, так как $P_1 + P_0 = 1$. Очевидно, что вероятность появления хотя бы одного события стремится со временем к единице, т. е. при соответствующем длительном наблюдении событие обязательно рано или поздно произойдет. По смыслу P равно r , поэтому, выражая t из формулы определения P_1 , окончательно для определения интервалов между двумя случайными событиями имеем

$$t = -1/\lambda \ln(r),$$

где r – равномерно распределенное от 0 до 1 случайное число, которое получают с помощью ГСЧ; t – интервал между случайными событиями (случайная величина).

В качестве примера рассмотрим поток автомобилей, прибывающих на терминал. Автомобили приходят случайным образом – в среднем 8 за сутки (интенсивность потока $\lambda = 8/24$ авт./ч). Необходимо смо-

делировать этот процесс в течение $T_h = 100$ ч. Средний интервал времени между автомобилями $t_{cp} = 1/\lambda = 24/8 = 3$ ч.

На рис. 3.20 показан результат моделирования – моменты времени, когда автомобили приходили на терминал. Как видно, всего за период $T_h = 100$ терминал обработал $N = 33$ автомобиля. Если запустить моделирование снова, то N может оказаться равным, например, 34, 35 или 32. Но в среднем за K прогонов алгоритма N будет равно 33,333.

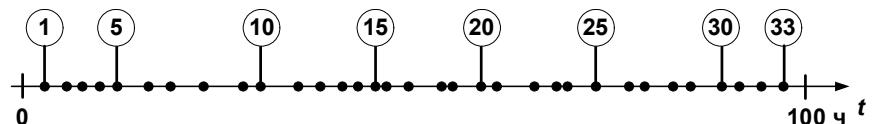


Рис. 3.20. Иллюстрация работы модели, генерирующей поток случайных событий

Если известно, что поток *не является ординарным*, то необходимо моделировать кроме момента возникновения события еще и число событий, которое могло появиться в этот момент. Например, автомобили на терминал прибывают в случайные моменты времени (ординарный поток автомобилей). Но при этом в автомобилях может быть разное (случайное) количество груза. В этом случае о потоке груза говорят как о *потоке неординарных событий*.

Рассмотрим задачу. Необходимо определить время простоя погрузочного оборудования на терминале, если автомобилями на терминал доставляются контейнеры АУК-1,25. Поток автомобилей подчиняется закону Пуассона, средний интервал между автомобилями равен 0,5 ч, $\lambda = 1/0,5 = 2$ авт./ч. Количество контейнеров в автомобиле варьируется по нормальному закону со средним значением $m = 6$ и $\sigma = 2$. При этом минимально может быть 2, а максимально – 10 контейнеров. Время разгрузки одного контейнера составляет 4 мин и 6 мин необходимо на технологические операции. Алгоритм решения этой задачи, построенный по принципу последовательной проводки каждой заявки, приведен на рис. 3.21.

После ввода исходных данных запускается цикл моделирования до достижения заданного модельного времени. С помощью ГСЧ получаем случайное число, затем определяем интервал времени до прихода автомобиля. Отмечаем полученный интервал на оси времени и моделируем количество контейнеров в кузове прибывшего автомобиля.

Проверяем полученное число на допустимый интервал. Далее вычисляется время разгрузки и суммируется в счетчике общего времени работы погрузочного оборудования. Проверяется условие: если интервал прихода автомобиля больше времени разгрузки, то разность между ними суммируем в счетчике времени простоя оборудования.

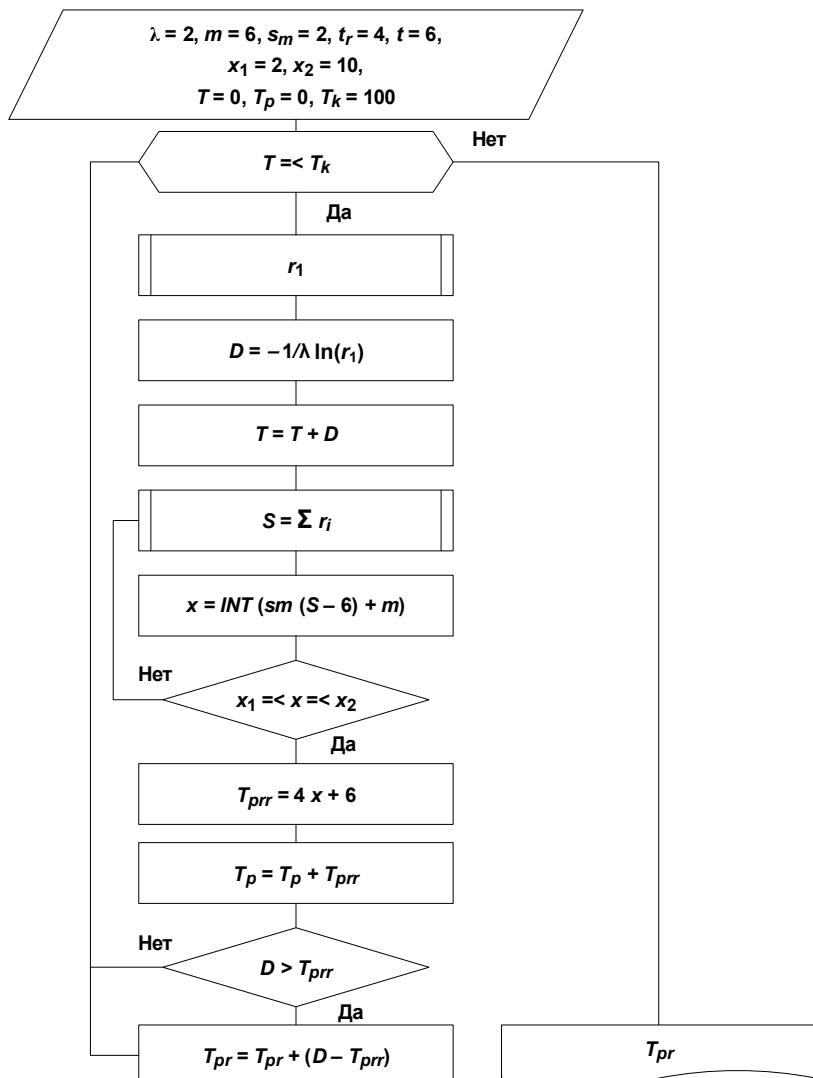


Рис. 3.21. Алгоритм моделирования загрузки терминала

Типичным примером для СМО может являться работа пункта погрузки с несколькими постами, как это показано на рис. 3.22.

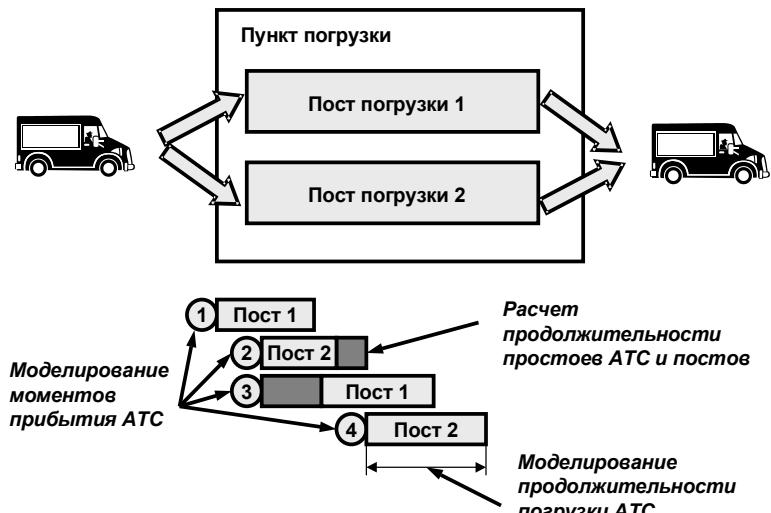


Рис. 3.22. Имитационное моделирование работы пункта погрузки

Для наглядности процесса моделирования построим временную диаграмму работы СМО, отражая на каждой линейке (ось времени t) состояние отдельного элемента системы (рис. 3.23). Временных линеек проводится столько, сколько имеется различных объектов в СМО (потоков). В нашем примере их 7: поток заявок, поток ожидания на первом месте в очереди, поток ожидания на втором месте в очереди, поток обслуживания в первом канале, поток обслуживания во втором канале, поток обслуженных системой заявок, поток отказанных заявок. Для демонстрации процесса отказа в обслуживании условимся, что в очереди на погрузку могут находиться только два автомобиля. Если их больше, то они направляются на другой пункт погрузки.

Смоделированные случайные моменты поступления заявок на обслуживание автомобилей отображены на первой линейке. Берется первая заявка и, так как в этот момент каналы свободны, устанавливается на обслуживание в первый канал. Заявка 1 переносится на линейку первого канала. Время обслуживания в канале тоже случайное. Находим на диаграмме момент окончания обслуживания, откладывая сгенерированное время обслуживания от момента начала обслужива-

ния, и опускаем заявку на линейку «Обслуженные». Заявка прошла в СМО весь путь. Теперь можно согласно принципу последовательной проводки заявок так же смоделировать путь второй заявки.

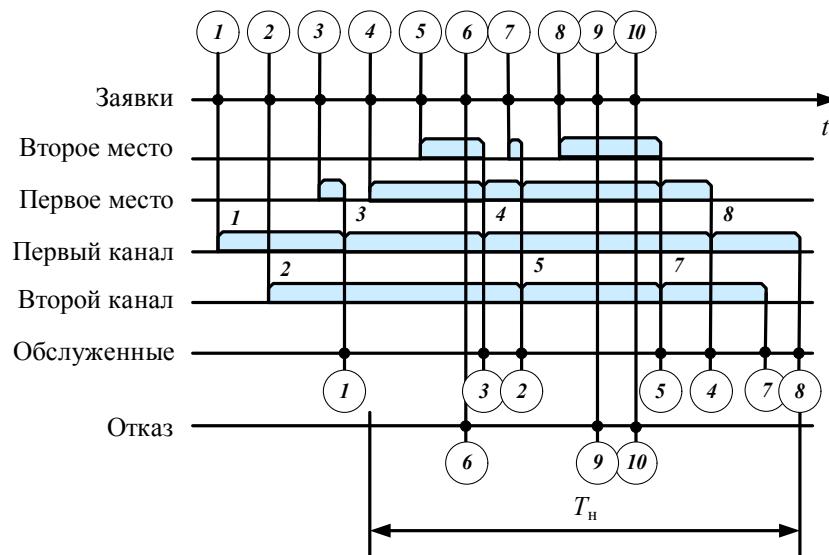


Рис. 3.23. Временная диаграмма процесса работы пункта погрузки

Если в некоторый момент окажется, что оба канала заняты, то следует установить заявку в очередь. На рис. 3.23 это заявка 3. Заметим, что по условиям задачи в очереди, в отличие от каналов, заявки находятся не случайное время, а ожидают, когда освободится какой-то из каналов. После освобождения канала заявка поднимается на линейку соответствующего канала и там организуется ее обслуживание.

Если все места в очереди в момент, когда придет очередная заявка, будут заняты, то заявку следует отправить на линейку «Отказанные». На рис. 3.23 это заявка 6.

Процедуру имитации обслуживания заявок продолжают некоторое время T_n . Чем больше это время, тем точнее в дальнейшем будут результаты моделирования. Реально для простых систем выбирают T_n , равное 50–100 ч и более, хотя иногда лучше мерить эту величину количеством рассмотренных заявок.

Анализ СМО проведем на уже рассмотренном примере.

Сначала нужно дождаться установившегося режима. Откладываем первые четыре заявки как нехарактерные, протекающие во время процесса установления работы системы («время разогрева модели»). Измеряем время наблюдения, допустим, что в нашем примере $T_n = 5$ ч. Подсчитываем из диаграммы количество обслуженных заявок $N_{\text{обс}}$, время простоя и другие величины. В результате можем вычислить показатели, характеризующие качество работы СМО:

1. Вероятность обслуживания $P_{\text{обс}} = N_{\text{обс}}/N = 5/7 = 0,714$. Для расчета вероятности обслуживания заявки в системе достаточно разделить число заявок, которое удалось обслужить за время T_n (см. линейку «Обслуженные»), $N_{\text{обс}}$ на число заявок N , которые поступили за это же время.

2. Пропускная способность системы $A = N_{\text{обс}}/T_n = 7/5 = 1,4$ авт./ч. Для расчета пропускной способности системы достаточно разделить число обслуженных заявок $N_{\text{обс}}$ на время T_n , за которое произошло это обслуживание.

3. Вероятность отказа $P_{\text{отк}} = N_{\text{отк}}/N = 3/7 = 0,43$. Для расчета вероятности отказа заявке в обслуживании достаточно разделить число заявок $N_{\text{отк}}$, которым отказали за время T_n (см. линейку «Отказанные»), на число заявок N , которые хотели обслужить за это же время, т. е. поступили в систему. Обратите внимание, что сумма $P_{\text{отк}} + P_{\text{обс}}$ в теории должна быть равна 1. На самом деле экспериментально получилось, что $P_{\text{отк}} + P_{\text{обс}} = 0,714 + 0,43 = 1,144$. Эта неточность объясняется тем, что за время наблюдения T_n накоплена недостаточная статистика для получения точного ответа. Погрешность этого показателя сейчас составляет 14 %.

4. Вероятность занятости одного канала $P_1 = T_{\text{зан}}/T_n = 0,05/5 = 0,01$, где $T_{\text{зан}}$ – время занятости только одного канала (первого или второго). Измерениям подлежат временные отрезки, на которых происходят определенные события. Например, на диаграмме ищутся такие отрезки, когда занят или первый, или второй канал. В данном примере есть один такой отрезок в конце диаграммы длиной 0,05 ч.

5. Вероятность занятости двух каналов $P_2 = T_{\text{зан}}/T_n = 4,95/5 = 0,99$. На диаграмме ищутся такие отрезки, во время которых одновременно заняты и первый, и второй канал. В данном примере таких отрезков четыре, их сумма равна 4,95 ч.

6. Среднее количество занятых каналов: $N_{\text{с.к.}} = 0P_0 + 1P_1 + 2P_2 = 0,01 + 2 \cdot 0,99 = 1,99$. Чтобы подсчитать, сколько каналов занято

в системе в среднем, достаточно знать долю (вероятность занятости одного канала) и умножить на вес этой доли (один канал), знать долю (вероятность занятости двух каналов) и умножить на вес этой доли (два канала) и т. д. Полученная цифра 1,99 говорит о том, что из двух возможных каналов в среднем загружено 1,99 канала. Это высокий показатель загрузки, 99,5 %, система хорошо использует ресурсы.

7. Вероятность простоя хотя бы одного канала $P_1^* = T_{\text{прост}1}/T_h = 0,05/5 = 0,01$.

8. Вероятность простоя двух каналов одновременно: $P_2^* = T_{\text{прост}2}/T_h = 0$.

9. Вероятность простоя всей системы $P_c^* = T_{\text{прост.сист}}/T_h = 0$.

10. Среднее количество заявок в очереди $N_{c,3} = 0P_{03} + 1P_{13} + 2P_{23} = 0,34 + 2 \cdot 0,64 = 1,62$ авт. Чтобы определить среднее количество заявок в очереди, надо определить отдельно вероятность того, что в очереди будет одна заявка P_{13} , вероятность того, в очереди будут стоять две заявки P_{23} , и т. д., и снова с соответствующими весами их сложить.

11. Вероятность того, что в очереди будет одна заявка, $P_{13} = T_{13}/T_h = 1,7/5 = 0,34$ (всего на диаграмме четыре таких отрезка, в сумме дающих 1,7 ч).

12. Вероятность того, в очереди будут стоять одновременно две заявки, $P_{23} = T_{23}/T_h = 3,2/5 = 0,64$ (всего на диаграмме три таких отрезка, в сумме дающих 3,25 ч).

13. Среднее время ожидания заявки в очереди $T_{\text{ср.ож}} = 1,7/4 = 0,425$ ч. Нужно сложить все временные интервалы, в течение которых какая-либо заявка находилась в очереди, и разделить на количество заявок. На временной диаграмме таких заявок 4.

14. Среднее время обслуживания заявки $T_{\text{ср.обсл}} = 8/5 = 1,6$ ч. Сложить все временные интервалы, в течение которых какая-либо заявка находилась на обслуживании в каком-либо канале, и разделить на количество заявок.

15. Среднее время нахождения заявки в системе: $T_{\text{ср.сист}} = T_{\text{ср.ож}} + T_{\text{ср.обсл}} = 2$ ч.

Далее следует оценить точность каждого из полученных результатов, т. е. ответить на вопрос, насколько мы можем доверять этим значениям.

Если точность не является удовлетворительной, то следует увеличить время эксперимента и тем самым улучшить статистику. Можно сделать и по-другому, если несколько раз запустить эксперимент

на время T_h и впоследствии усреднить значения этих экспериментов, а после этого снова проверить результаты на критерий точности. Этую процедуру следует повторять до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность.

Далее следует составить таблицу результатов и оценить значения каждого из них с точки зрения клиента и владельца СМО (табл. 3.11). Учитывая сказанное в каждом пункте, следует сделать общий вывод.

Таблица 3.11
Анализ результатов моделирования

Показатель	Значение показателя	Интересы владельца СМО	Интересы клиента
Вероятность обслуживания	0,714	Вероятность обслуживания мала, много клиентов уходит из системы без обслуживания Рекомендация: увеличить вероятность обслуживания	Вероятность обслуживания мала, каждый третий клиент хочет, но не может обслужиться Рекомендация: увеличить вероятность обслуживания
...
Среднее количество заявок в очереди	1,62	Места в очереди все время заняты Рекомендация: увеличить число мест в очереди, увеличить пропускную способность	Практически всегда перед обслуживанием автомобиль стоит в очереди Рекомендация: увеличить число мест в очереди, увеличить пропускную способность
Общий вывод		Увеличить пропускную способность Увеличить количество мест в очереди, чтобы не терять потенциальных клиентов	Клиенты заинтересованы в значительном увеличении пропускной способности для уменьшения времени ожидания и уменьшения отказов

Для принятия решения о выполнении конкретных мероприятий необходимо провести анализ чувствительности модели. Цель анализа чувствительности модели заключается в определении возможных отклонений выходных характеристик вследствие изменений входных параметров.

Методы оценки чувствительности имитационной модели аналогичны методам определения чувствительности любой системы. Если выходная характеристика модели P зависит от параметров, связанных с варьируемыми величинами $P = f(p_1, p_2, \dots, p_r)$, то изменения этих параметров Δp_j ($j = 1, \dots, r$) вызывают изменение ΔP .

$$\Delta P = \sum_{j=1}^r \frac{\partial P}{\partial p_j} \Delta p_j.$$

В этом случае анализ чувствительности модели сводится к исследованию функции чувствительности $\partial P / \partial p$.

В качестве примера анализа чувствительности имитационной модели рассмотрим влияние изменения варьируемых параметров надежности транспортного средства на эффективность эксплуатации. В качестве целевой функции используем показатель приведенных затрат $Z_{\text{пр}}$. Для анализа чувствительности используем данные по эксплуатации автопоезда КамАЗ-5410 в городских условиях. Пределы изменения параметров p_j для определения чувствительности модели достаточно определить экспертным путем (табл. 3.12).

Для проведения расчетов по модели выбрана базовая точка, в которой варьируемые параметры имеют значения, соответствующие нормативам. Параметр продолжительности простоя при выполнении технического обслуживания и ремонта в днях заменен на удельный показатель – простой в днях на тысячу километров $H_{\text{т.о.}}$.

Результаты расчета приведены на рис. 3.24. Базовая точка находится в месте пересечения всех кривых. Приведенные на рис. 3.24 зависимости позволяют установить степень влияния каждого из рассматриваемых параметров на величину изменения $Z_{\text{пр}}$. В то же время использование натуральных значений анализируемых величин не позволяет установить сравнительную степень влияния каждого параметра на $Z_{\text{пр}}$, так как эти параметры имеют разные единицы измерения. Для преодоления этого выберем форму интерпретации результатов расчетов в относительных единицах. Для этого базовую точку необходимо перенести в начало координат, а значения изменяемых параметров и относительно изменения выходных характеристик модели выразить в процентах. Результаты проведенных преобразований представлены на рис. 3.25.

Таблица 3.12

Значения варьируемых параметров

Наименование параметров	Значение в базовой точке	Пределы варьирования
Стоимость транспортного средства, $Ц_a$, тыс. р. (в ценах 1983 г.)	12,5	8,8–16,2
Затраты на техническое обслуживание и ремонт $C_{\text{т.р.}}$, р./тыс. км	12,8	5–60
Пробег до списания $L_{\text{к.п.}}$, тыс. км	300	200–700
Удельный простой в техническом обслуживании и ремонте $H_{\text{т.о.}}$ дн./тыс. км	0,6	0,1–3,5
Количество дней работы $D_{\text{р.г.}}$	305	200–305

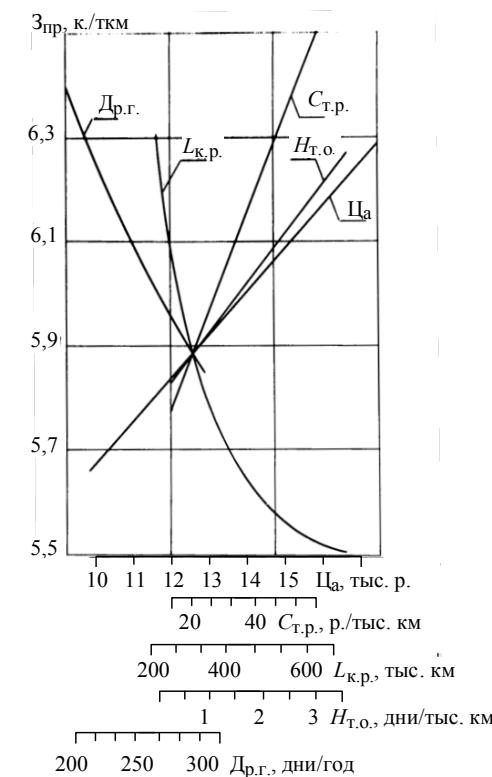


Рис. 3.24. Влияние варьируемых параметров на величину приведенных затрат при эксплуатации автопоездов КамАЗ-5410 в городских условиях

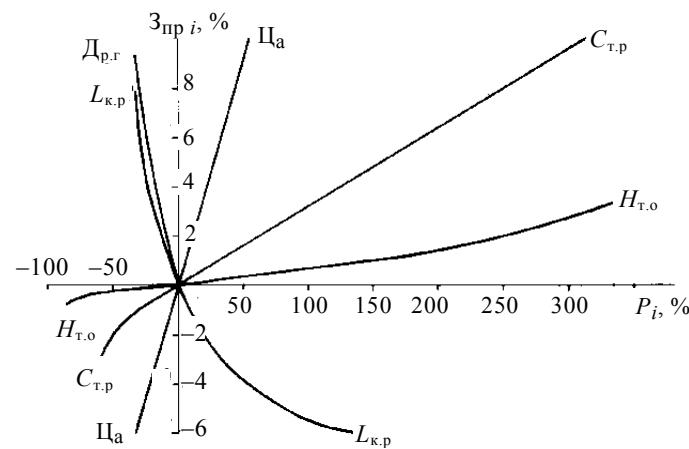


Рис. 3.25. Влияние относительного изменения варьируемых параметров на степень изменения Z_{np}

Изменение варьируемых параметров относительно базового значения представлено на одной оси. Как видно из рис. 3.25, увеличение значения каждого параметра вблизи базовой точки на 50 % ведет к увеличению Z_{np} на 9 % от роста Π_a , более чем на 1,5 % от C_{tp} , менее чем на 0,5 % от H_{to} и к уменьшению Z_{np} почти на 4 % от увеличения L_{kp} . Уменьшение на 25 % L_{kp} и D_{pr} ведет к увеличению Z_{np} соответственно более чем на 6 %. Уменьшение на такую же величину параметров H_{to} , C_{tp} и Π_a ведет к уменьшению Z_{np} соответственно на 0,2, 0,8 и 4,5 %.

Приведенные зависимости дают представление о влиянии отдельно взятого параметра и могут быть использованы при планировании работы транспортной системы. По интенсивности влияния на Z_{np} рассмотренные параметры можно расставить в следующем порядке: D_{pr} , Π_a , L_{kp} , C_{tp} , H_{to} .

В процессе эксплуатации изменение значения одного показателя влечет за собой изменение значений других показателей, причем относительное изменение каждого из варьируемых параметров на одну и ту же величину в общем случае имеет под собой неравнозначную физическую основу. Необходимо относительное изменение значений варьируемых параметров в процентах по оси абсцисс заменить параметром, который может служить единой мерой для оценки степени из-

менения каждого параметра. Можно предположить, что в каждый момент времени эксплуатации транспортного средства значение каждого параметра имеет одинаковый экономический вес по отношению к значениям других варьируемых параметров, т. е. с экономической точки зрения надежность транспортного средства в каждый момент времени оказывает равновесное влияние на все связанные с ней параметры. Тогда требуемым экономическим эквивалентом будет являться время или, что более удобно, год эксплуатации.

На рис. 3.26 представлены зависимости, построенные в соответствии с вышеприведенными требованиями. За базовое значение Z_{np} принято значение на первом году эксплуатации транспортного средства. Величины варьируемых параметров для каждого года эксплуатации определялись по результатам наблюдений¹⁷.

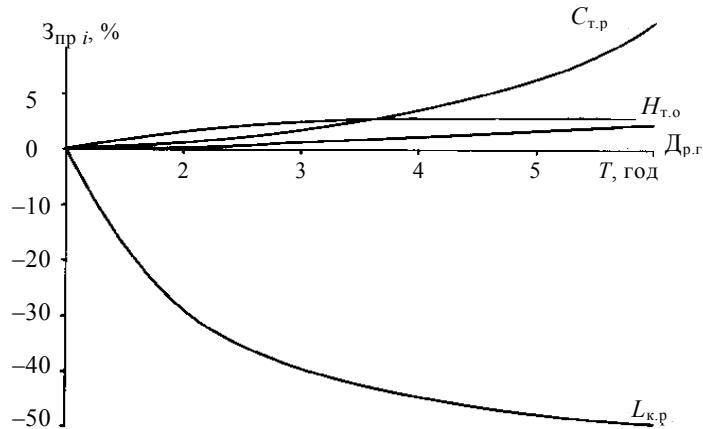


Рис. 3.26. Влияние изменения величины варьируемых параметров на эффективность эксплуатации транспортного средства с увеличением его возраста

В процессе эксплуатации увеличение Z_{np} в течение первых трех лет в первую очередь обусловлено ростом значений H_{to} , а затем, в рассмотренных условиях эксплуатации, основную роль в снижении эффективности использования ТС играет увеличение значений C_{tp} . Для

¹⁷ Технико-экономический анализ в исследовании надежности автомобилей КамАЗ-5410 / Ю. Г. Котиков, И. М. Блянкинштейн, А. Э. Горев, А. Н. Борисенко; ЛИСИ. Л.: 1983. 12 с. – Деп. в ЦБНТИ Минавтотранса РСФСР, № 135ат-Д83.

выявления влияния величины $L_{k,p}$, в расчетах его значение приравнивалось к общему пробегу ТС с начала эксплуатации. Вид функции $Z_{np} = f(L_{k,p})$ показывает, что интенсивность снижения Z_{np} с увеличением $L_{k,p}$ существенно уменьшается.

В результате анализа чувствительности модели можно понять, на какие факторы необходимо воздействовать для изменения целевой функции. Для изменения факторов требуется приложить управляющие усилия, что связано с соответствующими затратами. Сумма затрат не может быть бесконечна, как и любые ресурсы, эти затраты в реальности ограничены. Следовательно, необходимо понять, в каком объеме выделение средств будет эффективно. Если в большинстве случаев затраты с увеличением управляющего воздействия растут линейно, то эффективность системы быстро растет только до какого-то предела, когда даже существенные затраты уже не дают такой же отдачи. Например, невозможно безгранично увеличивать мощность обслуживающих устройств из-за ограничений по площади или по потенциальному количеству обслуживаемых автомобилей и т. д.

Если сопоставить увеличение затрат и показатель эффективности системы в одинаковых единицах, то, как правило, графически это будет выглядеть так, как представлено на рис. 3.27.

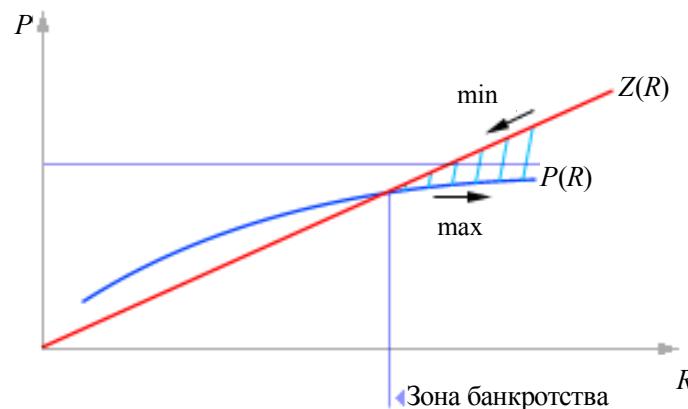


Рис. 3.27. Типичное изменение показателя эффективности системы от управляющих затрат

Из рис. 3.27 видно, что при назначении цены C_1 за единицу затрат Z и цены C_2 за единицу показателя P эти кривые можно сложить. Кривые складывают, если их требуется одновременно минимизировать или максимизировать. Если одна кривая подлежит максимизации, а другая – минимизации, то следует найти их разность, например, по точкам. Тогда результирующая кривая (рис. 3.28), учитывающая и эффект от управления, и затраты на это, будет иметь экстремум. Значение параметра R , доставляющего экстремум функции, и есть решение задачи синтеза.

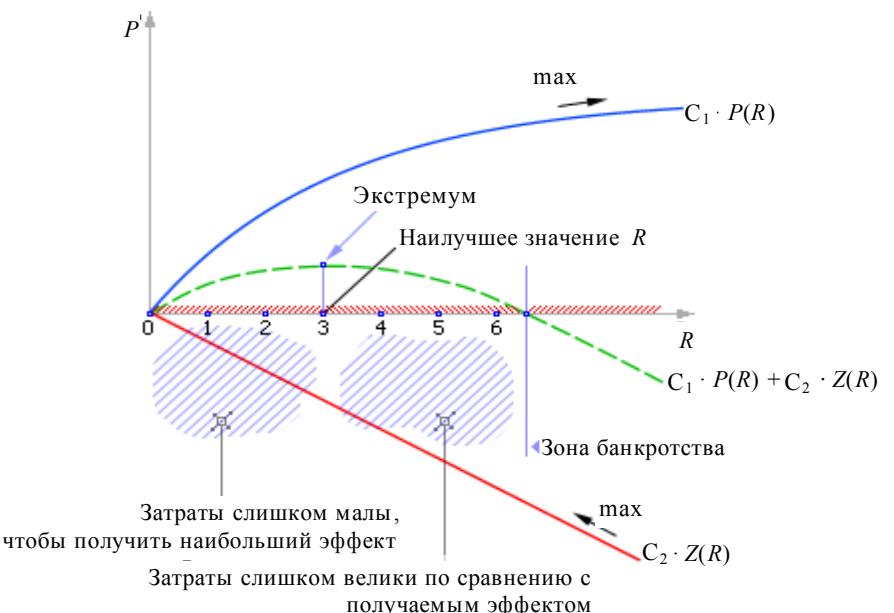


Рис. 3.28. Пример решения задачи синтеза

Кроме управления R и показателя P в системах действует возмущение. Возмущение $D = \{d_1, d_2, \dots\}$ – это входное воздействие, которое в отличие от управляющего параметра не зависит от воли владельца системы (рис. 3.29). Например, низкие температуры на улице, конкуренция, к сожалению, снижают поток клиентов; поломки

оборудования снижают производительность системы. Управлять этими величинами непосредственно владелец системы не может. Обычно возмущение действует «назло» владельцу, снижая эффект P от управляющих усилий R . Это происходит потому, что, в общем случае, система создается для достижения целей, недостижимых самими по себе в природе. Человек, организуя систему, всегда надеется посредством ее достичь некоторой цели P . На это он затрачивает усилия R . В этом контексте можно сказать, что система – это организация доступных человеку, изученных им природных компонентов для достижения некоторой новой цели, недостижимой ранее другими способами.

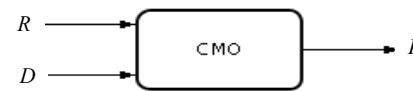


Рис. 3.29. Условное обозначение системы с учетом возмущающих воздействий

Если мы снимем зависимость показателя P от управления R еще раз, но в условиях появившегося возмущения D , то, возможно, характер кривой изменится. Скорее всего, показатель будет при одинаковых значениях управлений находиться ниже, так как возмущение носит отрицательный характер, снижая показатели системы. Система, предоставленная сама себе, без усилий управляющего характера, перестает обеспечивать цель, для достижения которой она была создана. Если, как и ранее, построить зависимость затрат, соотнести ее с зависимостью показателя от параметра управления, то найденная точка экстремума сместится (рис. 3.30) по сравнению со случаем «возмущение = 0» (см. рис. 3.28). Если снова увеличить возмущение, то кривые изменятся и, как следствие, снова изменится положение точки экстремума.

График на рис. 3.30 связывает показатель P , управление (ресурс) R и возмущение D в сложных системах, указывая, как наилучшим образом действовать руководителю (организации), принимающему решение в системе. Если управляющее воздействие будет меньше оптимального, то суммарный эффект снизится, возникнет ситуация недополученной прибыли. Если управляющее воздействие будет больше оптимального, то эффект также снизится, так как заплатить за очеред-

ное увеличение управляющих усилий надо будет по величине большей, чем та, которую вы получите в результате использования системы.

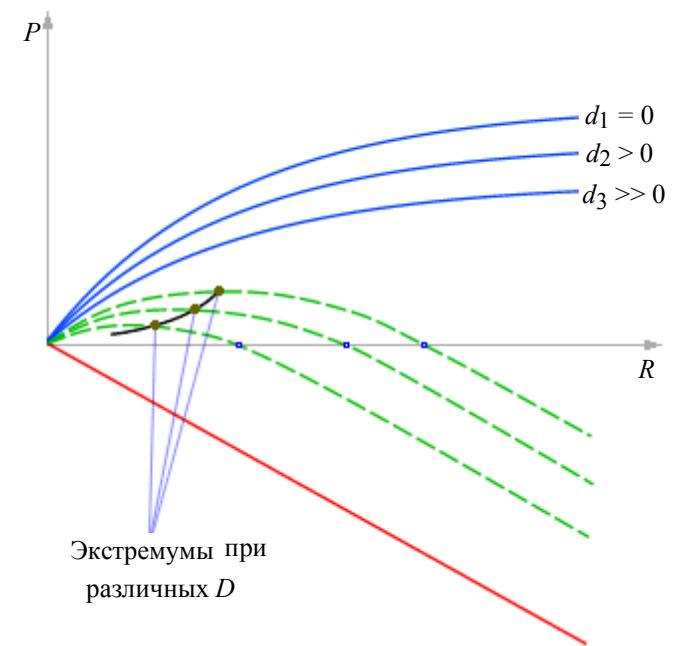


Рис. 3.30. Пример оптимального управления при различной степени возмущающих воздействий

Имитационную модель системы для реального использования необходимо реализовать на компьютере. Это можно создать с помощью следующих средств:

- универсальной пользовательской программы типа математического (MATLAB) или табличного процессора (Excel) или СУБД (Access, FoxPro), которая позволяет создать только относительно простую модель и требует хотя бы начальных навыков программирования;
- универсального языка программирования (C++, Java, Basic и т. д.), который позволяет создать модель любой сложности; но это очень трудоемкий процесс, требующий написания большого объема программного кода и длительной отладки;

- специализированного языка имитационного моделирования, который имеет готовые шаблоны и визуальные средства программирования, предназначенные для быстрого создания основы модели. Один из наиболее известных – UML (Unified Modeling Language);
- программ имитационного моделирования, которые являются наиболее популярным средством создания имитационных моделей. Они позволяют создавать модель визуально, лишь в наиболее сложных случаях прибегая к написанию вручную программного кода для процедур и функций.

Программы имитационного моделирования делятся на два типа:

- Универсальные пакеты имитационного моделирования предназначены для создания различных моделей и содержат набор функций, с помощью которых можно смоделировать типичные процессы в системах самого разного назначения. Популярными пакетами этого типа являются Arena (разработчик Rockwell Automation¹⁸, США), ExtendSim (разработчик Imagine That Ink.¹⁹, США), AnyLogic (разработчик XJ Technologies²⁰, Россия) и многие другие. Практически все универсальные пакеты имеют специализированные версии для моделирования конкретных классов объектов.

- Предметно-ориентированные пакеты имитационного моделирования служат для моделирования конкретных типов объектов и имеют для этого специализированный инструментарий в виде шаблонов, мастеров для визуального проектирования модели из готовых модулей и т. д.

3.5. Объектно-ориентированный подход к моделированию транспортных систем

На сегодня одним из условий повышения эффективности управления транспортными системами является внедрение информационных технологий в технологические процессы планирования и управления автомобильным транспортом. Здесь требуется переход от традиционных, привычных методов планирования и управления к таким методам, где применение информационных технологий даст наиболее

ощутимый эффект. Одним из вариантов является переход от последовательных технологий оперативного планирования работы подвижного состава к объектно-ориентированным. Действительно, если взять пример одной из наиболее быстро развивающихся сфер экономики – информационных технологий, то здесь резко выросшая потребность в программном обеспечении вызвала переход от методов процедурного написания программного кода к объектно-ориентированному программированию (ООП). Отличительной чертой ООП являются не описание последовательности выполнения операторов, а анализ состояния объекта и выполнение в зависимости от его результата определенных действий.

Объектно-ориентированное моделирование (ООМ) – это метод отождествления сущностей реального мира для понимания и объяснения того, как они взаимодействуют между собой для достижения требуемой цели. Отличительной чертой ООМ, как составной части объектно-ориентированного подхода, является не описание последовательности выполнения действий элементов системы, а анализ состояния каждого элемента, составляющего систему, как объекта, и выполнение в зависимости от его результата определенных действий. При этом такие составляющие ООП, как наследование, инкапсуляция, полиморфизм, классы, методы, события и свойства существенно облегчают тиражирование и модернизацию созданного продукта.

Традиционно в ООМ выделяются три этапа:

- построение информационной модели, абстрагирование реальных сущностей в терминах объектов и атрибутов (свойств);
- построение модели состояний для формализации жизненных циклов объектов и отображение этой модели диаграммами и таблицами переходов. Взаимодействие между объектами осуществляется путем передачи сообщений о происходящих с ними событиях;
- разработка модели процессов, в которой действия в моделях состояний расчленяются на фундаментальные и многократно используемые процессы (методы).

Практика использования объектно-ориентированного подхода в информационных технологиях показала жизнеспособность двух подходов к выполнению ООМ:

- метода неформального описания, в котором выделяются существительные и глаголы в описании предметной области. Суще-

¹⁸ <http://www.rockwellautomation.com>.

¹⁹ <http://www.extendsim.com>.

²⁰ <http://www.xjtek.com>.

ствительные рассматриваются как кандидаты для образования классов, а глаголы – кандидаты в операции над классами;

- структурного анализа, при котором на основе модели системы, представленной диаграммами потоков данных, выделяются внешние события и объекты, база данных, поток управления, преобразования потока управления. Далее, на основе анализа потока данных и потока управления выделяются классы и методы классов.

Модуль ООМ должен являться составной частью транспортной системы и состоять из двух частей: универсальной, обеспечивающей ввод, представление данных и общее управление режимами ООМ пакета, и функциональной части, содержащей алгоритмы вычислений для конкретной предметной области.

Предметная область ООМ может быть формально описана совокупностью трех множеств:

- множества данных X ;
- множества функциональных связей (задач, решаемых в ЛС) F ;
- множества связей по определению (ограничений) R .

Модуль ООМ должен настраиваться на конкретную предметную область путем определения множеств X , F и R и подключения соответствующего набора методов (подпрограмм анализа) M , как это показано на рис. 3.31.

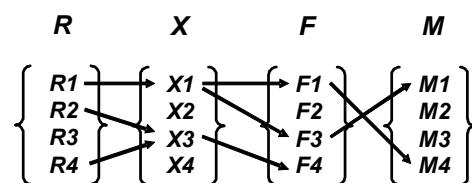


Рис. 3.31. Предметная область объектно-ориентированного анализа

Элементы перечисленных множеств находятся в определенных отношениях между собой. Элемент множества задач F использует элементы множества данных X для передачи с учетом ограничений R аргументов связанному с задачей модулю M . Элементы множества связей либо связывают между собой пары данных, либо описывают некоторый предикат, аргументами которого служат элементы множества данных.

Распространение принципов ООМ на планирование и управление транспортной системой позволяет использовать информацию о состоянии объектов управления на основе анализа событий. В зависимости от этого, инициируя выполнение тех или иных методов, можно изменять процесс функционирования системы, добиваясь оптимальных характеристик ее работы.

Основой ООП является **модель наследования**, которая позволяет в иерархическом порядке «клонировать» классы, сохраняя общие и одновременно придавая им свои специфические черты. Таким образом, для описания объектов транспортной системы используется та или иная иерархия классов.

Класс – это множество сущностей (объектов), имеющих одинаковое функциональное назначение, структуру и поведение и отличающихся значением параметров. Другими словами, это шаблон, или проект, в котором описаны общие характеристики, определяющие «поведение» объекта, который будет на нем основан. Таким образом, **экземпляр класса** – это конкретный объект из множества всех объектов того же самого класса с уникальными значениями параметров. Использование экземпляров класса позволяет собирать новую модель из типовых компонентов, подстраивая их каждый раз под конкретные условия функционирования, а также использовать построенную модель в качестве компонента других моделей.

Разбиение реальной или проектируемой системы на компоненты, построение классов, соответствующих этим компонентам, установление связей между компонентами и построение модели из экземпляров классов с учетом существующих связей – это ключевые моменты ООМ.

Принимая в качестве объектов транспортной системы такие понятия, как склад, автопоезд, перегон дороги, контейнер, мы подразумеваем информационную модель физического объекта, которая используется в процессе планирования и оперативного управления транспортной системой. Описание класса формируется с помощью набора событий, свойств и методов, присущих данному классу. В манипулировании этими тремя характеристиками и заключается управление будущими объектами.

Непосредственно для создания объектов используются подклассы. **Подкласс** – это некий вариант класса или подкласса, на котором он основан. Образование подклассов может носить бесконечный характер, при этом базовый класс будет являться основанием только

первого поколения подклассов, а далее следующие будут основываться на уже существующих. В этом случае выделяют родительский класс, который служит основанием для создания соответствующего подкласса, а последний часто называют порожденным классом.

Классификация системы классов приведена на рис. 3.32.

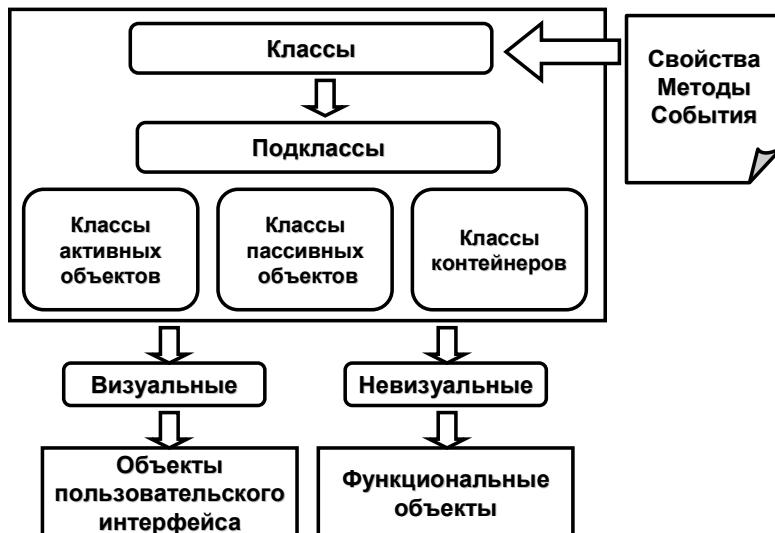


Рис. 3.32. Система классов в ООМ

Все классы делятся на следующие группы:

- *классы активных объектов*, использующихся для моделирования объектов, которые могут генерировать управляющие воздействия в транспортной системе. Эти классы формируют потоки управления, порождающие процессы, развивающиеся во времени и воздействующие на другие объекты;
 - *классы пассивных объектов*, не имеющих собственных потоков управления. Экземпляры этих классов могут представлять массы данных, совокупность алгоритмических операций и т. д.;
 - *классы контейнеров*, использующихся для моделирования объектов с закрытой сложной структурой типа «черный ящик». Сгенерированные на основе классов контейнеров объекты содержат в себе произвольный набор экземпляров классов, которые обеспечивают требуемую функциональность.

С точки зрения представления объектов в модели все классы делятся еще на две следующие группы:

- Визуальные классы используются для моделирования объектов, которые могут быть зрительно отображены в модели при ее реализации в виде компьютерной программы. Это терминалы, транспортные средства, груз и т. п.

- Невизуальные классы позволяют моделировать функциональные объекты, которые должны обеспечивать только выполнение определенных действий. Например, учетная система, система поддержания запасов и т. п.

Использование системы классов при моделировании базируется на схеме, приведенной на рис. 3.33. На основе базовых классов ООМ создается система базовых классов моделируемой транспортной системы с учетом особенностей ее структуры и функционирования. Базовые классы ООМ не могут корректироваться для сохранения универсальности своих характеристик, которая обеспечивает возможность

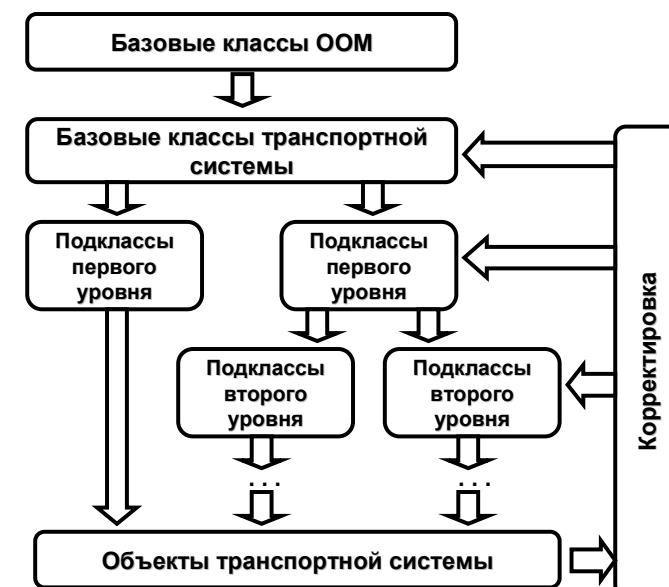


Рис. 3.33. Схема формирования структуры классов для моделирования

использовать их для любой транспортной системы. На основе базовых классов транспортной системы создается структура подклассов, достаточная для моделирования всех объектов и процессов в транспортной системе. Объекты транспортной системы могут создаваться только на основе подклассов, но не базовых классов транспортной системы.

Характеристики классов, подклассов и, следовательно, созданных на их основе объектов определяются их свойствами. Свойства можно разделить на группы так, как это показано на рис. 3.34:

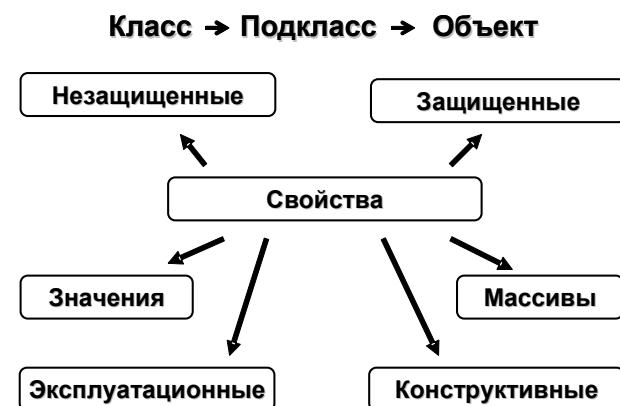


Рис. 3.34. Деление свойств на группы

- Незащищенные свойства могут изменяться во время функционирования транспортной системы. Это может быть остаток топлива в баке транспортного средства, время доставки товара и т. п.
- Защищенные свойства сохраняют свои значения независимо от изменения условий моделирования, например размеры стандартных контейнеров и поддонов, ограничения грузоподъемности или вместимости транспортного средства и т. д.
- Свойства могут принимать отдельные числовые значения, такие как производительность крана или вместимость склада.
- Свойства могут хранить массивы значений, например массив производительностей постов погрузки-разгрузки терминала или массив длин дуг транспортной сети.
- Свойства могут использоваться только при функционировании объекта – эксплуатационные свойства. Это может быть расход топлива, состав транспортных документов и т. п.

- Свойства могут использоваться только при разработке объекта – конструктивные. Это могут быть характеристики технологической системы сортировки товаров в распределительном центре и т. д.

Объектно-ориентированный подход позволяет использовать ранее созданные классы для проектирования новых классов, дополнения и видоизменения отдельные свойства уже разработанных классов. В результате возникает иерархия классов, где новые подклассы автоматически включают в себя данные и функциональность своих предшественников и отражают в своем описании в явном виде только новую информацию. Отношение между классами в такой иерархии называется *обобщением*. Новые классы обобщают свойства существующих. Механизм, с помощью которого создаются новые подклассы, включающие свойства предшественников, называется наследованием.

Модель наследования предполагает помимо реализации механизма поддержания связи для распространения событий, свойств и методов класса на подклассы еще несколько важных специфических свойств.

Инкапсуляция – возможность объединения связанных фрагментов данных или процессов в отдельный модуль – контейнер. Это дает возможность скрыть внутренние характеристики объекта и использовать принцип создания объекта или их группы как черного ящика. Такой объект будет работать, не раскрывая своей внутренней структуры, обеспечивающей его функциональность. Например, терминал может состоять из нескольких объектов, характеристики которых неизменны для внешней среды. Тогда система управления перевозками имеет доступ только к внешним характеристикам терминала.

Полиморфизм – это возможность обеспечить одинаковую реакцию на различные действия для связанных объектов. Полиморфизм обеспечивает динамическое связывание методов для объектов в процессе управления. Например, при возникновении задержки в движении на определенной дороге команда изменения маршрута движения будет относиться ко всем автомобилям, в маршрут движения которых входит данная дорога.

Набор событий для каждого класса будет характеризовать возможные состояния объекта данного класса. После этого можно определить набор методов, с помощью которых оказывается воздействие на объект. Для типичного процесса транспортной системы пример классов и со-

ответствующий им набор свойств, событий и методов приведен в табл. 3.13. В качестве типичного процесса транспортной системы примем доставку груза потребителям с терминала.

Таблица 3.13
Объектная характеристика типичного процесса транспортной системы

Классы	Свойства	События	Методы
Оптовый склад	Название Адрес Условия выполнения ПРР ...	Прибытие груза Начало погрузки Завершение погрузки Готовность принять груз ...	Заказ автотранспорта Подготовка партии груза Выполнение ПРР
Автомобиль	Модель Вместимость Тариф ...	Движение с грузом Выполнение ПРР Простой по техническим причинам ...	Планирование маршрута движения Подготовка документов
Заказчик	Название фирмы Вид перевозимого груза Платежные реквизиты ...	Заявка на перевозку Оплата перевозки ...	Выставление счета Прием заявки Извещение о состоянии груза

Если спроектировать принципы ООМ на технологию оперативного планирования перевозок, то в первую очередь необходимо выделить классы объектов, которые формируют различные события, характеризующие процесс доставки груза. Пример фрагмента иерархии классов для транспортной системы приведен на рис. 3.35.

При моделировании транспортной системы важной особенностью является отнесение объекта к активным или пассивным. Активные объекты могут самостоятельно генерировать определенный набор событий, например прибытие транспортного средства на терминал. Пассивные объекты в состоянии реагировать только на события, генерируемые извне. Пример разделения объектов транспортной системы на эти две группы приведен на рис. 3.36.

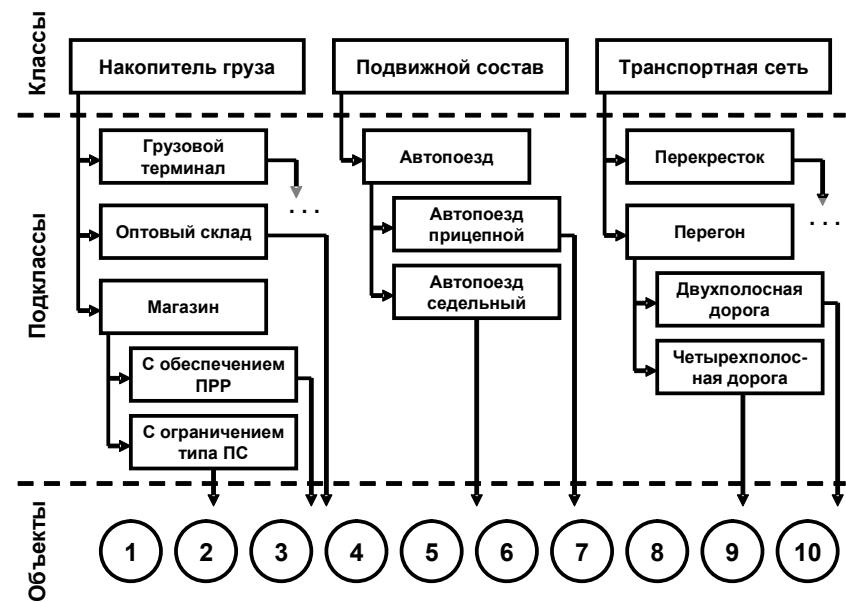


Рис. 3.35. Фрагмент иерархии классов для типичного процесса транспортной системы

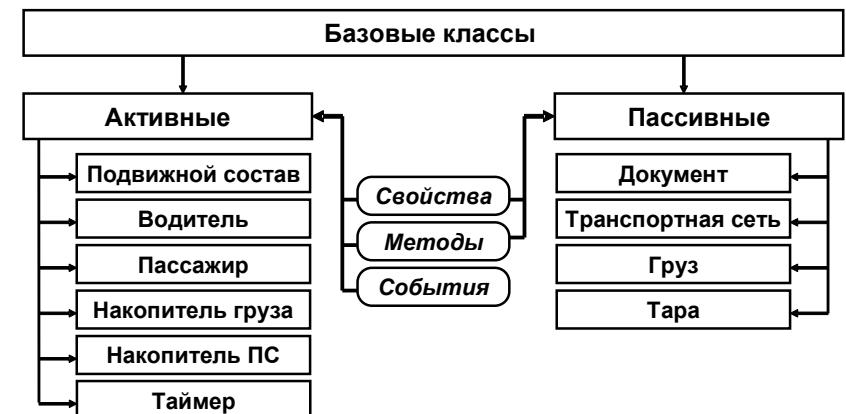


Рис. 3.36. Пример активных и пассивных объектов транспортной системы

Распространение принципов ООМ на планирование и управление транспортной системой позволяет использовать информацию о состоянии объектов управления на основе анализа событий. В зави-

симости от этого, инициируя выполнение тех или иных методов, можно изменять процесс функционирования системы, добиваясь оптимальных характеристик ее работы. При этом существенные потери времени, связанные с последовательной технологией выполнения процесса в транспортной системе, могут быть сокращены за счет параллельного выполнения методов для различных объектов или группы объектов.

Например, для каждого объекта набор методов можно объединить в четыре группы:

- планирование и (или) подготовка объекта к выполнению каких-либо действий;
- выполнение действия;
- проверка завершенности действия и правильности его выполнения;
- документальное оформление действия.

В этом случае выполнение методов всех четырех групп составит завершенный цикл функционирования объекта, как это показано на рис. 3.37.

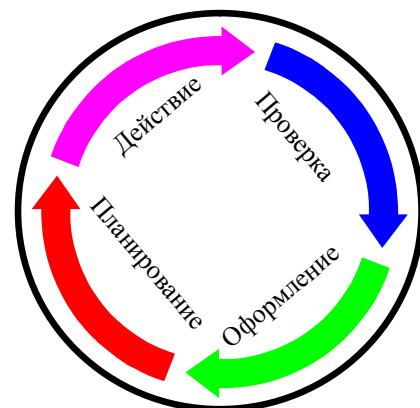


Рис. 3.37. Цикл работы объекта

Параллельность работы системы обеспечивается за счет того, что методы для связанных объектов выполняются не после завершения цикла работы каждого объекта, а могут инициироваться определенными событиями. Схематично это показано на рис. 3.38. Реализация предложенного подхода может быть осуществлена с помощью уже сегодня доступных для автопротивников средств телематики.

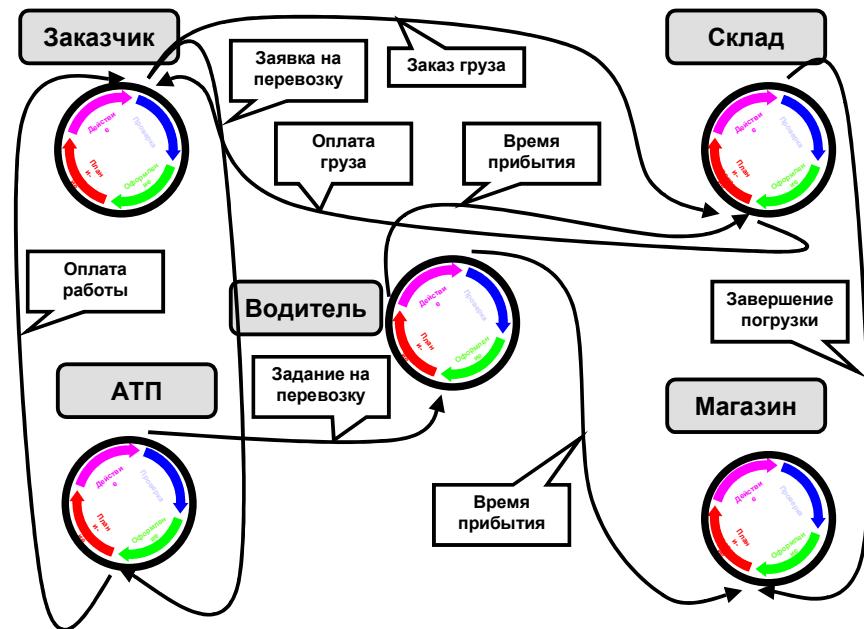


Рис. 3.38. Пример схемы планирования и управления доставкой груза, основанной на принципах ОММ

Таким образом, использование принципов ОММ обеспечивает:

- автоматизацию управления внешними бизнес-операциями между различными субъектами транспортной системы;
- оптимизацию транспортной системы за счет параллельного выполнения отдельных процессов;
- достоверную информацию о состоянии системы в реальном масштабе времени.

3.6. Геоинформационные системы

Геоинформационная система (ГИС) – это совокупность технических, программных и информационных средств, обеспечивающих ввод, хранение, обработку, математико-картографическое моделирование и динамическое представление пространственных и соотнесенных с ними атрибутивных данных.

В соответствии с приведенным определением ГИС имеют следующие подсистемы:

- 1) *подсистему сбора данных*, которая собирает и проводит предварительную обработку данных из различных источников. Эта подсистема также в основном отвечает за преобразования различных типов пространственных данных (например, от изолиний топографической карты к модели рельефа ГИС);
- 2) *подсистему хранения и выборки данных*, организующую пространственные данные с целью их выборки, обновления редактирования;
- 3) *подсистему манипуляции данными и анализа*, которая, выполнив различные задачи на основе этих данных, группирует и разделяет их, устанавливает параметры и ограничения и выполняет моделирующие функции;
- 4) *подсистему вывода*, которая отображает всю базу данных или часть ее в табличной, диаграммной или картографической форме.

Первая подсистема ГИС может быть соотнесена с первым и вторым шагом процесса картографирования – сбором данных и компиляцией (составлением) карт. Исходная информация берется из таких источников, как аэрофотосъемка, цифровое дистанционное зондирование, геодезические работы, словесные описания и зарисовки, данные статистики и т. д. Использование компьютера и других электронных устройств, например дигитайзера или сканера, позволяет проводить подготовку исходных данных для записи или кодирования точек, линий и областей к их дальнейшему использованию. Кроме того, источниками могут быть готовые цифровые карты, цифровые модели рельефа, цифровые фотоснимки и др.

Вторая подсистема – подсистема хранения и выборки – основана на СУБД. В ГИС подсистема хранения и выборки позволяет делать запросы, возвращающие только нужную, контекстно связанную информацию; она переносит акцент с общей интерпретации информации на формулирование адекватных запросов.

Анализ данных чаще всего является преимуществом человека – пользователя. Подсистема анализа позволяет значительно упростить и облегчить анализ пространственно связанных данных, практически исключить ручной труд и в значительной мере упростить расчеты, выполняемые пользователем. Подсистема анализа во многом определяет эффективность ГИС. ГИС-анализ использует потенциал современных

компьютеров – сравнения и описания информации, хранящейся в базах данных, которые дают быстрый доступ к исходным данным и позволяют агрегировать и классифицировать данные для дальнейшего анализа.

После выполнения анализа нужно представить его результаты. В картографии, будь то традиционная бумажная картография или ее цифровой эквивалент – компьютерная картография, выходной продукт в целом тот же – карта. Подсистема вывода позволяет компоновать результатирующие данные в любой удобной для пользователя форме: в виде таблиц, диаграмм, графиков и т. п.

Карта является основным языком географии. Следовательно, она является и основным языком компьютеризированной географии. Эта графическая форма представления пространственных данных состоит из различных координатных систем, проекций, наборов символов, методов упрощения и генерализации. Карта является моделью пространственных явлений, абстракцией.

Все реальные объекты отображаются на картах какими-либо условными знаками – примитивами. В ГИС применяют набор базовых геометрических примитивов, из которых создают все остальные, более сложные. Набор базовых примитивов обычно включает точки, линии, полигоны и поверхности.

Точечные объекты – это такие объекты, каждый из которых расположен только в одной точке пространства. Примером таких объектов могут быть деревья, дома, перекрестки дорог и др. О таких объектах говорят, что они дискретные в том смысле, что каждый из них может занимать в любой момент времени только определенную точку пространства. В целях моделирования считают, что у таких объектов нет пространственной протяженности, длины или ширины, но каждый из них может быть обозначен координатами своего местоположения. В действительности все точечные объекты имеют некоторую пространственную протяженность, пусть самую малую, иначе мы просто не смогли бы их увидеть. Принимаем отсутствие длины и ширины так, что, например, при измерениях атмосферного давления, характеризуемых потенциально бесконечным числом точек, сами точки всегда занимают определенные местоположения без каких-либо перекрытий. Масштаб, при котором мы наблюдаем эти объекты, задает рамки, определяющие представление этих объектов как точек. Например, если

вы смотрите на дом с расстояния нескольких метров, то сооружение выглядит внушительным и имеет существенные длину и ширину. Но это представление меняется, когда вы начинаете отдаляться: чем дальше, тем меньше дом выглядит как площадный объект, тем больше – как точечный.

Линейные объекты представляются как одномерные в координатном пространстве. Такими «одномерными» объектами могут быть дороги, реки, границы, изгороди, любые другие объекты, у которых один из геометрических параметров существенно больше другого. Масштаб, при котором мы наблюдаем эти объекты, опять же обуславливает порог, при пересечении которого мы можем считать эти объекты не имеющими ширины. Как вы знаете, реки, дороги, изгороди имеют два измерения при близком рассмотрении. Но чем дальше мы от них, тем более тонкими они становятся. Постепенно они становятся такими тонкими, что оказывается возможным представить их себе как линейные объекты. Другие линии, такие как политические границы, вообще не имеют ширины. В действительности эти линии даже не являются материальными сущностями, а возникают как следствие политических соглашений.

Для линейных объектов, в отличие от точечных, мы можем указать пространственный размер простым определением их длины. Кроме того, поскольку они не занимают единственное местоположение в пространстве, мы должны знать, по меньшей мере, две точки: начальную и конечную – для описания местоположения линейного объекта в пространстве. Чем сложнее линия, тем больше точек нам потребуется для указания точного ее расположения. Опираясь на геометрию, мы можем также определять формы и ориентации линейных объектов.

Линейные объекты могут быть *замкнутыми* (контуры) или *незамкнутыми* (линии).

Объекты, рассматриваемые с достаточно близкого расстояния, чтобы иметь и длину и ширину, называются *полигонами* или *площадными объектами*. Примеры этих двухмерных объектов включают территории, занимаемые двором, городом или целым континентом. При определении местоположения полигона в пространстве мы обнаруживаем, что его граница является линией, которая начинается и кончается в одной и той же точке. Помимо указания местоположения областей через использование линий, мы можем себе представить теперь три

характеристики: как и для линий, мы можем указывать их форму и ориентацию, а теперь еще и величину площади, которую область занимает.

Добавление нового измерения – высоты к площадным объектам, позволяет нам наблюдать и фиксировать *поверхности*. Хотя мы можем рассматривать дом с близкого расстояния и описывать его в терминах его общей длины и ширины, нам часто нужно знать, сколько в нем этажей. В таком случае нам нужно рассматривать дом не как плоскую область, а как трехмерный объект, имеющий длину, ширину и высоту. Поверхности окружают нас повсюду. Холмы, долины, гряды гор, скалы и множество других образований могут описываться указанием их местоположения, занимаемой площади, ориентации и теперь с добавлением третьего измерения – их высот.

Поверхности состоят из бесконечного числа точек со значениями высот. Мы говорим, что они непрерывны, поскольку эти точки распределены без разрывов по всей поверхности, что показано на рис. 3.39. В действительности, поскольку высота трехмерного объекта меняется от точки к точке, мы можем также измерять величину изменения высоты с перемещением от одного края до другого. Имея такую информацию, мы можем определить объем материала в выбранном образовании. Возможность таких вычислений весьма полезна, когда нам нужно узнать, например, как распределены жители по площади региона.

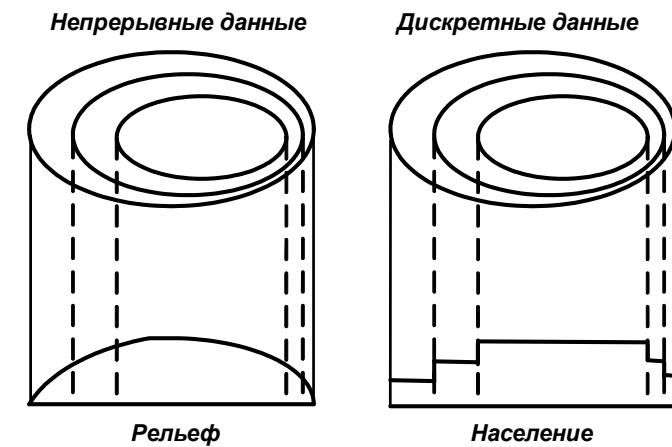


Рис. 3.39. Непрерывные и дискретные поверхности

В ГИС каждый примитив или созданный на их основе объект помимо специфических картографических данных содержит информацию, необходимую для решения задач планирования и управления в соответствующей предметной области.

Геопространственные данные – это набор данных, которые индивидуально или в определенной совокупности определяют географическое положение, форму и содержание реальных пространственных объектов. Они содержат четыре интегрированных компонента:

- местоположение;
- свойства и характеристики;
- пространственные отношения;
- время.

Основным способом определения расположения объектов на местности является задание их координат (широта, долгота и высота над уровнем моря). Поверхность Земли имеет сложную форму. При составлении карт пространственное положение точек отображается в плоскостном представлении, для чего используются различные математические модели поверхности, задающие различные картографические проекции. Процедуры пересчета координат для различных проекций, трансформации картографических проекций относятся к наиболее сложным математическим операциям.

Электронные карты отличаются от бумажных возможностью масштабирования. *Масштаб* – это отношение длины некоторого отрезка на карте к длине того же отрезка на земле. С уменьшением масштаба на электронной карте отображается более детальная информация и наоборот. Это расширяет круг решаемых задач. Например, можно спланировать маршрут как между городами, так и детально по городским улицам.

Картографические объекты содержат информацию не только о том, как они располагаются в пространстве, но и о том, чем они являются и насколько важны для нашего рассмотрения. Например, дерево, обозначенное как точечный объект, может быть отнесено к определенному классу на основе таксономической терминологии, т. е. дуб, сосна и т. п. Дополнительная непространственная информация, помогающая нам описывать объекты, наблюдаемые в пространстве, образует набор атрибутов объектов.

Атрибуты объектов распределяются по категориям, а затем классифицируются. Это делается для того, чтобы можно было сказать, что

определенный объект с определенным названием и с некоторыми измеримыми атрибутами существует в определенном месте. Но перед тем как присвоить эти атрибуты объектам, мы должны знать, как их измерять. Иначе мы не сможем сравнивать объекты в одном месте с объектами в другом месте.

Существует устоявшаяся основа для измерения практически всех видов данных, в том числе и географических. Это так называемые *шкалы измерения данных*, которые простираются от простого именования объектов, до высокоточных измерений, позволяющих нам непосредственно сравнивать качества различных объектов. Используемая шкала измерений будет определяться отчасти типом классификации, отчасти необходимой информацией и отчасти возможностями производить измерения при заданном масштабе наблюдения.

В качестве примера на рис. 3.40 приведены некоторые шкалы измерения данных.

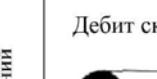
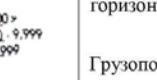
Шкала	Примеры измерений характеристик объектов		
	Точки	Линии	Области
Номинальная (нamingований)	• город	— дорога	● болото
	■ шахта	----- граница	● пустыня
	* вершина горы	— река	● лес
Порядковая (ранговая)	Город: большой	Шоссе: федеральное	Загрязненность территории: большая
	средний	региональное	умеренная
	малый	местная дорога	малая
Интервалов/ отношений	Дебит скважины 	Отметка горизонтали  Грузопоток 	Плотность населения  Интервалы высот 

Рис. 3.40. Примеры шкал измерения данных

Номинальная шкала разделяет объекты по именам. Эта шкала позволяет говорить о том, как называется объект, но не позволяет делать прямого сравнения объектов.

Если необходимо провести более тонкое сравнение объектов, то следует выбрать более высокую шкалу измерений. Таковой является порядковая шкала, позволяющая проводить качественное сравнение от лучшего к худшему для данного конкретного вопроса. Если необходима более высокая точность в измерениях, то нужно воспользоваться интервальной шкалой измерения, в которой измеряемым величинам приписываются численные значения. Как и при использовании порядковой шкалы, здесь тоже можно сравнивать объекты, но сравнения могут делаться с более точной оценкой различий.

Представление пространственных данных может быть выполнено с помощью растровой или векторной моделей.

Растровая модель использует квантование, или разбиение пространства на множество элементов, каждый из которых представляет малую, но вполне определенную часть земной поверхности. Этот растровый метод может использовать элементы любой подходящей геометрической формы (обычно это квадрат) при условии, что они могут быть соединены для образования сплошной поверхности, представляющей все пространство изучаемой области.

Растровые структуры данных не обеспечивают точной информации о местоположении, поскольку географическое пространство поделено на дискретные ячейки конечного размера. Вместо точных координат точек мы имеем отдельные ячейки растра, в которых эти точки находятся. Линии, т. е. одномерные объекты, изображаются как цепочки соединенных ячеек. Каждая точка линии представляется ячейкой растра, и каждая точка линии должна находиться где-то внутри одной из ячеек растра.

В растровых моделях атрибутивная информация «привязывается» к каждой ячейке.

Векторная модель позволяет задавать точные пространственные координаты явным образом. Здесь подразумевается, что географическое пространство является непрерывным, а не разделенным на дискретные ячейки. Это достигается приписыванием точкам пары координат (X и Y) координатного пространства, линиям – связной последовательности пар координат их вершин, областям – замкнутой последователь-

ности соединенных линий, начальная и конечная точки которой совпадают. Векторная структура данных показывает только геометрию картографических объектов. Каждый объект связан с соответствующими атрибутивными данными, хранящимися в отдельном файле или в базе данных. В векторных структурах данных линия состоит из двух или более пар координат, для одного отрезка достаточно двух пар координат, дающих положение и ориентацию в пространстве. Более сложные линии состоят из некоторого числа отрезков, каждый из которых начинается и заканчивается парой координат. Таким образом, видно, что векторные модели лучше представляют положения объектов в пространстве, они более точные.

Хотя некоторые линии существуют самостоятельно и имеют определенную атрибутивную информацию, другие, более сложные наборы линий, называемые сетями, содержат также дополнительную информацию о пространственных отношениях этих линий. Например, дорожная сеть содержит не только информацию о типе дороги и ей подобную, она показывает также возможное направление движения. Другие коды, связывающие эти отрезки, могут включать информацию об узлах, которые их соединяют. Все эти дополнительные атрибуты должны быть определены по всей сети, чтобы компьютер знал присущие реальности отношения, которые этой сетью моделируются. Такая явная информация о связности и пространственных отношениях называется топологией.

Площадные объекты могут быть представлены в векторной структуре данных аналогично линейным. Соединяя отрезки линии в замкнутую петлю, в которой первая пара координат первого отрезка является одновременно и последней парой координат последнего отрезка, мы создаем область, или полигон. Как с точками и линиями, так и с полигонами связывается файл, содержащий атрибуты этих объектов.

В зависимости от ГИС векторные и растровые модели данных могут в той или иной степени преобразовываться друг в друга, хотя чаще всего преобразование предусматривается только для печати графических данных.

Цифровая карта может быть организована как множество слоев. **Слои в ГИС** являются типом цифровых картографических моделей, которые построены на основе объединения пространственных объектов или набора данных, имеющих общие свойства или функциональ-

ные признаки. Совокупность слоев образует интегрированную основу графической части ГИС (рис. 3.41). Принадлежность объекта или части объекта к слою позволяет использовать общие свойства и выполнять действия сразу со всеми объектами данного слоя.

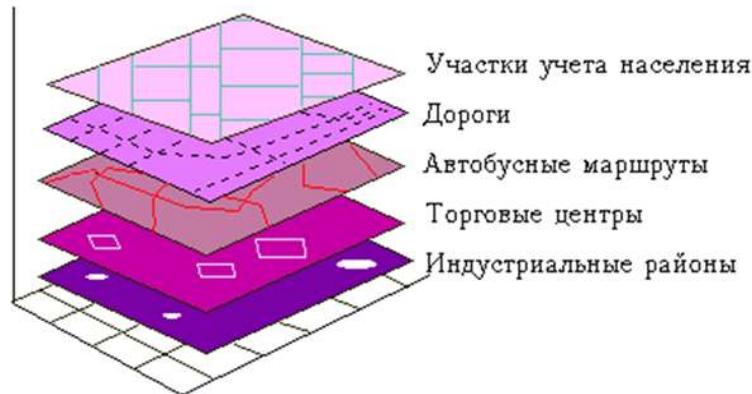


Рис. 3.41. Пример слоев в ГИС

Слои могут иметь как векторные, так и растровые форматы. Однако надо учитывать, что большинство ГИС допускает растровый формат только для одного – фонового слоя (подложки).

3.7. Оценка эффективности транспортных систем

Эффективность услуг транспортной отрасли определяет успешное развитие экономики любого государства. Транспортный сектор играет ключевую роль в стимулировании экономической активности населения, расширении рынков сбыта и повышении доступности к ресурсам для предприятий, а также является важнейшим элементом эффективной интеграции страны в мировую экономику.

Рассматривая эффективность транспортной системы, необходимо учитывать особое значение транспорта в экономике и социальной сфере страны, которое рассматривалось в п. 2.1. Построенная в соответствии с этими особенностями **схема формирования эффективности** приведена на рис. 3.42.

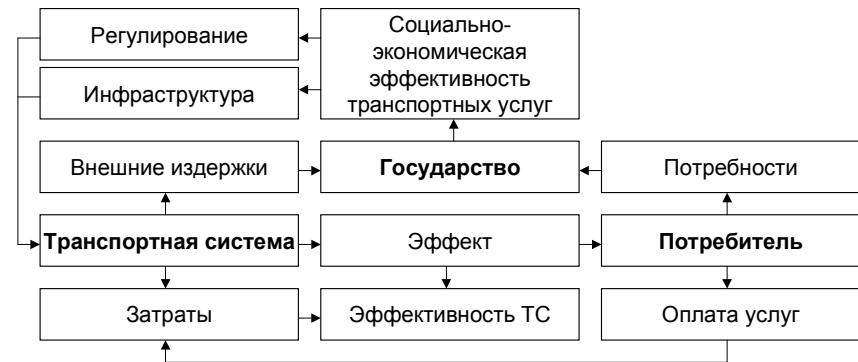


Рис. 3.42. Схема формирования эффективности транспортной системы

Эффективность транспортной системы всегда будет формироваться на двух уровнях с участием *трех субъектов: транспортной системы, потребителя ее услуг и государственных органов*. В соответствии с таким подходом в основу обеспечения эффективности закладывается максимально возможное сглаживание противоречий между субъектом транспортной системы и двумя другими субъектами.

На первом уровне экономическая эффективность транспортной системы будет определяться отношением эффекта ее работы к затратам. Можно сказать, что это ее внутренняя эффективность, которая определяется так же, как и для любого предприятия. Ясно, что без достижения необходимого уровня эффективности деятельность транспортной системы невозможна.

На втором уровне эффективность транспортной системы определяется с трех основных позиций:

1. В какой мере система удовлетворяет потребности государства в развитии экономики и социальной сферы.
 2. В какой мере система удовлетворяет потребности потребителей для ведения бизнеса, обеспечения мобильности и других аспектов качества жизни.
 3. Каковы последствия функционирования транспортной системы, выражющиеся во внешних издержках, с точки зрения экономических, социальных и экологических задач государства.

Сила связей в схеме формирования эффективности зависит от сферы услуг транспортной системы. В сфере грузовых перевозок, как правило, тарифы формируются на рыночной основе и деятельность транспортной системы определяется конъюнктурой соответственного сектора экономики. В сфере пассажирских перевозок социальные задачи вынуждают государственные органы прибегать к директивному регулированию тарифов и соответственно компенсировать затраты для обеспечения необходимого уровня внутренней эффективности (рентабельности). В этом случае государственные органы должны брать на себя и обеспечение качественных показателей работы транспортной системы, так как рыночные механизмы регулирования в условиях директивного определения тарифов не действуют.

Исходя из изложенных принципов необходимо обратить внимание на правильную оценку эффективности объектов транспортной инфраструктуры. При выборе варианта строительства, например, вокзала или дороги, грубой ошибкой является оценка только по стоимости строительства, без учета эффективности использования объекта пользователями. Например, для снижения стоимости путепроводов распространенным приемом является сужение проезжей части по сравнению с остальными участками дороги. Последствием этого являются задержки транспортных потоков, повышенная аварийность и т. п.

Независимо от сферы функционирования транспортной системы важнейшими для общества остаются задачи государственных органов по снижению внешних издержек функционирования транспортной системы, выражющиеся в формировании требований к используемым транспортным средствам, режимам работы, трассам движения и т. п.

Противоречия в оценке эффективности работы транспортной системы стимулируют развитие новых форм транспортного обслуживания. Одно из основных направлений – это расширение транспортной системы на смежные виды деятельности, что позволяет повысить объективность оценки эффективности. Например, создание логистических систем позволяет использовать единую оценку эффективности транспортных и складских операций, выполняемых различными субъектами в цепочке доставки. В сфере пассажирских перевозок распространенной тенденцией является укрупнение транспортных компаний и объединение в единую транспортную систему систем отдельных видов транспорта. Например, объединение системы метро и трамвая сти-

мулирует в такой транспортной системе развивать экономически эффективные виды транспорта, создавать удобные для пассажиров пересадочные узлы, что снижает затраты системы и повышает качество предоставляемых услуг.

Для оценки эффективности системы первостепенное значение имеет выбор показателя эффективности. **Показатель эффективности** – мера степени соответствия реального результата требуемому.

Основным требованием при выборе показателя эффективности является его соответствие цели функционирования системы, которая отображается требуемым результатом P_{tp} . Для описания соответствия реального результата P требуемому формально вводят числовую функцию на множестве a результатов работы системы (*функция соответствия*)

$$C = c(P(a), P_{tp}).$$

Функция соответствия в некоторой шкале показывает степень достижения цели, а конкретный вид функции соответствия зависит от цели работы системы, задачи исследования и других факторов. В связи с тем, что $P(a)$ может быть случайной переменной, функция соответствия также может быть случайной величиной как числовая функция случайного аргумента.

Если результат выражается случайной переменной, то в качестве показателя эффективности можно принять математическое ожидание этой функции:

$$\Pi(a) = M(c(P(a), P_{tp})).$$

Если $P(a)$ и P_{tp} неслучайные переменные, то

$$\Pi(a) = c(P(a), P_{tp}).$$

Таким образом, в детерминированном случае функция соответствия служит показателем эффективности системы.

Для того чтобы функция $\Pi(a)$ могла рассматриваться в качестве показателя эффективности, помимо *соответствия цели функционирования системы* она должна удовлетворять требованиям *содержатель-*

ности, интерпретируемости, измеримости, соответствия системе управления. Соответствие системе управления обычно определяется отношением к различным ситуациям в условиях неопределенности (уровень риска), которое можно учесть введением специальной оценочной функции $f_p(c)$. С учетом этого показатель эффективности можно представить как математическое ожидание оценочной функции:

$$\Pi(a) = M(f_p(c(P(a), P_{tp}))).$$

Показатели, построенные без учета оценочной функции, называют *объективными*, а с учетом – *субъективными*, так как в этом случае учитываются предпочтения лица, принимающего решения по управлению работой системы.

Если результат работы системы можно описать единственной величиной, то показатель эффективности будет являться *скалярным*. В противном случае вводят *векторный показатель эффективности*.

$$\Pi_i(a) = M(f_p(c_i(P_i(a), P_{tp}))), i = 1, m.$$

Введение векторного показателя эффективности обычно необходимо, когда единственная цель работы системы достигается решением нескольких задач, эффективность решения каждой из которых оценивается соответствующим *частным показателем* $\Pi_i(a)$, но определить обобщенный показатель не удается. Если результат работы системы достигается в результате работы нескольких подсистем, то каждый частный показатель будет характеризовать эффективность работы i -й подсистемы. Если результат работы системы достигается на нескольких этапах, то каждый частный показатель будет характеризовать эффективность работы на i -м этапе.

Критерий эффективности – правило, позволяющее сопоставлять стратегии управления, характеризующиеся различной степенью достижения цели, и осуществлять направленный выбор стратегий из множества допустимых.

Критерий эффективности принимается на основе определенной концепции решения об эффективности системы. Существуют три концепции:

- *пригодности* – подразумевает, что система эффективна, если выбранный показатель эффективности принимает значение не ниже

некоторого приемлемого уровня: $\Pi(a) \geq \Pi_{tp}$. При этой концепции все решения делятся на две группы: приемлемые и неприемлемые, что не позволяет выбрать наилучшую стратегию управления;

- *оптимальности* – считается лучшим решение, которое обеспечивает максимальный эффект. В общем случае оптимальная стратегия может дать не единственное решение, если максимальный эффект обеспечивается несколькими равноценными решениями в управлении системой. Оптимальную стратегию можно использовать в стабильных условиях работы системы, что не характерно для транспортных систем. В этом случае для принятия оптимального решения необходимо фиксировать все внутренние и внешние факторы, что не позволяет учесть текущую информацию;

- *адаптации* – предполагает возможность оперативного реагирования в ходе работы системы на поступающую текущую информацию об изменении условий работы. Суть концепции адаптации заключается в изменении стратегии управления на основе не только априорной, но и текущей и прогнозной информации для достижения или сохранения определенного состояния системы при изменяющемся комплексе условий работы системы.

В качестве примера использования той или иной концепции оценки эффективности можно привести систему управления светофорной сигнализацией на пересечении дорог. На таком примере будет хорошо видно, что принятие той или иной концепции, как правило, связано не только с предпочтениями лица, принимающего решения, но и со свойствами системы.

В настоящее время в нашей стране большинство светофорных постов управляет достаточно примитивными контроллерами, которые поддерживают один режим работы (не считая режима желтого мигания). В этом случае, принимая решение об использовании определенного режима работы светофорного поста, мы можем использовать только концепцию пригодности, так как параметры транспортных потоков в разное время суток и в разные дни недели и сезоны года будут различны, а режим работы светофора будет один, удовлетворяющий средним условиям.

Если контроллер поддерживает несколько режимов работы, то для определенных периодов времени или при наличии соответствующих датчиков в зависимости от параметров транспортных потоков для

определенных условий мы можем использовать оптимальный режим работы, например, по критерию минимума суммарных задержек транспортных средств. В этом случае мы используем концепцию оптимальности для конкретного периода или условий движения.

Современные контроллеры, поддерживающие цифровые технологии, имеют встроенный процессор и, реализуя определенные алгоритмы, могут в зависимости от сигналов датчиков самостоятельно выбирать те или иные режимы работы. Для прогнозирования ситуации датчики устанавливаются как перед перекрестком, так и на определенном удалении от него или, что еще лучше, обеспечивается возможность получения данных со смежных перекрестков. В этом случае мы можем говорить об адаптивной концепции управления и соответственно оценки эффективности.

При выборе инструментария оценки эффективности системы необходимо учитывать, какой **подход при принятии решения** будет использоваться. В практике оценки варианта развития или создания транспортных систем можно выделить наиболее часто используемые подходы к принятию решения.

Решения, принимаемые на основе генерального плана, являются наиболее распространеными в области транспортного планирования. Преимущества такого подхода заключаются в возможности широкой апробации генерального плана, выделения достаточных финансовых и временных ресурсов для его разработки, прогнозирования на длительный срок. Однако такой подход хорошо работает только в стабильных условиях. Когда условия реализации генерального плана быстро меняются, его адаптация не успевает за изменением условий и план теряет свою актуальность.

Метод сравнительного предпочтения (нормативная модель) очень популярен и заключается в сравнении выбранных показателей вариантов, связанных с капитальными вложениями, стоимостью эксплуатации, производительностью, качеством, экологией и т. п. Проблемы заключаются в сведении разных показателей к сопоставимому виду и разумному выбору весовых коэффициентов для оценки вклада каждого показателя в эффективность системы. Как правило, для каждого варианта формируют функцию полезности путем оценки выгод и затрат по включенными в оценку показателям. Выбирается вариант, для которого функция полезности имеет максимальное значение.

Поведенческая модель выбора является упрощенным вариантом нормативной модели. В этом случае вместо максимизации функции полезности ограничиваются поиском приемлемого варианта. Если рассматриваемый вариант не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то пытаются улучшить отдельные показатели до удовлетворительного уровня, а как только это удается, останавливаются на данном варианте.

Метод на основе совещаний наиболее распространен в нашей стране и предусматривает изучение и анализ вариантов коллективом специалистов и выбор варианта на основе компромисса мнений. Основным недостатком данного подхода является опасность авторитарного влияния отдельной личности в коллективе, что не гарантирует оптимального решения.

В транспортном планировании процедуру выбора можно formalизовать по глубине анализа и горизонту планирования, как это представлено на рис. 3.43.

Уровни анализа транспортной системы	Горизонт планирования		
	Оперативный	Тактический	Стратегический
Пространственный анализ мест транспортного притяжения			
Анализ спроса на транспортные услуги			
Возможности транспортной системы по производительности, качеству обслуживания и т. п.			
Ресурсные возможности транспортной инфраструктуры			
Минимизация затрат			
Технология выполнения транспортных услуг			

Рис. 3.43. Взаимосвязь уровня анализа и горизонта планирования

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику основным задачам исследования транспортных систем.
2. Опишите понятия модели и моделирования как основных способов познания систем.
3. Приведите классификацию математических моделей.
4. Опишите структуру классической четырехшаговой транспортной модели.
5. Дайте характеристику гравитационной модели как модели спроса на транспортное обслуживание.
6. Дайте характеристику энтропийной модели как модели спроса на транспортное обслуживание.
7. Опишите динамические модели прогнозирования перевозок.
8. Назовите основные принципы распределения перевозок по транспортной сети.
9. Дайте общее понятие об имитационном моделировании.
10. Что такое системы массового обслуживания?
11. Назовите основные характеристики случайных величин.
12. Приведите примеры моделирования непрерывных и дискретных случайных величин.
13. Как производится моделирование случайного события?
14. Как производится моделирование потока событий?
15. Приведите последовательность анализа результатов моделирования.
16. Опишите принципы объектно-ориентированного подхода к моделированию транспортных систем.
17. Назовите особенности и назначение геоинформационных систем.
18. Опишите схему формирования эффективности транспортной системы.
19. Дайте характеристику критериям и показателям эффективности транспортной системы.

Глава 4. РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

4.1. Потребности современной экономики и общества в транспортных услугах

Логика развития современного общества свидетельствует о возрастающей роли транспорта в экономической и социальной сферах.

Глобализация экономических процессов приводит к увеличению доли распределенных производственных систем, в которых отдельные производственные циклы реализуются в условиях минимальной себестоимости. На выбор места производства в этом случае влияют условия экономической деятельности, наличие доступных ресурсов и т. д., причем совокупность влияния этих факторов превышает возрастание транспортных расходов. Развитие распределенных производств также приводит к повышению требований к уровню организации и технологии работы транспорта в соответствии с требованиями реализуемых технологических процессов.

Для общества условия **обеспечения мобильности** стали неотъемлемой частью уровня жизни. Обычно под мобильностью понимается в самом широком смысле возможность интеллектуального, профессионального, социального и пространственного обмена. Что касается транспорта, то под мобильностью мы будем понимать возможность пространственного перемещения людей. При этом повышение мобильности всегда находится в противоречии с возможностями соответствующей инфраструктуры. Еще в прошлом веке стало ясно, что повышение мобильности путем обеспечения возможности приобретения автомобилей ведет в тупик, так как невозможно построить адекватную транспортную сеть даже в условиях отсутствия финансовых ограничений по причине дефицита свободных площадей и экологических последствий. Основным глобальным итогом экологических последствий от широкого использования автомобилей наряду с промышленной и аграрной деятельностью стало потепление климата на нашей планете. Из-за этого уровень Мирового океана уже поднялся на 20 см и все чаще приходится сталкиваться с масштабными природными катаклизмами.

В связи с этим в Европе уже в конце прошлого века в транспортной политике взят курс на ограничение использования в крупных городах личного транспорта и развитие общественного с высоким уровнем качества обслуживания. В этом контексте любопытно проследить основные тенденции развития общественного транспорта в нашей стране и Европе, этапы которого сведены в табл. 4.1.

Политика развития общественного транспорта тесно увязана с потребностями снижения расходов общества на поддержание требуемого уровня мобильности населения. Связанная с повышением качества жизни потребность в увеличении ресурсов не может быть компенсирована непрерывным увеличением расходов, поэтому необходимо снижение себестоимости потребляемых ресурсов. В современных условиях в первую очередь это относится к энергетике и транспорту.

На рис. 4.1 на примере крупнейших городов приведено соотношение между уровнем развития общественного транспорта и затратами городского бюджета на обеспечение мобильности населения. Хорошо видно, что развитие общественного транспорта в целом экономически эффективно для общества.

Таблица 4.1

Этапы развития общественного транспорта

Период	СССР / Россия	Западная Европа
До 70-х годов XX века	Планомерное развитие общественного транспорта как основного вида транспорта для населения Административное ограничение количества личного транспорта	Бурное развитие автомобилизации Использование общественного транспорта как вспомогательного
Конец XX века	Почти полное прекращение финансирования общественного транспорта Бурное развитие автомобилизации	Приватизация общественного транспорта для увеличения инвестиций в его развитие при строго регулируемом рынке услуг
Начало XXI века	Приватизация общественного транспорта для увеличения инвестиций в его развитие при слабо регулируемом рынке услуг	Введение экономических мер ограничения использования личного транспорта

Например, в Сингапуре, по численности населения равном Хьюстону, на общественном транспорте совершаются более половины всех поездок. При этом расходы бюджета на транспорт меньше на 10 млрд долл., что составляет примерно 3 тыс. долл. на одного жителя при существенно лучшей транспортной доступности. Это реальный пример той нагрузки, которую несет экономика за попытку решить проблемы мобильности только за счет личного транспорта, а, как видно на рис. 4.1, в Хьюстоне на личном транспорте совершается более 95 % всех поездок.

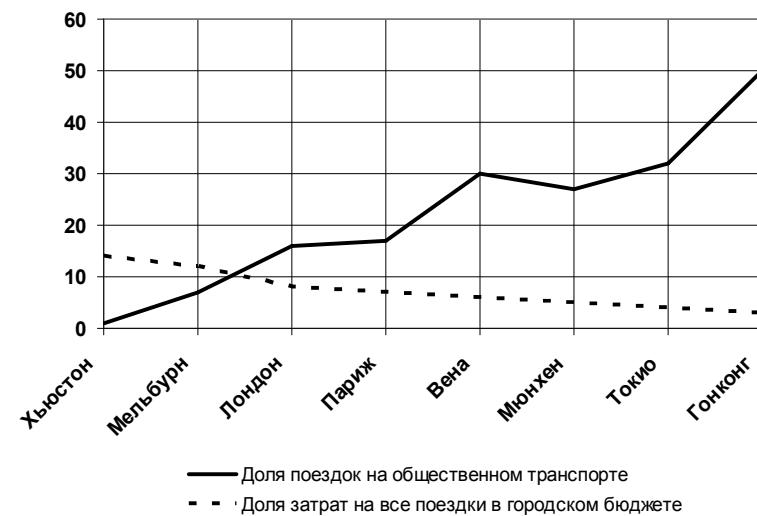


Рис. 4.1. Затраты на поддержание мобильности в зависимости от использования общественного транспорта

Помимо затрат на транспортную инфраструктуру население все больше времени вынуждено проводить в поездке. В таких городах, как Хьюстон или Рим, это время составляет более полутора часов в день. Из крупных городов мира лучший показатель достигнут в Копенгагене, где каждый день жители тратят на поездки не более 50 мин.

В связи с тем, что в среднем в крупнейших городах мира количество автомобильного транспорта возрастает на 10 % в год (до 20 % в развивающихся странах) можно сделать вывод, что города без развитого общественного транспорта не имеют экономической перспективы развития, так как все большая доля городского бюджета будет тра-

титься на поддержание возможности функционирования личного и грузового автотранспорта²¹.

Структурная модель смещения спроса на использование личных автомобилей приведена на рис. 4.2. Здесь же курсивом в овальных текстовых блоках перечислены основные мероприятия, которые могут замедлить негативные тенденции увеличения использования личного транспорта или даже, наоборот, вызвать снижение количества автомобилей, используемых в городе.

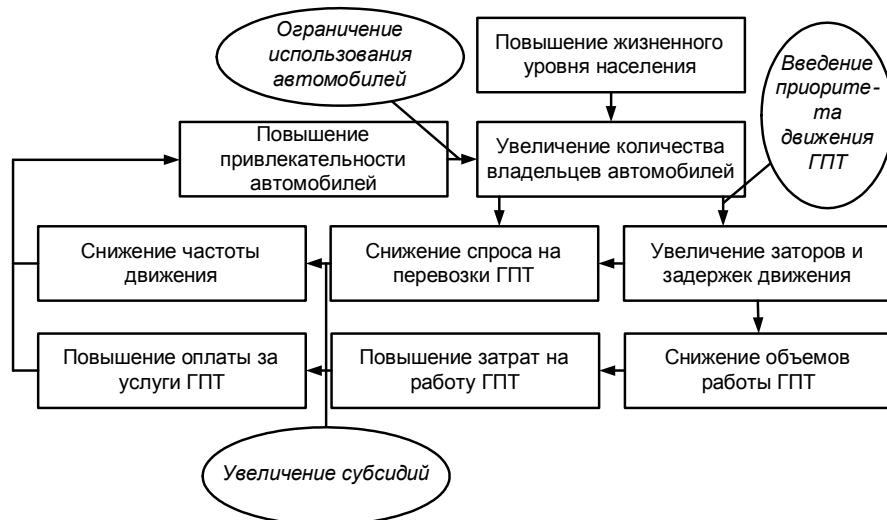


Рис. 4.2. Структурная модель увеличения использования доли личного транспорта в поездках населения

В связи с изменением роли общественного транспорта в достижении мобильности изменяется и оценка эффективности его работы. Если раньше основными критериями оценки были такие показатели, связанные с оценкой объемов выполненной работы, как суммарный пробег подвижного состава, предоставленные место-километры и т. п., то теперь в основе оценки должны лежать показатели, связанные с удовлетворением потребности населения в транспортных услугах: среднее время ежедневных поездок, скорость доставки и т. п. В этой связи возра-

²¹ www UITP.com – UITP Millennium Cities Database for Sustainable Transport – Официальный сайт Международного союза общественного транспорта.

стает значение маркетинга как основного инструмента для проектирования интегрированных транспортных систем, в наиболее полной мере удовлетворяющих потребности населения. В таких системах различные виды транспорта комплексно используются для достижения максимально качественной транспортной услуги. Например, во многих крупных аэропортах созданы экспрессные системы внеуличного транспорта для доставки пассажиров в центральные районы городов, что позволяет сократить общее время поездки пассажиров.

Таким образом, развитие общества и экономики тесно связано с развитием транспортных систем. Эта связь взаимна. Новые возможности транспортных систем позволяют повысить эффективность экономики. Так было, когда на морских судах паруса заменили двигатели, что позволило организовать массовые доставки сырьевых товаров из Африки и Азии независимо от погодных условий и способствовало росту промышленности Европы. В той же Европе развитие специализации промышленных предприятий основывалось на появлении широкой сети скоростных дорог и большегрузного экономичного автомобильного транспорта. С другой стороны, рост потребности экономики в сырьевых ресурсах вызвал необходимость строительства супертанкеров, требования экологии – появление гибридных и электрических автомобилей. Таких примеров можно привести много.

4.2. Направления развития транспортных систем

Функционирование и развитие транспортных систем невозможно без решения ключевых проблем автомобильного транспорта и тем самым снижения негативных последствий его деятельности для общества. Можно выделить основные проблемы автомобильного транспорта, без решения которых невозможно его эффективное развитие.

1. Существенное влияние автомобильного транспорта на загрязнение окружающей среды. Это влияние ощущают на себе практически все жители крупных и малых городов и поселений, расположенных вдоль автомобильных дорог. В 2008 г. автомобильным транспортом в нашей стране в атмосферу было выброшено более 17 млн т загрязняющих веществ, что составляет 46 % в общем объеме выбросов, включая стационарные источники²². При этом за последние годы объем выб-

²² Транспорт России. 2009: статистический сборник. М.: Росстат, 2009. 215 с.

росов и доля автомобильного транспорта в загрязнении окружающей среды только возрастает. Основные направления в снижении экологического воздействия заключаются в совершенствовании конструкции автомобилей, особенно двигателей, ужесточении экологических норм, использовании при производстве автомобилей экологически чистых материалов, совершенствовании организации движения с целью снижения транспортных задержек и повышении плавности движения, совершенствовании процессов технического обслуживания и ремонта, утилизации выведенных из эксплуатации транспортных средств.

2. Возрастание потребления нефтепродуктов, запасы которых ограничены. При этом удовлетворение потребностей транспорта в нефтепродуктах во многом обусловливает развитие экологически опасных производств в нефтяной, химической промышленности и металлургии. Основным направлением работ в данном направлении является использование на транспорте возобновляемых источников энергии, технологий снижения потребления нефтяного топлива (гибридные автомобили), совершенствование конструкции и т. п.

3. Развитие и повышение качества дорожной сети. В России плотность автомобильных дорог составляет $0,044 \text{ км}/\text{км}^2$, тогда как в Финляндии этот показатель достигает $1 \text{ км}/\text{км}^2$, а в Японии – $3 \text{ км}/\text{км}^2$. Но помимо необходимости расширения транспортной сети не менее актуальна необходимость модернизации существующей дорожной сети для повышения ее пропускной способности и повышения безопасности движения. Значительные резервы кроются в совершенствовании организации дорожного движения.

4. Увеличение издержек общества от ДТП. Так, в 2008 г. в нашей стране произошло более 218 тыс. ДТП, в результате которых погибло почти 30 тыс. человек и более 270 тыс. получили ранения²³. ДТП наносят экономике нашей страны значительный ущерб, составляющий в последние годы около 2,5 % валового внутреннего продукта страны. Примеры резкого снижения аварийности демонстрируют развитые страны, используя системный подход к этой проблеме. Необходимо в первую очередь изменить технологию надзора над дорожным движением, вернуться к более жестким требованиям к подготовке профессиональных водителей, совершенствовать пассивную и активную безопасность транспортных средств, создавать систему современных авто-

дорог с эффективной организацией дорожного движения, развивать общественный транспорт.

Для удовлетворения потребностей современной экономики и общества в снижении транспортных издержек и повышении скорости доставки грузов транспортным компаниям приходится как использовать средства современных технологий, так и модернизировать организацию своего бизнеса.

Модернизация бизнеса охватывает следующие основные тенденции, превращающие транспортные системы доставки в логистические:

- Укрупнение бизнеса для охвата большей сферы деятельности позволяет включить в управление большее количество объектов. Объединение транспортировки с выполнением грузовых операций позволяет оптимизировать в целом цепочку поставок, снижая таким образом общие затраты на доставку. Практика показывает, что оптимизация цепочек поставок по единому критерию приводит к снижению складских затрат и повышению затрат на транспортировку. Условием такой оптимизации, естественно, является общее управление цепочкой поставок.
- Формирование холдинга позволяет объединить отдельные участки цепочки поставок, которые обслуживают небольшие специализированные компании. По всей цепочке поставок с помощью соответствующих структур холдинга проводятся координация и согласование деятельности. Тем самым в системе достигаются показатели эффективности, сопоставимые с вариантом укрупнения бизнеса.

За последние несколько лет можно выделить три основных направления развития логистических компаний: расширение кооперации, прозрачность бизнеса и аутсорсинг. Все эти тенденции серьезно влияют на разделение задач, выполняемых в рамках доставки товаров, что в свою очередь требует развития единого информационного пространства в рамках цепочки поставок, средств обмена и распределенной обработки данных о процессах и ресурсах. В качестве примеров методов, которые получили развитие в логистике в самое последнее время, можно привести программы совместного планирования, прогнозирования и поддержания запасов – Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR) и управления запасами оптовых фирм – Vendor Managed Inventory (VMI). Прозрачность бизнеса в цепочке поставок означает доступность информации для всех партнеров и клиентов о продвижении грузов, наличии товарных запасов и ресурсов.

²³ Официальный сайт ГИБДД: www.gibdd.ru.

Современные достижения технологии призваны обеспечивать эффективное управление в распределенных системах, в которых зачастую выполняют доставку грузов юридически различные субъекты цепочки поставок. Из основных технологий в этой сфере выделим следующие, наиболее эффективно использующиеся в логистических системах доставки:

- средства идентификации грузов, позволяющие автоматизировать грузовые операции по всей цепочке поставок;
- навигационные системы слежения за транспортными средствами, обеспечивающие информацию о положении и состоянии подвижного состава в режиме реального времени;
- средства телематики, позволяющие осуществлять обмен информацией и интегрировать ее в компьютерные системы распределенных субъектов;
- мощные вычислительные средства, обеспечивающие транзакционную и аналитическую обработку больших массивов данных с выработкой оптимальных решений.

Таким образом, в транспортных системах со значительным количеством субъектов для повышения эффективности их работы необходимо использовать логистические принципы. Основную роль в выполнении логистических операций играет наложенное взаимодействие материальных и информационных потоков. Развитие и совершенствование этого взаимодействия соответствует современным тенденциям развития транспорта для наиболее полного удовлетворения потребностей экономики.

Транспортной стратегией РФ в области совершенствования перевозочных технологий на автомобильном транспорте предусмотрено:

- создание системы грузовых автотранспортных терминалов и транспортно-логистических центров, в том числе в составе мульти-модальных распределительных комплексов и транспортных узлов;
- создание крупных транспортно-экспедиционных компаний, специализирующихся на доставке грузов в международном сообщении на основе применения терминальных технологий;
- создание условий для оптимального взаимодействия автомобильного с другими видами транспорта, в том числе на основе применения контейнерных и контрейлерных технологий;
- создание информационных систем для обеспечения попутной и обратной загрузки автотранспорта;

- реализация комплекса мер для концентрации грузовых и пассажирских потоков в пределах транспортных коридоров как необходимого условия повышения эффективности перевозок;
- создание систем централизованного автотранспортного обслуживания крупных грузообразующих объектов;
- совершенствование системы информационного обмена, учета и документооборота на основе использования международных стандартов и нормативов;
- реализация комплекса мер по увеличению производства специализированного подвижного состава для перевозки контейнеров;
- развитие информационного и телекоммуникационного обеспечения автомобильных перевозок, в том числе с использованием спутниковых систем.

Реализация этой программы невозможна без развития методологии планирования, проектирования и системного использования современных средств компьютерной техники, связи и программного обеспечения.

С точки зрения использования информационных технологий в управлении автотранспортными логистическими системами необходимо выделить ряд принципиальных особенностей, которые, в отличие от традиционного предприятия, для автотранспорта требуют особого подхода:

- большое количество самостоятельных субъектов транспортного процесса, в то же время реализующих один технологический процесс доставки грузов или пассажиров;
- небольшие размеры отдельного субъекта автотранспортной деятельности, которые не позволяют использовать такие апробированные в промышленности комплексные системы автоматизации управления, как Oracle, SAP/R3 и т. п.;
- географическая распределенность объектов управления, многие из которых могут изменять свое положение в пространстве;
- существенная динамика условий функционирования автотранспортной системы.

Перечисленные особенности приводят к появлению большого числа разрозненных управляющих информационных систем, которые несовместимы и чаще всего решают не управленческие, а лишь учетные задачи.

Использование телематики в управлении транспортными системами позволяет кардинально повысить эффективность и качество их работы, поэтому транспортные системы с использованием автоматизированных систем управления, построенных на основе телематики, получили во всем мире специальное наименование – **интеллектуальные транспортные системы (ИТС)**. ИТС – это система, интегрирующая современные технологии управления с телематикой и предназначенная для автоматизированного поиска и принятия наиболее эффективных сценариев управления транспортной системой и ее элементами для обеспечения мобильности при установленном уровне качества обслуживания пользователей транспортной системой. Отличительный признак ИТС – автоматическое (или с минимальным участием оператора) формирование управляющих воздействий в режиме реального времени на объекты транспортной системы. Для этого в системе должна функционировать обратная связь, обеспечивающая автоматическую передачу оперативных данных о работе объектов транспортной системы в центр управления. На их основе с помощью математических моделейрабатываются прогнозные управляющие решения, которые реализуются в средствах управления.

В мировой практике ИТС признаны как общетранспортная идеология интеграции достижений современных методов управления и телематики во все виды транспортной деятельности для решения проблем экономического и социального характера: повышения эффективности функционирования пассажирского и грузового транспорта, обеспечения транспортной безопасности и улучшения экологических показателей.

Развитие ИТС методологически базируется на системном подходе, формируя ее не как отдельные функциональные блоки, а как систему. Подходы к созданию ИТС основываются на принципе модернизации, реинжиниринга действующих транспортных систем путем поэтапного развития и модульности создания ИТС.

На рис. 4.3 приведена укрупненная классификация ИТС по направлениям автоматизации транспортных систем.

Все три указанных в классификации на рис. 4.3 направления в настоящее время успешно развиваются и имеют примеры практического применения. Естественно, что разработка и внедрение ИТС сопряжены со значительными затратами, но, учитывая их стратегическую значимость для развития транспорта, крайне важно готовить элементы этих систем

и развивать транспорт с учетом необходимости в будущем построения комплексной ИТС. Для этого необходимо сформировать концепцию ИТС, определить ее основные функции и задачи. В соответствии с концепцией ИТС должны строиться концепции и конкретные планы развития дорожных, грузовых и пассажирских транспортных систем.

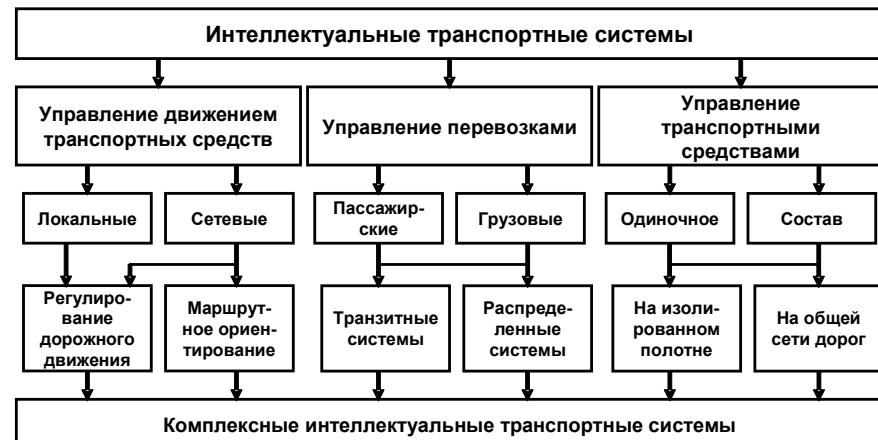


Рис. 4.3. Укрупненная классификация ИТС

В табл. 4.2 приведены основные функции ИТС, реализуемые в различных транспортных системах. Расшифровка англоязычных аббревиатур, используемых в сфере ИТС, приведена в табл. 4.3.

Наиболее наглядно возможности ИТС представлены в системах **PRT – Personal Rapid Transit** (PAT – Personal Automated Transport – персональный автоматический транспорт). Это системы общественного транспорта, которые обеспечивают безостановочную перевозку пассажиров по их запросу с помощью автоматических транспортных средств без водителя. Система PRT использует собственную транспортную сеть, которая может быть выполнена в виде дорожного полотна с направляющими устройствами, рельсового пути либо монорельса, а также в виде комбинации этих устройств. Пользователь на остановочном пункте выбирает пункт назначения, и система подает свободный вагон или направляет сюда попутный. Вагон с учетом топологии сети самостоятельно выбирает кратчайший путь до пункта назначения. Вся система имеет централизованное компьютерное управление на уровне распределения вагонов и обеспечения безопасности.

Основные функции ИТС относительно объектов управления

Объект управления	Основные функции	Описание	Примеры элементов ИТС
1. Дорожное движение	1.1. Информация об условиях дорожного движения	Обеспечение водителя информации об условиях движения, ДТП, ремонтных работах, погодных условиях и безопасной скорости движения на данном участке дороги	VMS, HAR, сотовый телефон, интерактивная навигационная система автомобиля
	1.2. Информационная поддержка водителя в поездке	Снабжение водителя инструкциями для достижения цели поездки, выбора наилучшего маршрута	IVRG, AVL, электронные карты, оптимизация маршрута в реальном времени
	1.3. Управление дорожным движением	Обеспечение интеграции и управления дорожным движением по транспортной сети для оптимизации транспортных потоков и обеспечения безопасности, приоритета общественного транспорта	УТС, прогноз ситуации, приоритетное управление техническими средствами управления дорожным движением
	1.4. Управление инцидентами	Обеспечение интеграции систем наблюдения за дорожным движением для снижения негативных последствий дорожных инцидентов	Системы видеонаблюдения, системы автоматического определения дорожных инцидентов
	1.5. Управление спросом	Построение транспортной политики, стимулирующей использование общественного транспорта и других методов снижения потребности в перемещениях	Гибкий рабочий график, системы телекоммуникаций, экономические меры воздействия на пользователей

Продолжение табл. 4.2

Объект управления	Основные функции	Описание	Примеры элементов ИТС
	1.6. Управление загрязнением воздуха	Мониторинг загрязнения воздуха с прогнозированием критических значений, предупреждение пользователей	IVRG, RDS, ICC
2. Пользователи транспортных систем	2.1. Информация об условиях поездки	Обеспечение пользователя информации о наиболее удобный вид транспорта, маршрут, время или откальться от поездки, резервирование для потенциальных пользователей	Предоставление информации дома и на работе посредством Интернета, сотового телефона и т. п.
	2.2. Информационное обслуживание пользователей	Обеспечение пользователя информации по месту нахождения, о возможных услугах, службах помощи, способах продолжения поездки и т. п.	IVRG, Интернет, сотовый телефон
3. Общественный транспорт	3.1. Управление общественным транспортом	Мониторинг трафика и загрузки подвижного состава для целей планирования	AVL, геоматические системы
	3.2. Информационное обслуживание пользователей	Обеспечение пользователя информации в режиме реального времени об изменениях графика, задержках и другой важной информацией	Табло на остановках, терминалах и подвижном составе, объявления, сотовый телефон
	3.3. Заказные перевозки	Управление заказами, маршрутизация поездок, оптимальное управление использованием подвижного состава	AVL, геоматические системы, системы автоматизированного транспорта

Объект управления	Основные функции	Описание	Примеры элементов ИТС
3.4. Безопасность пассажиров	Обеспечение безопасных условий для пассажиров в поездке, на терминалах и т. п.	CCTV, системы автоматического предупреждения	ETC, смарт-карта, сотовый телефон
4. Продедуры оплаты	4.1. Безналичная оплата услуг наличными денег	Оплата транспортных услуг без использования наличных денег	AVL, RFID, GPS
5. Коммерческий транспорт	5.1. Контроль веса сабаритных ограничений	Обеспечение контроля соблюдения габаритных и весовых ограничений без остановки транспортного средства	AVL, RFID, GPS
	5.2. Контроль режимов движения	Обеспечение контроля соблюдения режима труда и отдыха водителей, соблюдения ПДД без остановки транспортного средства	AVL, RFID, GPS, контроль документации перевозчика, система автоматического предупреждения водителя
6. Автомобиль	5.3. Перевозка опасных грузов	Автоматическая передача данных в службы спасения о характеристиках перевозимого груза в случае инцидента при его перевозке	GPS, система автоматического оповещения
	6.1. Предотвращение попутных столкновений	Автоматическое предотвращение попутных столкновений автомобилей между собой или наезда на препятствие перед автомобилем	ABS, радар
	6.2. Предотвращение касательных столкновений	Автоматическое предупреждение водителя о возможных касательных столкновениях автомобилей между собой или инсцезда на ограждении дороги	Система радаров

Объект управления	Основные функции	Описание	Примеры элементов ИТС
6.3. Предотвращение столкновений по пересекаемым трасекториям	Автоматическое предотвращение столкновения автомобилей или наезда на пешехода или велосипедиста при обнаружении опасного пересечения траектории движущегося автомобиля	Система радаров, телематические системы обмена информацией между автомобилями	Система радаров
6.4. Снижение тяжести аварий	Автоматическая активация специальных систем автомобиля при неизбежности аварии и извещение службы спасения	Система контроля состояния водителя, система контроля дорожной разметки для сохранения направления движения	Система контроля состояния водителя, система контроля дорожной разметки для сохранения направления движения
6.5. Контроль состояния водителя	Автоматическое определение отсутствия управления автомобилем, активация режима тревоги и включение автопилота и остановка автомобиля	Система контроля состояния водителя, система контроля дорожной разметки для сохранения направления движения	Система контроля состояния водителя, система контроля дорожной разметки для сохранения направления движения

Наиболее распространенные системы, входящие в ИТС**Таблица 4.3**

Аббревиатура	Описание
AHS	Система автоматизированного управления дорожным движением
APTS	Система автоматизированных услуг пользователям общественного транспорта
ATIS	Система автоматизированных услуг пользователям дорог
ATMS	Система автоматизированных услуг маршрутизации
AVL	Система автоматического определения местонахождения транспортного средства
CCTV	Специальная закрытая телевизионная сеть
CVO	Система автоматизированного выполнения коммерческих операций
DAB	Цифровая система передачи аудиоинформации
DSRC	Выделенная коммуникационная система близкого радиуса действия
EMS	Срочная медицинская помощь
ERP	Система безналичной оплаты за использование платных дорог
ETC	Электронная система таможенного оформления
GIS	Геоинформационная система
GPS	Навигационная система
GSM	Система сотовой связи
ICC (ACC)	Система адаптивного круиз-контроля автомобиля
IVRG	Система интерактивной маршрутизации для водителя
RDS	Система передачи данных на волне радиостанции
RFID	Система радиочастотной идентификации
SCOOT	Система оптимального управления светофорной сигнализацией
VMS	Знак и/или табло переменной информации
WIM	Система весового контроля без остановки движения

Первая система PRT эксплуатируется с 1975 г. в городе Morgantown в США, где связывает учебные здания местного университета с несколькими комплексами студенческих общежитий. Сеть общей протяженностью 13,9 км имеет 7 остановочных пунктов. В системе эксплуатируется 73 полностью автоматических вагонов. Вагоны системы вмещают 20 чел. и передвигаются по подогреваемому в зимнее время бетонному полотну с направляющими со скоростью до 30 км/ч. Стоимость системы составила более 60 млн долл. Система бесплатно обслуживает 20 тыс. студентов, а для жителей города разовая поездка стоит

50 центов. Ввиду того, что система проектировалась в начале 70-х годов прошлого века, она не имеет полного централизованного компьютерного управления, что компенсируется работой трех диспетчеров.

Наиболее современная система PRT в 2009 г. введена в строй в лондонском аэропорту Хитроу, где она связывает пятый, наиболее современный, терминал с удаленными автостоянками. Это первая полностью коммерческая система PRT в мире, и если ее эксплуатация будет успешной, она будет существенно расширена. Система протяженностью 3,9 км имеет 3 станции и обслуживается 21 вагоном; каждый вагон может развивать скорость до 40 км/ч. Среднее время ожидания вагона после вызова составляет 12 с, а максимальное для 95 % пользователей – не более 1 мин.

Таким образом, развитие транспортных систем связано с использованием самых последних достижений науки и техники, их интеграцией и предоставлением качественных услуг пользователям.

Контрольные вопросы

1. Обоснуйте необходимость развития систем общественного транспорта как одного из основных путей решения транспортных проблем крупных городов.
2. Дайте характеристику понятию «интеллектуальная транспортная система».
3. Приведите классификацию интеллектуальных транспортных систем.
4. Назовите основные функции интеллектуальных транспортных систем.
5. Дайте характеристику системам персонального автоматического транспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие экономики в современном мире базируется на нескольких основополагающих принципах. В первую очередь это интеграция экономического пространства, региональная отраслевая специализация, распределенные производственные процессы, многоступенчатые распределительные системы. По всем этим направлениям развития роль транспорта трудно переоценить. От транспорта в значительной степени зависят возможность и эффективность развития экономики.

Современная экономика требует от транспорта не просто выполнения перемещения грузов и пассажиров, а глубокой интеграции в производственные, снабженческие и сбытовые процессы. Для соответствия этим требованиям транспортные системы становятся все более сложными, используют такие инновационные решения, как космические системы слежения и связи, адаптивные методы управления транспортной системой в режиме реального времени, интегрированные системы доставки с использованием нескольких видов транспорта и т. п.

Современное общество требует от транспортных систем не только обеспечения мобильности грузов и пассажиров, но и должного уровня доступности транспортных услуг. Повышение уровня доступности в физическом аспекте связано с совершенствованием транспортных сетей, в экономическом аспекте – с повышением эффективности функционирования транспортных систем и их ориентацией на социальные показатели развития общества.

Таким образом, можно выделить следующие основные направления развития транспортных систем. Это:

- переориентация социально-экономической оценки эффективности транспортных систем с объемных показателей работы на социально-ориентированные показатели, связанные с удовлетворением потребностей потребителей;
- использование в управлении транспортными системами современных средств телематики, позволяющих в режиме реального времени получать объективную информацию о функционировании объекта управления и вырабатывать оптимальные управленческие решения;

- совершенствование технических средств транспорта в направлении снижения эксплуатационных затрат и загрязнения окружающей среды, повышения безопасности за счет широкого использования интеллектуальных систем управления как подвижным составом, так и транспортной системой в целом;
- совершенствование технологических процессов транспортных систем в направлении их межвидовой интеграции и автоматизации складских, погрузочно-разгрузочных процессов и движения маршрутных транспортных средств.

Список литературы

Основная литература

1. Афанасьев Л. Л. Единая транспортная система и автомобильные перевозки: учебник для вузов / Л. Л. Афанасьев, Н. Б. Островский, С. М. Цукерберг. – М.: Транспорт, 1984. – 333 с.
2. Бочкарев А. А. Планирование и моделирование цепи поставок: учебно-практическое пособие / А. А. Бочкарев. – М.: «Альфа-Пресс», 2008. – 192 с.
3. Вельможин А. В. Теория транспортных процессов и систем: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин. – М.: Транспорт, 1998. – 167 с.
4. Горев А. Э. Грузовые автомобильные перевозки: учеб. пособие. 5-е изд. / А. Э. Горев. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с.
5. Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Куликов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 560 с.
6. Модели и методы теории логистики: учеб. пособие. 2-е изд. / под ред. В. С. Лукинского. – СПб.: Питер, 2007. – 448 с.
7. Перевозка экспортно-импортных грузов. Организация логистических систем / под ред. А. В. Кириченко. – СПб.: Питер, 2004. – 506 с.
8. Цветков В. Я. Геоинформационные системы и технологии / В. Я. Цветков. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 288 с.

Дополнительная литература

9. Артынов А. П. Автоматизация процессов планирования и управления транспортными системами / А. П. Артынов, И. И. Скалецкий. – М.: Наука, 1981. – 280 с.
10. Артынов А. П. Автоматизация управления транспортными системами / А. П. Артынов, В. Н. Ембулаев, А. В. Пупышев, В. М. Скалецкий. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
11. Бакаев А. А. Экономико-математические модели планирования и проектирования транспортных систем / А. А. Бакаев. – Киев: Техника, 1973. – 87 с.
12. Бакаев А. А. Математическое моделирование процессов планирования и управления грузовыми автомобильными перевозками / А. А. Бакаев, Л. И. Бажан, А. Х. Ибрагимов. – Ташкент: Фан, 1984. – 83 с.
13. Беленький А. С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования / А. С. Беленький. – М.: Мир, 1992. – 582 с.
14. Белый О. В. Архитектура и методология транспортных систем / О. В. Белый, О. Г. Кокаев, С. А. Попов. – СПб.: Элмор, 2002. – 256 с.

15. Бережная Е. В. Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособие / Е. В. Бережная, В. И. Бережной. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.
16. Бочкарев А. А. Автоматизация планирования и моделирования цепи поставок / А. А. Бочкарев. – СПб.: СПБГИЭУ, 2008. – 291 с.
17. Брайловский Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 125 с.
18. Бутов А. С. Транспортные системы. Моделирование и управление / А. С. Бутов и др.; под ред. А. С. Бутова. – СПб.: Судостроение, 2001. – 552 с.
19. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 395 с.
20. Варфоломеев В. И. Алгоритмическое моделирование экономических систем: практикум: учеб. пособие / В. И. Варфоломеев, С. В. Назаров. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 264 с.
21. Вол М. Анализ транспортных систем / М. Вол, Б. Мартин; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1981. – 516 с.
22. Воркут А. И. Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов. 2-е изд. / А. И. Воркут. – Киев: Вища школа, 1986. – 447 с.
23. Габарда Д. Новые транспортные системы в городском общественном транспорте / Д. Габарда; пер. со словацкого. – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.
24. Геронимус Б. Л. Совершенствование планирования на автомобильном транспорте / Б. Л. Геронимус. – М.: Транспорт, 1985. – 222 с.
25. Гольц Г. А. Транспорт и расселение / Г. А. Гольц. – М.: Наука, 1981. – 234 с.
26. Горев А. Э. Информационные технологии в управлении логистическими системами / А. Э. Горев. – СПб.: СПбГАСУ, 2004. – 193 с.
27. Гринберг А. С. Информационные технологии моделирования процессов управления экономикой: учеб. пособие для вузов / А. С. Гринберг, В. М. Шестаков. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 339 с.
28. Гуд Г.-Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г.-Х. Гуд, Р.-Э. Макол; пер. с англ. – М., 1962. – 367 с.
29. Денисов В. Н. Проблемы экологизации автомобильного транспорта / В. Н. Денисов, В. А. Рогалев. – СПб.: МАНЕБ, 2005. – 312 с.
30. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
31. Емельянов А. А. Имитационное моделирование экономических процессов: учеб. пособие / А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Р. В. Дума. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
32. Зайцев Е. И. Информационные технологии в управлении эксплуатационной эффективностью транспорта / Е. И. Зайцев. – СПб.: СПбГИЭА, 1998. – 227 с.
33. Зигель А. Модели группового поведения в системе «человек–машина» / А. Зигель, Д. Вольф. – М.: Мир, 1973. – 216 с.

34. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Питер, 2005. – 400 с.
35. Кобелев Н. Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем: учеб. пособие / Н. Б. Кобелев. – М.: Дело, 2003. – 336 с.
36. Колесов Ю. Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход: учеб. пособие / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Питер, 2006. – 192 с.
37. Котиков Ю. Г. Основы системного анализа транспортных систем: учеб. пособие / Ю. Г. Котиков. – СПб.: СПбГАСУ, 2001. – 264 с.
38. Котиков Ю. Г. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие / Ю. Г. Котиков. – СПб.: СПбГАСУ, 2000. – 216 с.
39. Курганов В. М. Логистические транспортные потоки / В. М. Курганов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2003. – 252 с.
40. Лопатин А. П. Моделирование перевозочного процесса на городском пассажирском транспорте / А. П. Лопатин. – М.: Транспорт, 1985. – 144 с.
41. Михайлов А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
42. Михайлов А. С. Управление рынком перемещений городского населения / А. С. Михайлов. – Алматы: НИЦ Гылым, 2003. – 237 с.
43. Бонсалл П. У. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе (оценка вариантов развития транспортной системы и анализа чувствительности модели) / П. У. Бонсалл, А. Ф. Чемперноул, А. К. Мейсон, А. Г. Уилсон; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.
44. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. / ред. совет: В. С. Авдуевский и др. – М.: Машиностроение, 1988.
45. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования / Е. П. Нестеров. – М.: Транспорт, 1971. – 216 с.
46. Николаев В. И. Системотехника: методы и приложения / В. И. Николаев, В. М. Брук. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
47. Николин В. И. Автотранспортный процесс и оптимизация его элементов / В. И. Николин. – М.: Транспорт, 1990. – 192 с.
48. Николин В. И. Грузовые автомобильные перевозки / В. И. Николин, Е. Е. Витвицкий, С. М. Мочалин. – Омск: Вариант-Сибирь, 2004. – 480 с.
49. Образцова Р. И. Инженерно-экономический анализ транспортных систем. Методология проектирования автоматизированной системы управления / Р. И. Образцова, П. Г. Кузнецов, С. Б. Пшеничников; под ред. К. В. Фролова. – М.: Радио и связь, 1996. – 192 с.
50. Оптимизация планирования и управления транспортными системами / под ред. В. Н. Лившица. – М.: Транспорт, 1992. – 337 с.
51. Панов С. А. Управление грузовыми автомобильными перевозками (основы анализа) / С. А. Панов, А. М. Поляк, Ю. К. Поносов. – М.: Транспорт, 1979. – 127 с.
52. Персианов В. А. Моделирование транспортных систем / В. А. Персианов, К. Ю. Скалов, Н. С. Усков. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.
53. Полянский В. М. Имитационное моделирование транспортных систем / В. М. Полянский. – СПб.: СПбГУВК, 1998. – 162 с.
54. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем / К. Райншке. – М.: Мир, 1979. – 452 с.
55. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю. И. Рыжиков. – СПб.: КОРОНА прнт; М.: Альтекс-А, 2004. – 384 с.
56. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов: учеб. пособие / Э. А. Сафронов. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 272 с.
57. Семененко А. И. Логистика. Основы теории: учебник для вузов / А. И. Семененко, В. И. Сергеев. – СПб.: Издательство «Союз», 2001. – 544 с.
58. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
59. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. школа, 1985. – 270 с.
60. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа: учеб. пособие / В. Н. Спицнадель. – М.: Бизнес-пресса, 2000.
61. Ставничий Ю. А. Транспортные системы городов / Ю. А. Ставничий. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
62. Стенбринк П. А. Оптимизация транспортных сетей / П. А. Стенбринк; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
63. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие / Ю. П. Сурмин. – Киев: МАУП, 2003. – 368 с.
64. Тархов С. А. Эволюционная морфология транспортных сетей: методы анализа топологических закономерностей / С. А. Тархов. – М.: ИГ АН СССР, 1989. – 221 с.
65. Теория систем и системный анализ в управлении организациями. Справочник: учеб. пособие / под ред. В. Н. Волковой и А. А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 848 с.
66. Хей Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хей. – М.: Мир, 1966. – 286 с.
67. Целемецкий В. А. Моделирование функционирования транспортных систем: ВИНИТИ. Серия «Транспорт, наука, техника, управление» / В. А. Целемецкий. – М.: ВИНИТИ, 1998. – 39 с.
68. Шапиро Дж. Моделирование цепи поставок / Дж. Шапиро; пер. с англ. – СПб.: Питер, 2006. – 720 с.
69. Ewing R. Pedestrian and transit friendly design. Joint Center for Environment and Urban Problems. Florida Atlantic University / Florida International University. March, 1996. – 103 p.
70. Highway Capacity Manual 2000. – Transportation Research Board, National Research Council. – Washington, D.C., USA, 2000. – 1134 p.

71. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modeling Transport / 3-rd edition. – John Wiley & Sons Ltd, 2008. – 499 p.
72. Papacostas C. S., Prevedouros P. D. Transportation Engineering and Planning / 3-rd edition. – Prentice Hall, 2001. – 685 p.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Основы теории систем	4
1.1. Введение в теорию систем	4
1.2. Понятие и свойства систем	6
1.3. Понятие о системном подходе	19
1.4. Системотехника	25
Контрольные вопросы	28
Глава 2. Транспортные системы	29
2.1. Транспорт в современном мире	29
2.2. Особенности транспортных систем	34
2.3. Транспортные сети	46
2.4. Транспортные процессы	78
Контрольные вопросы	85
Глава 3. Исследование транспортных систем	86
3.1. Цели и задачи исследования	86
3.2. Модели и моделирование	90
3.3. Модели спроса на транспортное обслуживание	98
3.4. Имитационное моделирование транспортных систем	123
3.5. Объектно-ориентированный подход к моделированию транспортных систем	162
3.6. Геоинформационные системы	173
3.7. Оценка эффективности транспортных систем	182
Контрольные вопросы	190
Глава 4. Развитие транспортных систем	191
4.1. Потребности современной экономики и общества в транспортных услугах	191
4.2. Направления развития транспортных систем	195
Контрольные вопросы	207
Заключение	208
Список литературы	210

Учебное издание

Горев Андрей Эдливич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Редактор А. В. Афанасьева

Корректоры А. Г. Лавров, К. И. Бойкова

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 28.12.10. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 12,6. Тираж 150 экз. Заказ 161. «С» 134.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 5.