

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ГОРБАЧЁВ П.Ф., ДМИТРИЕВ И.А.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Харьков ХНАДУ 2020

УДК 656.13
Г67

*Утверждена к изданию Ученым Советом ХНАДУ,
протокол № 27/20/4/11 от 29 мая 2020*

Р е ц е н з е н т ы :

Наглюк И.С.,

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой организации
и безопасности дорожного движения
(Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет)

Войтов В.А.,

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой менеджмента и публичного администрирования
технологий и логистики
(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства)

Аванесова Н.Э.,

д.э.н., профессор, завідувач кафедри організації
та безпеки дорожнього руху
(Харьковский национальный университет строительства и архитектуры)

Горбачёв П.Ф.

Г 67

Основы теории транспортных систем : монография / П.Ф. Горбачёв,
И.А. Дмитриев. – Харьков : Стиль - Издат, 2020. – 237 стр.
ISBN 978-617-7912-13-1

Викладено основні теоретично положення системного підходу і системного аналізу транспортних об'єктів. Наводиться порядок прийняття ефективних рішень при розгляді транспортних систем і особливості виконання його етапів. Розглядаються окремі методи моделювання і конкретні моделі, що використовуються для вирішення питань організації перевезень і дорожнього руху.

Для інженерно-технічних та наукових робітників, діяльність яких пов'язана з транспортним моделюванням та плануванням роботи автомобільного транспорту.

Ил. 33. Табл. 25. Бібл. 29 назв.

Изложены основные теоретические положения системного подхода и системного анализа транспортных объектов. Приводится порядок принятия эффективных решений при рассмотрении транспортных систем и особенности выполнения его этапов. Рассматриваются отдельные методы моделирования и конкретные модели, используемые для решения вопросов организации перевозок и дорожного движения.

Для инженерно-технических и научных работников, связанных с транспортным моделированием и планированием работы автомобильного транспорта.

Ил. 33. Табл. 25. Библ. 29 названий.

УДК 656.13

ISBN 978-617-7912-13-1

© Горбачёв П.Ф., Дмитриев И.А., 2020
© ХНАДУ, 2020

Введение

Проблемы эффективной организации транспортных процессов и дорожного движения относятся к широкому классу задач исследования социальных объектов, в которых активную роль играет человек. В настоящее время единый подход к решению этих задач еще не выработан, что обусловлено сложностью объекта исследования и случайным характером процессов, происходящих в них. Кроме того, в настоящее время отсутствуют четкие указания к постановке задач управления или исследования подобных объектов и выбору методов поиска рациональных решений.

В монографии рассматриваются вопросы реализации системного подхода при изучении транспортных объектов и конкретные модели, которые могут быть использованы для решения отдельных вопросов, носящих общий характер для рассматриваемого круга задач.

В первой теме рассмотрены основные аспекты системного подхода при исследовании транспортных систем и освещаются следующие вопросы:

- место понятия системы в исследовании транспортных объектов;
- основные особенности транспорта как объекта исследования;
- порядок системного анализа транспортных систем и особенности выполнения его отдельных этапов;

- методы моделирования системных объектов и место каждого метода в исследовании.

В рамках второй темы приводится порядок исследования транспортных систем и рассматриваются подходы к выполнению каждого из этапов. Здесь же даются списки элементов транспортных систем, которые могут быть использованы для ускорения процесса исследования, а также их основные характеристики.

Третья тема посвящена наиболее важной части исследования транспортных систем – представлению цели объекта в модели. В монографии описыва-

ются два различных подхода к выбору цели и формированию критерия эффективности. Для стандартного подхода, частым результатом использования которого являются многокомпонентные критерии, приводятся методы решения многокритериальных задач и указываются основные проблемы, с которыми исследователь сталкивается в процессе принятия решений. Здесь же приводится порядок последовательного принятия решений при выборе цели исследования, который позволяет освободиться от многих неопределенностей и получить критерий эффективности, достаточно объективно представляющий цели объекта исследования.

В четвертой теме рассматривается процедура характеристики внешней среды, то есть сбор информации об условиях работы системы. Этот этап имеет общие черты для основных разновидностей транспортных систем, что позволяет привести ряд моделей прогностического направления для формирования массивов исходной информации. Здесь также приводятся модели, которые нашли широкое применение при формировании массивов исходной информации для решения отдельных вопросов планирования работы транспортных объектов. Это статическая линейная балансовая модель межотраслевых связей в грузовых перевозках и гравитационная модель расчета матрицы корреспонденций пассажирских перевозках.

Обязательной составляющей для многих задач транспортного планирования является модель транспортной сети. В настоящее время применяются различные подходы к моделированию транспортных сетей, характерные особенности применения которых рассматриваются в пятой теме. Здесь также приводится сравнительная характеристика топологического метода, используемого в транспортном моделировании, и векторных шейп-файлов, как успешной реализации координатного подхода, которые нашли широкое применение в современных геоинформационных системах.

В шестой теме приводится описание показателей системных свойств объектов, которые могут быть использованы при выработке стратегии развития

транспортных объектов и показывается тесная связь между этими показателями, характерная для транспортных объектов, действующих в экономической сфере.

Каждая тема заканчивается вопросами для самопроверки, которые позволяют читателю выяснить степень освоения прочитанного материала.

Монография опирается на ранее изданное авторским коллективом учебное пособие, которое дополнено рядом материалов, учитывающих новые знания о транспортных объектах и накопленный авторами опыт по реализации реальных исследовательских проектов в транспортной сфере. Необходимость в подобном учебном пособии в настоящее время отсутствует, что обусловлено изменениями в программах подготовки соответствующих специалистов. В монографии также исправлен ряд технических ошибок, допущенных при подготовке к изданию учебного пособия.

Монография подготовлена авторским коллективом, под руководством доктора технических наук, профессора Горбачёва П.Ф. При её подготовке использовались результаты научных исследований авторов.

ТЕМА 1. ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

В этом разделе рассматриваются основные аспекты общей теории систем (ОТС), которые призваны помочь в освоении порядка и методики исследования транспортных объектов с целью выработки управляющих воздействий.

1.1. Место понятия системы при исследовании транспортных объектов

Предпосылкой для появления ОТС стала необходимость объяснения возможности возникновения и существования сложных объектов, так как разработанные до того времени концепции не могли объяснить существования столь сложных форм окружающего мира, как живые организмы или социальные структуры. Примером таких концепций может служить механицизм, который приравнивал все формы жизни механическому движению или движению энергии.

Поэтому не удивительно, что родоначальником ОТС стал биолог по специальности Л. фон Бергаланфи [13], поскольку социальная наука в начале двадцатого столетия только зарождалась, а биология к этому времени достигла уже достаточно высокого уровня развития. Притом именно в сфере её деятельности находится такое важное явление нашего мира, как появление нового живого организма, новой жизни.

Ключевым моментом ОТС стала формулировка свойства **эмергентности** систем. *Оно заключается в появлении новых качественных свойств у группы объектов, которые связаны между собой какими-либо связями.* Например, это может быть способность выполнять новые функции для искусственных объектов или обеспечивать возможность существования и развития для естественных систем.

Это свойство можно проиллюстрировать многими примерами, как из области техники, так и из других разделов знания. Движение одной черепахи на

ограниченном пространстве, например в пустой картонной коробке, выглядит без сомнения случайным. Но при увеличении количества черепах в том же пространстве, направление движения каждой из них уже выглядит достаточно целенаправленным, вся группа выглядит как единый организм со своими правилами существования и целями, рисунок 1.1.

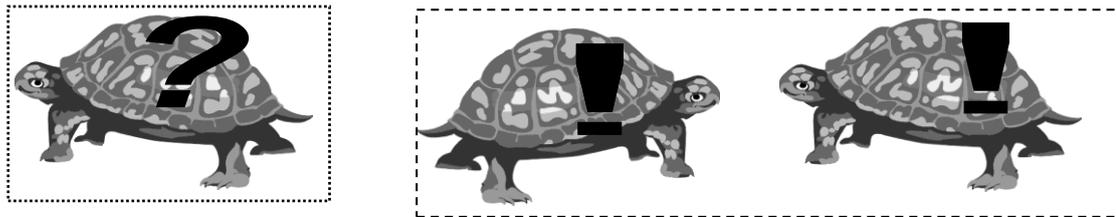


Рисунок 1.1

Так как поведение одной черепахи в одних и тех же условиях можно считать постоянными, то изменение её поведения в группе обусловлено влиянием на неё других черепах. Из подобных соображений сформулировано утверждение, что свойства системы определяются не столько свойствами элементов, которые её составляют, сколько характером взаимосвязи между ними.

Конечно же, это утверждение является слишком строгим, так как и свойства элементов системы во многом определяют свойства системы в целом. Если в качестве объекта изучения в том же эксперименте взять не черепаху, а другое животное, то понятно, что результаты наблюдений будут другими. По крайней мере, скорость движения элементов новой системы, скорее всего, будет выше.

Поэтому в системном исследовании свойства самих элементов считаются заданными и постоянными, а основной упор делается на изучении взаимодействия между ними. В рассмотренном примере это допущение вполне можно признать корректным. Однако могут возникать и другие ситуации, когда структура элементов не может считаться постоянной. Они будут рассмотрены позднее.

Перейдем теперь к самому понятию системы. За годы развития ОТС мно-

гочисленными авторами было сформулировано очень большое количество определений системы. Но в большинстве случаев они являются слишком узкими, поскольку при составлении, их авторы рассматривали относительно ограниченный список объектов, которые, по их мнению, попадают под определение системы.

Обязательными условиями корректности определения являются два соответствия. Первое соответствие – определение верно, если не существует объектов, которые, по сути, должны подходить под него, но не подходят. Второе соответствие – под определение не должны попадать те объекты, которые к нему не относятся. Обоим этим условиям отвечает определение, которое приводится в философском словаре.

Система – совокупность элементов, находящихся во взаимосвязи и взаимоотношениях между собой, которая образует определенное единство, целостность [25].

Из этого определения можно сделать заключение, что система формируется из элементов и связей между ними, и попытаться выделить сферу его действия. Для этого вначале нужно найти примеры объектов, которые соответствуют определению системы. Такие примеры можно найти где угодно, в том числе взять в учебной аудитории – помещение учебной аудитории, контингент студентов, стол, конспект и так далее. Почему это системы? Каждый из этих объектов состоит из элементов, эти элементы находятся во взаимосвязи между собой, и сам объект легко выделяется из окружения, то есть представляют собой нечто целое.

Сложнее найти примеры объектов, которые под это определение не попадают. Такие объекты ещё можно встретить разве что в физике, но и там вопрос открытия частиц более мелких, чем кварк, скорее всего, лишь во времени.

Таким образом, можно сделать вывод, что под определение системы попадают практически все объекты окружающего мира.

Это объясняется ключевым словом определения системы «**совокуп-**

ность». Как только объект состоит из составных частей – это уже система, так как остальные утверждения в определении выполняются практически во всех случаях. Обязательно существует взаимодействие между составными частями и объект наверняка можно выделить из окружения. Но тогда создается впечатление, что в этом определении нет смысла, так как оно не выделяет какого-то класса объектов.

Причиной этого является структура этого определения, которая отличается от стандартной структуры, которая формируется в два этапа: отождествление и изоляция. На первом этапе объект, для которого строится определение, относится к какому-то классу объектов, на втором выделяется из данного класса с помощью описания его уникальных свойств. Например, определение стола: Стол – предмет домашней мебели, представляющий собою широкую поверхность из досок (деревянных, мраморных и др.), укрепленных на одной или нескольких ножках и служащий для того, чтобы ставить или класть что-нибудь на него [24].

Определение системы из философского словаря не следует этому правилу, однако сомневаться в его верности не приходится. При его составлении авторами не ставилась цель описания принадлежности систем к какому-то классу объектов. В нем только дается общая характеристика системы, исходя из её содержания. Аналогичное определения для автомобиля могло бы выглядеть примерно так: это автомобиля – это совокупность двигателя, трансмиссии, ходовой части и механизма управления.

Определения системы [25] оказалось вполне достаточно в рамках ОТС, но оно не дало никаких конкретных указаний к действиям при проведении системных исследования в прикладной сфере научной деятельности.

Поэтому, основная задача данного материала – отнести понятие системы к конкретному классу объектов, чтобы на основании свойств этого класса определить цели и методы системного исследования транспортных объектов.

Вначале необходимо обратить внимание на одну особенность в опреде-

лении системы, а именно на утверждение, что система представляет определенную целостность, то есть, имеет достаточно четкие границы.

В то же время в большинстве источников, посвященных ОТС, в том числе и в [25], содержится еще одно утверждение:

- для систем характерно неразрывное единство с внешней средой, по отношению к которой система проявляет свою целостность.

Однако если вспомнить, что система состоит из объектов двух классов: элементов и связей, то реализовываться это единство может только через взаимодействие элементов системы с элементами внешней среды. А если вспомнить ещё и о том, что и внутри системы элементы взаимодействуют между собой, то становится не совсем понятным, в чем же разница между элементами системы и внешней среды? И всё же разница существует. Будем считать, что внешняя среда только генерирует условия работы исследуемой системы и не изменяется под её воздействием, рисунок 1.2.

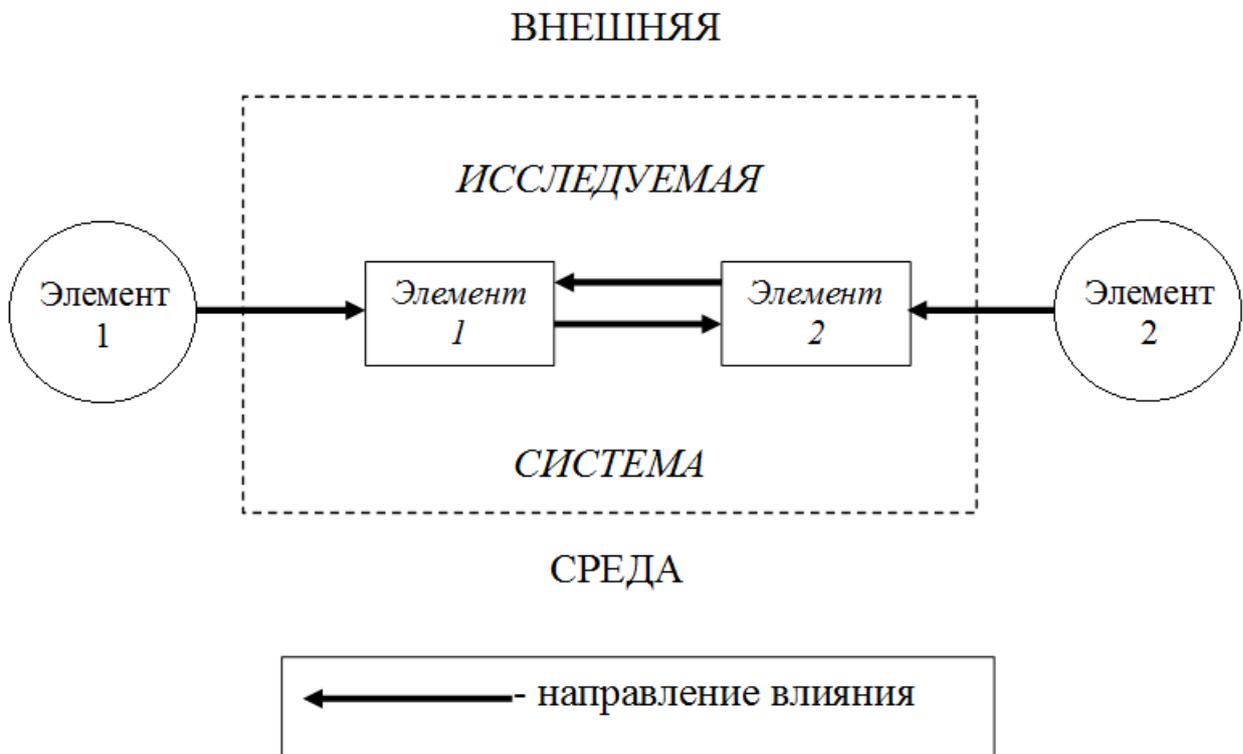


Рисунок 1.2

На сегодняшний день общепринятым является сформулированный аме-

риканским математиком и метеорологом Эдвардом Лоренцом так называемый «эффект бабочки», описывающий чувствительную зависимость поведения системы от начальных условий [27]. Свое открытие он иллюстрировал примером бабочки из Бразилии, взмах крыла которой вызывает цепочку сложных климатических изменений и приводит к урагану в Техасе. Если рассмотреть эту ситуацию с точки зрения системного обследования, то безусловным является тот факт, что бабочка вполне может быть элементом системы, для которой атмосфера и природа в целом являются внешней средой, а вот для обратного утверждения подобрать примеры вряд ли получится. Принимая во внимание столь высокую степень взаимосвязи в природе, правильным будет полагать, что в действительности элементы системы могут оказывать влияние на элементы внешней среды. Просто при изучении систем этим влиянием пренебрегают.

Системам, исходя из определения [25], присуще еще одно свойство – **иерархичность**. Согласно ему *любая система является элементом системы более высокого уровня, также как и каждый элемент системы является в свою очередь системой, которая состоит из элементов*.

Можно рассмотреть иерархию систем на примере автомобиля, рисунок 1.3. Каждый автомобиль, как система, состоит из узлов и агрегатов, то есть элементов, которые в свою очередь состоят из более мелких деталей. В то же время автомобиль является элементом системы более высокого уровня «водитель – автомобиль – дорога» (ВАД). Дорога может быть представлена как совокупность двух элементов: транспортного потока и дорожных условий.

Рассматриваемый автомобиль с одной стороны подвержен влиянию транспортного потока, а с другой стороны сам является его частью, то есть формирует характеристики потока. Но эти характеристики формируются и другими автомобилями, двигающимися в потоке, которые могут не иметь никакого отношения к рассматриваемой транспортной системе и, тем не менее, оказывают влияние на нее.

Этот пример, вместе с утверждением о неразрывном единстве любой си-

стемы с внешней средой, также как и эффект бабочки, подводит к заключению о том, что в общем случае *все объекты окружающего мира находятся во взаимосвязях между собой.*

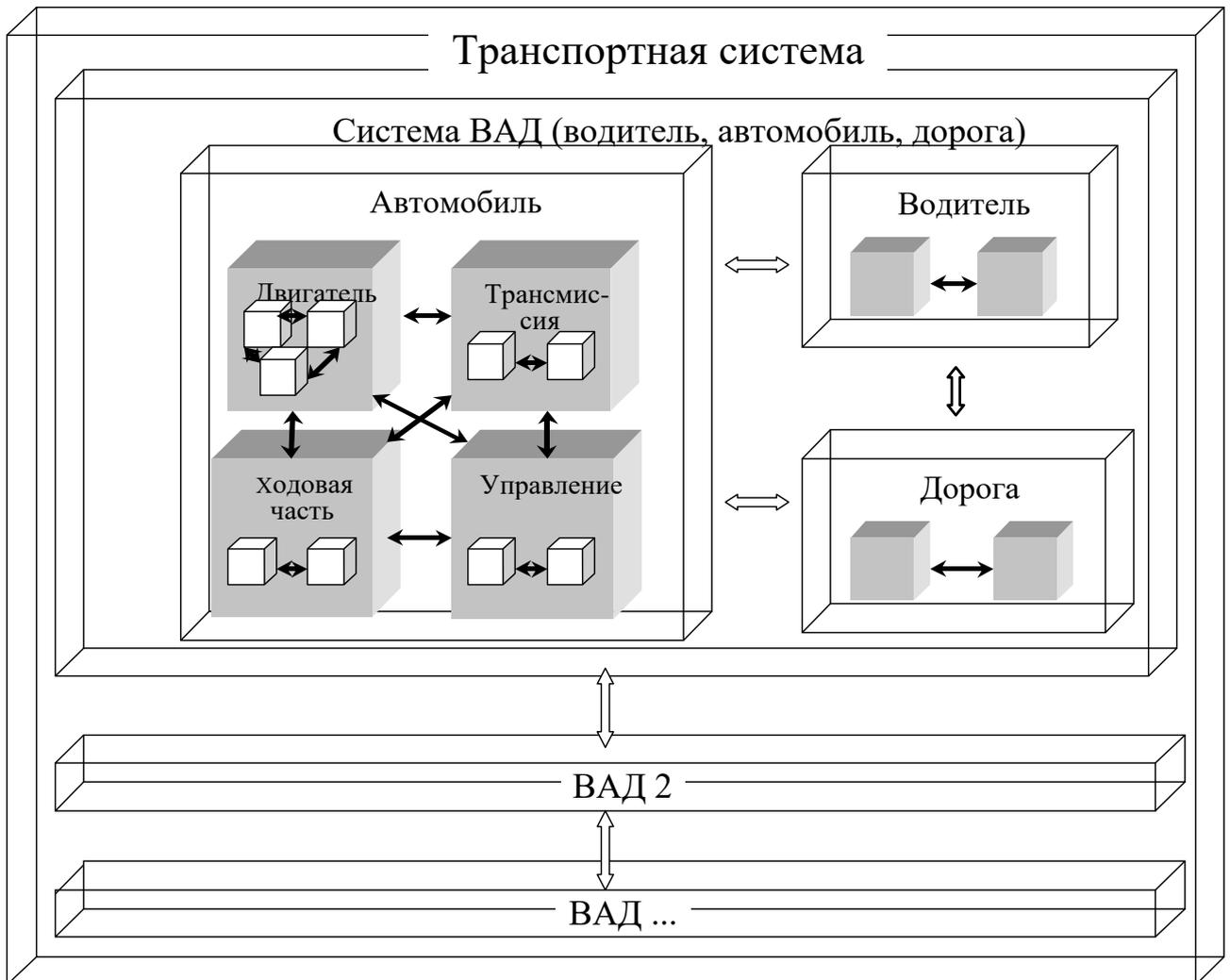


Рисунок 1.3.

Эти связи могут быть **прямыми** (непосредственными) и **косвенными** (через другие элементы). В частном случае сила влияния одного элемента на другой может быть равной нулю, но найти такую систему, которая ни оказывала бы совершенно никакого влияния на свое окружение вряд ли удастся.

Поэтому *при выделении системы из окружающей среды, обязательно происходит потеря точности при описании действительности*, поскольку хотя бы одна связь между элементами системы и элементами внешней среды после выделения системы из окружающей среды не рассматривается.

Кроме того, дополнительную неточность в системное представление объ-

екта исследования вносит жёсткое условие постоянства характеристик элементов системы.

Тут необходимо отметить еще одну особенность систем, которая поясняется на примере объектов, которые были рассмотрены в качестве примеров системы. *Каждый из объектов, можно представить в виде различных совокупностей элементов.* Иными словами в каждом объекте можно выделить разные элементы.

Примеры такого выделения приведены на рис. 1.4.

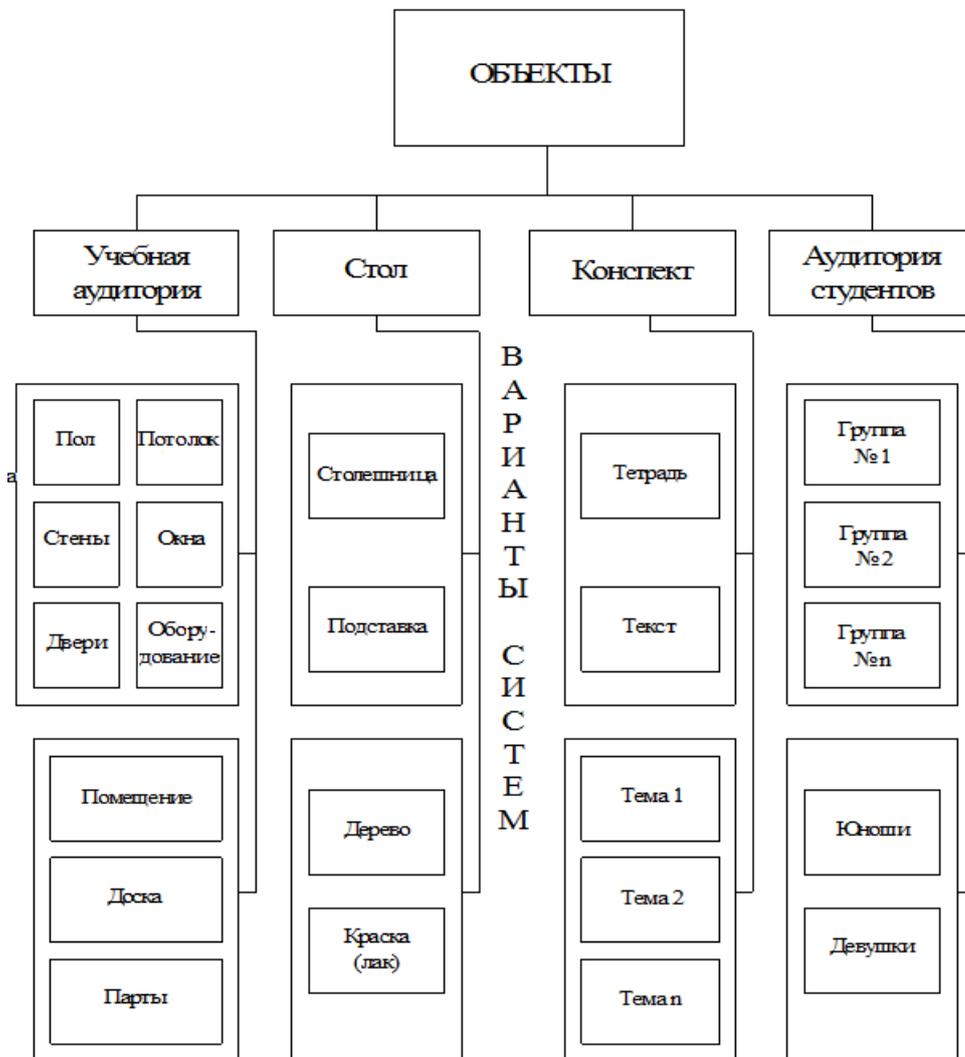


Рисунок 1.4.

Если правомерность каждого из вариантов системы на рис.1.4 не вызыва-

ет сомнения, то можно сделать следующий вывод – *одному и тому же объекту может соответствовать несколько вариантов его представления в виде системы.*

Теперь необходимо ввести понятие модели, как обязательной части любого исследования или принятия решения.

Под моделью *понимают искусственный объект, который отображает с определенной степенью точности основные свойства изучаемого объекта – оригинала.*

Приведенное определение является обобщением многих определений модели, приведенных в различной литературе. Ключевыми в нём являются слова «искусственный» и «отображает». Первое определяет, что модель всегда создаётся человеком, второе – она обязательно проще, дешевле, чем оригинал. То есть при построении модели свойства объекта упрощают, но чем ближе модель к оригиналу, тем более эффективным будет его исследование.

Естественным будет полагать, что каждый объект обладает огромным, практически бесконечным набором свойств, которое следует из практически ничем не ограниченного набора позиций, с которых можно рассматривать любой объект. Исходя из этого, каждый объект может быть представлен бесконечным количеством моделей, которые отличаются между собой набором его свойств, включённых в модель, описываемых моделью.

Это свойство можно проиллюстрировать на примере моделей человека – это могут быть манекен, фотография, робот, автобиография, характеристика, компьютер и так далее.

Ещё следует остановиться на общем характере моделирования, как средстве принятия решения. Все представления, которые человек имеет об окружающем мире, есть не что иное, как модели. С развитием науки развиваются и наши представления о вещах и событиях вокруг нас. Раньше, например, люди не знали о существовании электричества или радиоволн. То есть представления человечества о мире были значительно более узкими, чем сейчас, хотя законы

природы действовали тогда, также как и сейчас.

Каждый предмет или явление обладает бесконечным числом характеристик, мы же в своей жизни пользуемся только теми из них, которые необходимы для принятия решения, то есть моделями.

Нам не нужно знать толщину стен здания, чтобы пойти в гости к людям, которые в нем живут. Из всего спектра световых лучей или звуковых волн в обычной жизни мы используем только небольшую часть. Этого просто достаточно. В то же время другие живые организмы имеют иное представление о тех же предметах или явлениях. Собаки не различают цветов, летучие мыши пользуются для ориентации только ультразвуком. Тогда получается, что все наши наблюдения или впечатления есть не что иное, как модели окружающих нас предметов и явлений. И когда мы принимаем взвешенное, сознательное решение, основанное на анализе его возможных результатов, мы всегда пользуемся только частью свойств объекта, относительно которого проводятся рассуждения. В противном случае, то есть если бы кто-то попытался учесть все свойства объекта, никакое решение относительно него никогда бы не было принято, исходя из практически бесконечного списка свойств объекта.

Теперь необходимо снова вспомнить о двух особенностях, которые были выделены при рассмотрении определения системы:

- *выделение системы из внешней среды всегда приводит к потере объективно существующих свойств объектов исследования;*
- *каждый из объектов может быть представлен несколькими вариантами системы.*

Эти особенности полностью совпадают со свойствами моделей, определяемым вторым ключевым словом, их определяющих. И, естественно, все системы в исследованиях реальных объектов, либо при принятии решений относительно них, всегда являются искусственными объектами.

Относительно последнего утверждения у читателя могут возникнуть сомнения, обусловленные широким использованием слова система при простом

упоминании реальных объектов, например – транспортная система, экосистема, производственная и ли какая-то ещё система, под которой понимается конкретный фрагмент окружающего мира. Но, с учётом многозначности большинства слов в любом языке, никакого противоречия нет. Такие названия реальных объектов – просто ещё одно значение слова система, относящееся к его использованию в сферах человеческой деятельности, не относящихся к прикладным исследованиям транспортных систем.

С учётом такого ограничения, можно сделать следующий вывод: *в прикладных исследованиях понятие **система** используется как разновидность модели или специфический способ моделирования.*

Различия между понятиями модели и системы обусловлены тем, что модель является более общим понятием, чем система – одна из разновидностей моделей.

Исходя из принадлежности понятия системы к классу моделей, необходимо сделать следующий вывод: *в прикладных системных исследованиях обязательно должна присутствовать процедура представления объекта исследования в виде системы*, то есть собственно процесс системного моделирования, который включает в себя два этапа.

1. *Выделение объекта из окружающей среды, то есть проведение границ системы.*
2. *Формирование списка элементов системы и определение взаимодействий между ними.*

Проведение границ системы во многих случаях представляет собой сложный и творческий процесс, цель которого совпадает с целью исследования. Границы системы не следует понимать исключительно как физические или географические. При исследовании транспортных систем, они чаще носят характер экономических или технологических.

Этап проведения границ системы, по своему содержанию, представляет собой выделение двух классов объектов: *элементов системы*, которые явля-

ются управляемыми в процессе исследования и элементов внешней среды, которые задают условия функционирования системы и являются неуправляемыми с точки зрения исследователя.

После окончания первого этапа считается, что элементы внешней среды влияют на систему, элементы системы на внешнюю среду не влияют. Элементы системы могут изменять свои характеристики как самостоятельно, так и под воздействием других элементов системы. При этом процесс определения состава системы, то есть списка элементов её составляющих, обычно выполняется параллельно с первым этапом выделения системы. А вот описание взаимодействий между элементами системы – отдельная работа, которая является самым важным и сложным этапом системного моделирования.

Инструментом моделирования связей между элементами транспортных систем всегда являются математические модели. Наилучшим вариантом моделирования при этом является аналитическое описание межэлементных взаимодействий. Создание новой и достоверной аналитической модели, по сути, означает открытие нового научного закона, который может быть и не носит всеобщего характера, как например законы Ньютона, но даёт новые знания об окружающем мире, точнее о его фрагменте, выбранном в качестве объекта исследования.

Однако, создание аналитических моделей взаимосвязей между элементами возможно далеко не всегда. Причинами этого являются или сложный характер связей между элементами, для которого ещё не найден соответствующий математический аппарат или слишком большое количество процессов в описываемом взаимодействии.

Ярким примером отсутствия на сегодняшний день по первой причине нужной всем аналитической модели, является зависимость среднего времени задержки транспортных средств на регулируемом перекрёстке. О такой зависимости вначале Вордропом [26] было высказано авторитетное мнение о сложности этой проблемы, а несколько позже, в 1958 году Вебстером [27] была по-

лучена эмпирическая модель, которой до сих пор пользуются учёные всего мира. При этом нельзя сказать, что этой проблемой мало кто занимался, так как количество источников, посвященных поиску лучшей модели задержки, измеряется в сотнях, и они продолжают появляться и сейчас достаточно часто, хотя решение до сих пор не получено. Такое внимание к взаимодействию транспортных потоков и светофоров, обусловлено высокой актуальностью этого взаимодействия в системах организации дорожного движения непосредственно на регулируемых перекрёстках с жёстким циклом. Дополнительную актуальность этого вопроса также обуславливает ещё и тем, что успешное решение этого вопроса создаст новую и надёжную основу для эффективного координированного и адаптивного управления транспортными потоками в условиях плотного движения.

Подобных примеров в сфере транспортных систем можно найти немало. Но ещё чаще здесь встречаются ситуации, когда аналитическую модель взаимодействий между элементами системы невозможно создать из-за слишком большого количества факторов, определяющих поведение отдельного элемента или системы в целом. При этом необходимо понимать, что любая аналитическая модель описывает процессы, происходящие в строго определённых условиях, и согласовать эти условия для большого количества взаимодействий также весьма сложно.

Цель создания системной модели объясняется в дальнейшем материале, а здесь следует отметить только то, что описание взаимодействия между элементами, в конечном счёте, направлено на получение модели системы в целом. Модели поведения отдельных элементов являются только фрагментами общесистемной модели, поэтому под описанием взаимодействия элементов системы следует понимать именно создание модели системы в целом, если иное не оговаривается отдельно.

С учетом сделанного замечания, ситуация со слишком большим, для аналитического моделирования, количеством факторов, определяющих поведение

системы, поясняется следующим образом. В системном исследовании все воздействия на систему оказывают либо элементы системы, либо элементы внешней среды. Другие источники влияния механизмами системного исследования не предусматриваются. Внешние воздействия чаще всего реализуются через влияние на ограниченное количество элементов системы, чаще всего – на один элемент. То есть количество элементов внешней среды, выделенное в системном исследовании, порождает соответствующее количество взаимодействий в приблизительной линейной пропорции. И обычно это не очень большое количество воздействий, тем более, что многие из них описываются просто параметрами, то есть константами.

Иная ситуация возникает при моделировании взаимодействий между элементами системы. Так как каждый из них потенциально может взаимодействовать со всеми остальными элементами, то максимальное количество взаимодействий здесь пропорционально квадрату количества элементов системы. Это приводит к очень быстрому усложнению аналитических моделей, описывающих взаимодействия между элементами, так что, в конце концов, это приводит к потере их понятийного содержания. То есть модель настолько сложна, что не может помочь в объяснении процессов, происходящих в системе.

Конечно, в этом случае, ещё остаётся возможность алгоритмической реализации аналитической модели, благодаря которой можно не разбираясь в деталях внутренних процессах в системе получать прогнозные результаты работы системы при изменении входов в модель. Однако такие модели сложно проверить на достоверность, да и увеличение количества входов в модель, не всегда возможно реализовать, в том числе и потому, что для этого потребуются расширить список элементов системы. Более детально этот случай обсуждается позже, но вспомнив о существовании эффекта бабочки можно заключить, что суммарное количество воздействий на систему и взаимодействий в ней может быть настолько велико, что не поддастся не только аналитическому описанию, но полному учёту через список её элементов и элементов внешней среды.

В этом случае от аналитического моделирования стоит отказаться и попытаться установить статистическую связь между входами в систему или её элемент и выходами из неё. То есть вместо аналитического моделирования («прозрачного ящика») использовать статистическую модель «чёрного ящика». Математическая статистика предоставляет для этого обширный инструментальный анализ связей между процессами и построения статистических моделей. Для моделирования взаимодействий между элементами в наибольшей степени подходит регрессионный анализ, который на основе известной статистики, позволяет установить наилучшую форму связи между зависимым признаком (результатом) и независимыми признаками (параметрами элементов в системном исследовании). Статистика представляет собой ряд наблюдений, который отражает уже состоявшееся взаимодействие между нужным исследователю результатом функционирования системы (или отдельного её элемента) и параметрами функционирования выбранных исследователем элементов системы и внешней среды.

Форма линейной связи, то есть значения коэффициентов, рассчитываются с помощью системы «нормальных уравнений», которая минимизирует квадратичную ошибку модели. Ограничение по форме связи можно обойти с помощью математических преобразований исходного ряда значений и такой пример будет обсуждаться ниже. Полученная в специализированном программном обеспечении модель обычно сопровождается целым набором характеристик, позволяющих сделать заключение о её применимости для прогнозирования поведения исследуемого объекта.

Тут возможны две ситуации. В первой ситуации полученная модель признаётся достаточной для дальнейшего использования, во второй – нет. Первая ситуация возникает, когда на искомый результат значительное (и достаточное для целей исследования) влияние оказывает ограниченный набор элементов, который формирует систему и её окружение. При её наступлении считается, что желаемый результат моделирования достигнут, и искомая модель взаимо-

действия между элементами системы построена. Если это была модель всей системы в целом, то результат системного исследования можно считать достигнутым, но с очень серьёзными оговорками. Так как внутренняя структура взаимодействий осталась не раскрытой, надёжность такой модели не очень высока, да и её поведение можно прогнозировать только в ограниченном интервале возможных значений.

Такой же набор значимых факторов может существовать и во второй ситуации, а отрицательные результаты моделирования обусловлена тем, что какая-то их часть не попала в список элементов системы или внешней среды. Тогда необходимо продолжить поиск такой структуры системы, которая более точно описывает исследуемый объект. Но чаще всего вторая ситуация бывает обусловлена тем, что на искомый результат оказывает влияние большое количество малозначимых факторов, из множества которых нельзя выделить нужный набор наиболее влиятельных элементов и создать относительно простую статистическую модель.

Тогда в качестве инструмента моделирования остаётся использовать другие способы построения моделей, к числу которых относятся имитационное моделирование (метод Монте Карло), а также нейронные сети, с помощью которых можно аппроксимировать непрерывные и ограниченные функции [28].

Нейронные сети являются очень перспективным инструментом описания сложных, но постоянно повторяющихся процессов, для которых не найдено аналитического описания, а регрессионный анализ из-за своей линейной основы оказался не достаточно гибким для того, чтобы описать сложные связи внутри изучаемого объекта. Такие ситуации обычно возникают с естественными объектами (напр. физическими, химическими, механическими и т.д.). В транспортных системах, имеющих социальный характер, такие ситуации можно встретить скорее в виде исключения, а основные проблемы здесь обычно заключаются не в сложности взаимодействий, а в их количестве.

Поэтому гораздо большее распространение в сфере транспортных систем

получило имитационное моделирование. Свои преимущества имитационные модели получают благодаря возможности свертки многих случайных процессов в одну случайную величину, для которой можно подобрать закон распределения, что исчерпывающим образом её характеризует. Эти случайные величины становятся входами в имитационную модель, которые принимают в каждом расчёте (прогоне модели) случайные значения в соответствии со своим законом распределения.

Такой способ моделирования приводит к существенному сокращению количества взаимодействий внутри системы и воздействий на неё. Остаются только самые основные взаимодействия, которые моделируются описанными выше способами, с предпочтением в пользу аналитического моделирования перед статистическим.

Платой за такие упрощения является случайный характер результатов, что требует последующей их обработки с помощью математической статистики для формулирования выводов. Имитационное моделирование получило весьма широкое применение в практике управления транспортными системами, в первую очередь системами организации дорожного движения и логистических системах.

Выбор наилучшего метода моделирования всегда остаётся за исследователем, который должен руководствоваться не только свойствами моделируемого объекта, а в первую очередь – целями исследования.

Целью исследования является поиск наиболее эффективного варианта управления объектом, с точки зрения определённой части его пользователей. Для этого необходимо рассмотреть альтернативные варианты состояния системы и выбрать тот из них, который обеспечивает максимум показателя, принятого в качестве критерия эффективности.

В качестве примера можно рассмотреть автобусный маршрут. Пусть границы системы проведены так, что в качестве её элементов выступает только заданная марка подвижного состава (ПС). В качестве элементов внешней среды

могут служить трасса маршрута, метод составления расписания движения, потребности пассажиров в поездке, элементы организации движения на маршрутах и так далее. Тогда количество возможных вариантов состояния системы будет определяться набором возможных значений количества автобусов. Минимальное количество автобусов на маршруте равно единице, максимальное определяется возможностями автотранспортного предприятия (АТП). Пусть это число A_1 равно десяти. Тогда количество возможных вариантов состояния системы N_C :

$$N_C = A_1 = 10. \quad (1.1)$$

Здесь предполагалось, что возможно использование только одной марки ПС. Если существует возможность использования двух марок автобусов, с предпочтением первой марки, причем имеется $A_2 = 5$ единицам, то в самом простом случае общее количество возможных вариантов состояния системы:

$$N_C = A_1 + A_2 = 10 + 5 = 15. \quad (1.2)$$

Естественно, что чем выше число N_C , то есть больше количество альтернатив, тем выше вероятность получения более эффективного результата.

Для элементов внешней среды будет рассмотрен лишь один вариант их состояния. В самом простом случае этот вариант означает постоянство характеристик внешней среды. Но вполне возможны случаи, когда её характеристики задаются не как постоянные величины.

Включение еще одного активного, способного изменять свои параметры, элемента в систему приведет к появлению дополнительных вариантов состояния системы. Тогда получается, что чем больше элементов включается в систему, тем больше вариантов её состояния может быть рассмотрено и тем выше вероятность получения более эффективного решения. Опять возникает вопрос,

а где нужно остановиться, то есть ограничить модель исследуемого объекта. Если не провести границу, количество возможных вариантов состояния системы будет также бесконечно и решение не будет найдено.

Вариант выделения системы из внешней среды и элементов внутри системы определяется целями исследования. Если поставлена другая задача, то есть, сформирован другой критерий эффективности и выбраны другие рычаги управления, то возможен и другой набор элементов системы.

Например, для минимизации времени передвижения пассажиров на маршрутном транспорте может использоваться метод оптимизации длины перегонов между остановочными пунктами маршрутов, в этом случае элементами системы будут выступать остановочные пункты, а количество возможных состояний системы будет определяться набором вариантов расположения остановок. С той же целью может использоваться метод маршрутизации – поиск рационального варианта сочетания трасс и провозных возможностей маршрутов. В этом случае элементами системы выступают уже маршруты, а остановочные пункты, скорее всего, будут выступать в качестве элементов внешней среды для маршрутной системы.

В данном подразделе были рассмотрены основные положения, касающиеся использования системного подхода к исследованию различных объектов и следующим этапом является изучение особенностей транспортных объектов с точки зрения ОТС.

1.2 Элементы классификации систем.

Целью классификации является выделение различных типов объектов, для определения общих черт, характеризующих каждый из выделенных типов.

Классификация нужна для определения возможностей, особенностей и других характерных черт каждого выделенного типа.

Если классификация автомобилей, в частности, предусматривает деление автомобилей на бортовые и самосвалы, это означает, что каждый из этих типов

автомобилей предназначен для перевозки соответствующих видов грузов.

Для того чтобы установить цель классификации различных систем, вначале необходимо рассмотреть определение и цели системного подхода.

Системный подход *состоит в разработке методов исследования и конструирования сложных объектов – систем разных классов и типов.*

Небольшое напоминание. Выше была определена принадлежность понятия системы в прикладных исследованиях к моделям. Однако термин «система, которая описывает транспортный объект» не используется. Употребляется гораздо более простой вариант «транспортная система» в соответствие со значением этого слова в прикладных исследованиях, введенном в предыдущем разделе. Здесь и в дальнейшем также будет использоваться эта терминология. При этом нужно помнить о том, что в прикладных исследованиях системы являются способом моделирования.

Следует отметить существенную общность понятий «прикладное исследование» и «управление». Целью большинства прикладных исследований в сфере транспорта является выработка управляющих воздействий, направленных на достижение желаемого состояния объекта. Те же задачи решаются в управленческой деятельности. Разница заключается в используемом для принятия решений инструментарии и, возможно, в круге решаемых задач. Поэтому здесь и далее все, что относится к исследованию, в большинстве случаев может быть отнесено и к процессу управления.

Задачи системного подхода:

- 1. Разработка средств и методов представления сложных объектов в виде систем разных классов и типов.*
- 2. Построение общих моделей систем.*
- 3. Исследование структуры теории систем и различных системных работок и концепций.*

Так как первой задачей системного подхода является разработка методов и средств представления сложных объектов как систем, и это всегда делается

для целей их дальнейшего исследования, то и **целью классификации систем** служит выделение особенностей различных типов объектов с точки зрения методов исследования, применяемых к ним.

Задача состоит в выделении тех типов систем, к которым относятся транспортные системы, чтобы определиться с наиболее подходящими методами их исследования. Структурная схема укрупненной классификации систем приведена на рис. 1.5.

Самая общая классификация выделяет два типа систем:

- **реальные;**
- **абстрактные.**

Их особенности будут рассмотрены на примере транспортных систем.

Реальные транспортные системы (РТС) – это относительно ограниченные экономико-технологические объекты, выполняющие определенные транспортные функции.

Например: железнодорожный, водный, воздушный, городской транспорт, транспортное предприятие, пригородный маршрут и т.д.

При их выделении чаще всего используются четыре основных признака:

- *территориальный;*
- *организационный;*
- *по объекту перевозок;*
- *по виду транспорта.*

Из всех признаков только организационный может потребовать дополнительного объяснения. Этот признак позволяет выделять системы в зависимости от их принадлежности к тому или иному юридическому или физическому лицу. При исследовании транспортных объектов организационный признак часто используется для выделения транспортных систем. Например, автотранспортное предприятие с большой достоверностью может считаться уже выделенной системой. Однако, несмотря на кажущуюся очевидность такого решения, в научных исследованиях оно далеко не всегда приводит к желаемым результатам –

получению максимально эффективного решения задачи.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ

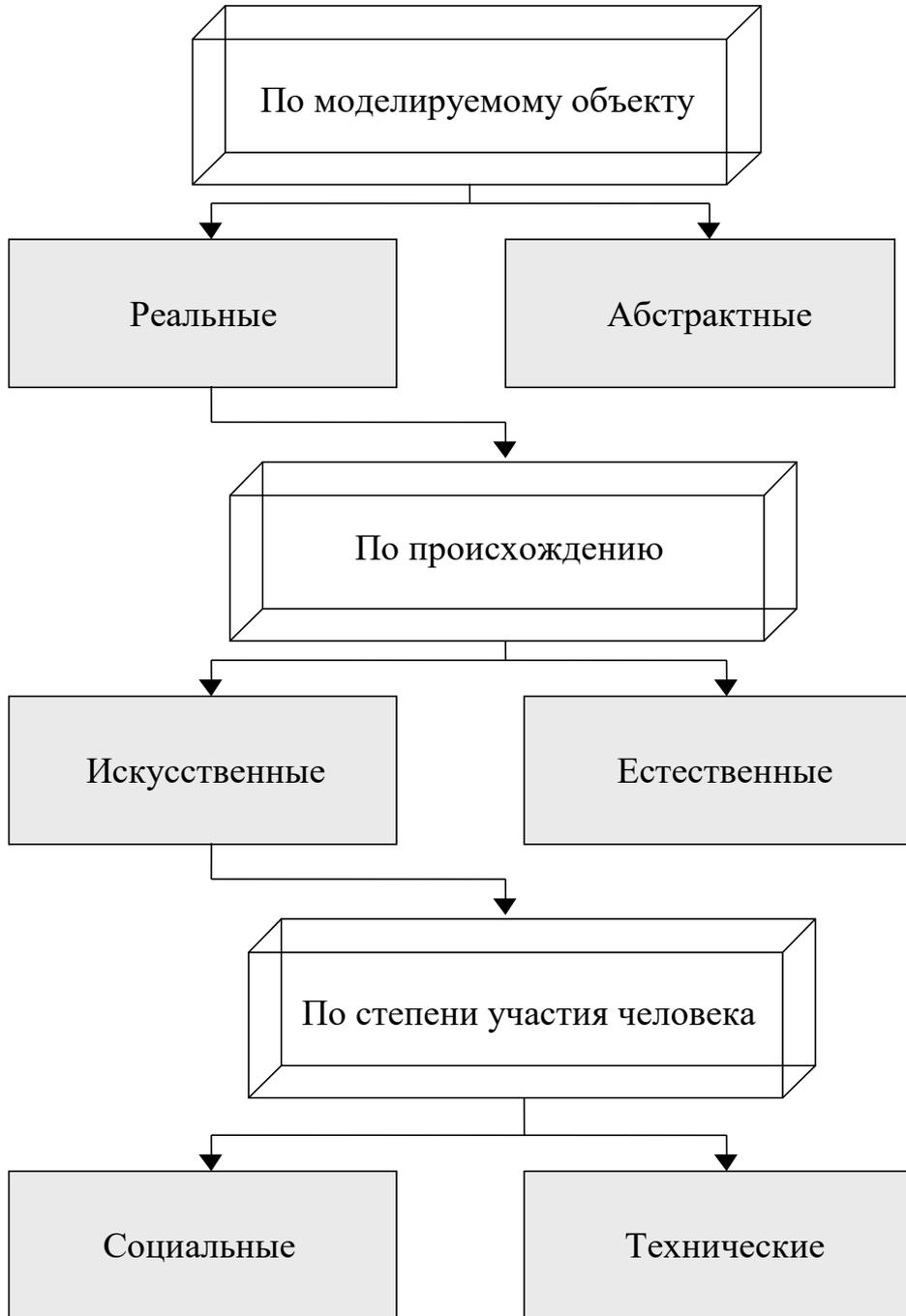


Рисунок 1.5

К РТС также относятся **системы организации дорожного движения**.
Здесь в основном используются те же признаки выделения, за исключением

объекта перевозок.

Типичными задачами, которые могут решать специалисты по организации дорожного движения, являются такие как «*Совершенствование организации дорожного движения в ... районе города (области)*» и так далее. Подразумеваются в виду системы организации движения автомобильного транспорта.

Если рассматриваются системы организации движения одного вида транспорта, то используется только территориальный признак выделения. Решение вопроса о способе организации работы железнодорожного переезда не относится к одному виду транспорта, однако, и здесь также используется только территориальный признак выделения. То есть при выборе объекта исследования чаще всего вначале выделяются виды транспорта (один или несколько), относящиеся к объекту исследования, а затем проводятся территориальные границы системы организации дорожного движения.

Аналогичные процедуры используются при выделении реальных транспортных систем для объектов, осуществляющих перевозку грузов или пассажиров. Для них системы организации движения, чаще всего, являются внешней средой. А сам процесс выделения заключается в выборе объекта перевозок, вида транспорта и географических границ. Любой из этих признаков может отсутствовать в процессе, и порядок их перебора может быть свободным.

Выделяются несколько типов задач в сфере организации перевозок, которые отличаются друг от друга подходами к их постановке и решению.

Достаточно часто решаются задачи организации перевозок в рамках одного транспортного предприятия, когда у него имеется заказ на выполнение определенной транспортной работы. В этом случае уже имеется ограниченный по организационному признаку набор транспортных средств. Поэтому основным признаком выделения систем для таких задач является *объект перевозок*.

При решении вопросов рациональной доставки различных грузов допускается использование другого подхода, в том случае, когда рассматриваются все возможные варианты перевозки, а конкретные исполнители транспортной

работы определяются по результатам исследования. Тогда должны использоваться *территориальные границы* и выделение *по виду транспорта*.

При решении транспортных проблем различных территориальных объектов, например городов или районов, уже имеется достаточно четко определенные границы объекта исследования. Но здесь возможна дальнейшая структуризация объекта исследования по оставшимся трём признакам.

При организации международных перевозок такие определенные границы чаще всего отсутствуют, так как основным отличительным признаком таких объектов является необходимость пересечения границ и территорий различных государств, что обуславливает наличие весьма жесткой системы ограничений при решении управленческих задач. Поэтому в данном случае могут использоваться все возможные признаки без ограничений.

Так же необходимо отметить, что использование этих признаков основано на весьма грубых допущениях о достаточно высокой степени изоляции транспортных объектов, которые представляются в виде систем. Поэтому при решении прикладных научных задач использовать их нужно очень осторожно, поскольку во многих случаях они ограничивают инструментарий, который можно использовать при выборе рычагов управления объектом.

Абстрактные транспортные системы – *некоторое единство форм и свойств реальных транспортных систем, присущих всем таковым системам вне зависимости от их конкретных особенностей.*

Чем абстрактные системы отличаются от реальных?

Реальные – описывают реально существующие объекты.

Абстрактные – описывают абстрактные объекты, которые являются моделями реальных систем.

Эти модели разрабатываются для определения наиболее общих закономерностей развития отдельных видов транспортных объектов. Они содержат только те элементы, которые имеются во всех объектах данного типа и отражают только общие для всех объектов взаимосвязи между ними. То есть для

того, чтобы создать абстрактную ТС, вначале необходимо выделить какую-то группу транспортных объектов, затем нужно определить, какие элементы и связи между ними могут считаться общими для всех объектов из рассматриваемой группы (данного типа). После этого составляется модель выделенных объектов, которая содержит только эти общие черты.

Например, абстрактная модель городского маршрута может состоять из остановочных пунктов и подвижного состава, которые не имеют конкретных характеристик. Эти характеристики принадлежат конкретным автобусным, троллейбусным или трамвайным маршрутам и для абстрактной ТС не требуются. Но эти два элемента могут составлять абстрактную транспортную систему городского маршрута, с помощью которой исследуются различные аспекты работы маршрутов. Отсутствие конкретных характеристик приводит к тому, что на её основе нельзя выработать конкретных рекомендаций для одного объекта, но такое изучение позволяет установить взаимосвязи между компонентами и на этой основе выработать общие рекомендации. Возможно создание и более общих абстрактных ТС.

Примерами абстрактных систем в общем смысле являются также гипотезы, теории, научные знания и так далее.

Абстрактные ТС используются исключительно в научной работе и с научными целями – для получения новых знаний об объектах исследования. Их задача не генерация непосредственно управляющих воздействий, как в инженерной деятельности, а разработка методов принятия таких решений. Поэтому полученного представления о них вполне достаточно и в дальнейшем будут рассматриваться только реальные транспортные системы.

К настоящему времени накопилось уже достаточно большое количество многообразных классификационных признаков для реальных транспортных систем. Здесь рассматриваются только некоторые из них, начиная с самых общих.

По происхождению реальные системы делятся на:

- *искусственные;*
- *естественные.*

Естественные системы – это объекты, которые возникают вследствие природных процессов, **искусственные** – созданные человеком объекты.

Транспортные системы в основном относятся к искусственным, а это значит, что для них можно определить цель существования или развития.

Цель – это предвосхищение в сознании результата, на достижение которого направлены действия.

Можно считать, что между целями и действиями существует прямое соответствие. Каждое действие имеет свою цель. Если кто-то не умеет объяснить, почему он совершил тот или иной поступок, скорее всего это означает неумение сформулировать свои мысли и чувства, а не отсутствие цели. Возможно, это утверждение слишком строгое и допустимо существование примеров бесцельного поведения. В особенной степени это относится к случаям, когда действия совершаются под воздействием чувств, а не мыслей. Но такие поступки чаще всего относятся не к социальным объектам, а к отдельным индивидуумам, находящимся в условиях дефицита времени для принятия взвешенного решения. Поэтому к вопросам выработки управляющих воздействий на транспортные системы это имеет мало отношения и здесь стоит исходить из наличия цели у объекта управления. Поэтому определение цели их существования и развития является только вопросом знаний, умений и техники их использования.

Все искусственные системы и транспортные, в том числе, относятся к целенаправленным системам.

Целенаправленные системы – объекты, поведение которых подчинено достижению определенной цели.

Необходимо отметить, что понятие цели является субъективным, то есть, зависит от субъекта, в сознании которого она формируется.

Можно пояснить это на примере того же городского маршрута. Для водителя (кондуктора) целью работы маршрута является получение доходов, при

минимуме усилий с его стороны. Для пассажира цель работы маршрута – удовлетворение потребностей в передвижениях с минимальными затратами. Объект один, а цели разные.

И еще одна особенность искусственных систем облегчает их исследование. Так как они являются результатом деятельности человека, исследователь потенциально имеет большую свободу в принятии решений или выборе состояний системы. Это не означает, что не нужно оценивать влияние принимаемых решений на окружающую среду. Но в исследовании эти вопросы будут занимать уже другое место – при формировании системы ограничений.

Среди искусственных систем, в свою очередь также можно выделить два класса, в зависимости от степени участия человека в их деятельности:

- *технические;*
- *социальные.*

Примером технической системы может служить автомобиль, здание, авторучка, молоток и так далее.

Основная разница между техническими и социальными системами лежит в степени взаимосвязи объектов с их окружением. Для технических систем характерным является наличие достаточно четких границ между представляемыми в виде систем объектами и окружающей их средой. Ещё одним отличием является наличие группового или индивидуального сознания у некоторых элементов социальных систем, который предопределяет их активность и усложняет процесс системного моделирования, в котором параметры элементов считаются заданными и постоянными.

Благодаря четкости границ, свойства технической системы практически полностью определяются свойствами элементов, из которых она состоит. Поэтому пренебрежение взаимодействием системы с окружающей средой здесь не является большой проблемой. При работе с технической системой, прежде всего, определяются цель её создания и условия, в которых она будет функционировать. Эти условия, то есть внешняя среда, описываются с помощью огра-

ничений, в которой создается или совершенствуется сам объект.

Если продолжить пример с автомобилем, то каждый из типов автомобилей предназначен только для определенных условий эксплуатации. Легковые автомобили, попадающие в Украину из-за рубежа через официальных дилеров, в основном отличаются от стандартного исполнения в странах происхождения. Почему? Потому что для них изменяются условия эксплуатации.

При работе с технической системой, влиянием объекта на окружающую среду или пренебрегают или оно учитывается простыми ограничениями на показатели его функционирования.

Транспортные системы относятся к социальным системам.

Социальные системы являются наиболее сложными объектами. *Характерной чертой для них является активное участие человека (общества).* Это участие и определяет все отличительные признаки системы. Переход от технических, к социальным системам достаточно прост: автомобиль без водителя – техническая система, с водителем – социальная. Чем больше людей участвует в системе, тем большей сложностью она обладает.

В отличие от технических систем, у социальных нет четко определенных границ, при которых степень взаимодействия элементов системы между собой гораздо сильнее, чем взаимодействие элементов системы с внешней средой.

Отсутствие четких границ определяется высокой степенью зависимости активного элемента системы – человека, от множества внешних факторов. Поэтому даже с одним человеком, в качестве активного элемента, система может считаться социальной. Характеристики системы во многом зависят от поведения людей в них, а это поведение в свою очередь зависит от их состояния, настроения, которые зависят от других людей, организаций, погоды и так далее. Вместе с большим количеством людей в социальных системах всё это, в конечном счете, приводит к тому, что провести четкие границы для такой системы бывает весьма сложно.

Поэтому при рассмотрении проблем транспортных объектов каждый раз

приходится решать вопросы:

- *какие элементы включать в систему?*
- *как описать взаимодействие элементов системы с элементами внешней среды, чтобы погрешности такого описания объекта были минимальны?*

Социальный характер транспортных систем предопределяет также тот факт, что большинство из них относится к **кибернетическим системам**, для которых характерны процессы переработки информации.

Кибернетика – наука об общих чертах процессов и систем управления различных объектов.

Свойства кибернетических систем обязательно должны учитываться в процессе исследования или управления транспортными объектами. Для этого ниже приводится список шести общих свойств кибернетических систем, среди которых выделены три ключевых, для транспортных систем, свойства, требующие учета при исследовании и реализации управляющих воздействий. Различия в отношении к тем или иным свойствам кибернетических систем вызваны тем, что часть из них можно найти у достаточно широкого списка систем, в том числе у естественных или технических.

Свойства кибернетических систем:

1. *Целостность* (четкие границы систем).

Это свойство характерно для очень многих систем, в том числе и не относящихся к кибернетическим. Как раз у многих кибернетических систем, из числа социальных, могут возникнуть серьезные проблемы с определением границ. Во многих случаях такие социально-кибернетические системы имеют четкие границы только по организационному признаку.

2. *Структурность* (состоят из большого количества подсистем).

Так как каждая система представляет собой совокупность элементов, а элементы в свою очередь могут быть системами, то большое количество подсистем определяется не столько свойствами самой системы, сколько способом или глубиной её представления. Следовательно, данное свойство не может рас-

смаиваться как ключевое.

3. *Сложная структура связей между элементами.*

Само по себе понятие сложности нелегко сформулировать. Один из вариантов определения: **сложная система** – это система, при исследовании которой не хватает информации для эффективного управления ею. Но вряд ли можно назвать простой такую систему, как орбитальная космическая станция, однако под это определение она не попадает. Это свойство правильно считать присущим не только кибернетическим системам.

4. *Наличие обратных связей.*

Речь идет о влиянии системы на процесс управления или исследования. В чем оно заключается? В том, что объекты, на которые направлены управляющие воздействия, с точки зрения иницирующего их элемента, могут реагировать на эти воздействия неоднозначно в одних и тех же условиях.

Например, практически невозможно точно предугадать реакцию потребителей на изменение цен на товары, даже если точно известна ценовая политика конкурентов. Можно только определить направление изменения спроса, да и то не всегда.

И дело не только в том, что подобная оценка требует слишком много информации. Сам по себе элемент, подвергающийся управляющему воздействию, имеет возможности самоорганизации, то есть изменения собственной структуры. В случае с покупателем не исключено изменение отношения к товару – переоценка ценностей. В каких-то пределах такие изменения носят эволюционный характер, но возможны и качественные скачки.

Качественные изменения структуры какого-то элемента могут не только свести к нулю эффективность исследования, но и привести к прямо противоположным результатам.

Для того чтобы избежать этих скачков, возможна постепенная реализация управляющих воздействий, так как вероятное изменение структуры элемента подразумевает необходимость их корректировки. Графически это проил-

люстрировано рисунком 1.6.

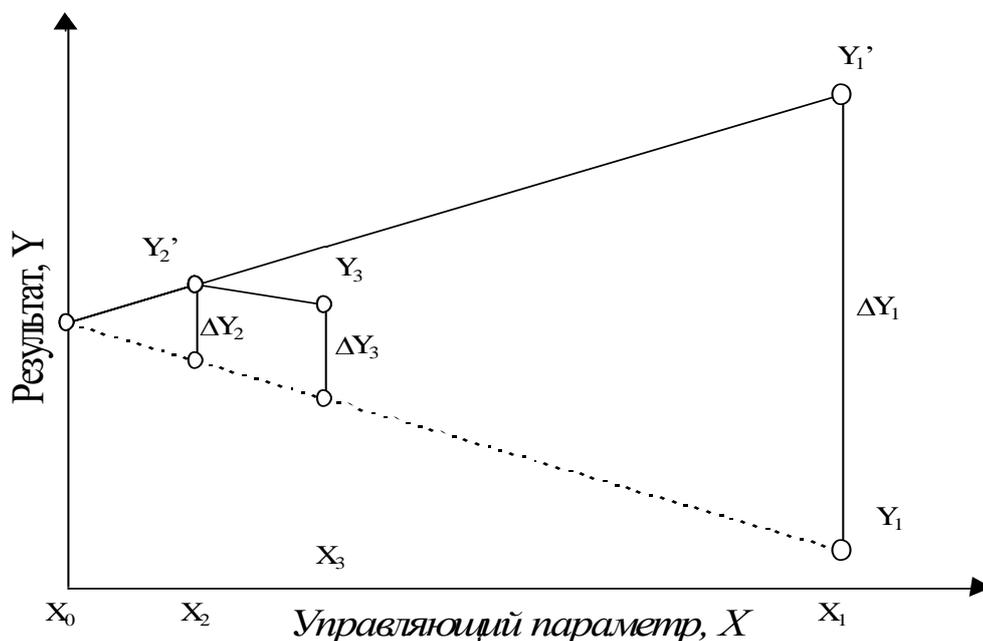


Рисунок 1.6

Изменение значения управляющего параметра от X_0 до X_1 может привести не к желаемому результату Y_1 , а к другим последствиям – Y_1' . Разница между ними, ΔY_1 , может быть весьма заметной. В то же время, управляющее воздействие меньшей интенсивности X_2 преследующее меньшую цель Y_2 , приведет, при сохранении тенденции, к результату Y_2' и к меньшей ошибке ΔY_2 . Кроме того, свойство самоорганизации объекта управления может привести к тому, что следующий шаг в том же направлении X_3 будет давать другое направление в изменении результата Y_3 . Да и направление изменения параметра X может по желанию исследования, после известной реакции объекта на управляющее воздействие, стать другим.

Естественно, что такая стратегия учета обратных связей не всегда эффективна. В частности, в случае относительно полного совпадения векторов ожидаемой и фактической реакции объекта, такая политика может привести к существенной задержке в достижении желаемого состояния. Но существуют и другие примеры, в которых постепенная реализация управляющих воздействий

является весьма эффективным инструментом.

В годы плановой экономики городские маршруты большой длины были невыгодны для АТП, поскольку приносили большие убытки. Но большинство попыток отмены маршрутов наталкивались на резко негативную реакцию населения, а она в то время была основным критерием оценки качества работы маршрута. В таких условиях работниками пассажирского автомобильного транспорта была выработана технология постепенного закрытия маршрутов, которая давала хорошие результаты при наличии альтернативных вариантов передвижения для пассажиров отменяемого маршрута.

Согласно ей сокращение количества подвижного состава на маршруте происходило постепенно – снималось несколько единиц через 2-3 месяца. Сокращение количества автобусов приводило к ухудшению качества перевозок на маршруте из-за роста времени ожидания и повышения степени заполнения салонов автобусов. Пассажиры начинали в большей степени использовать другие варианты передвижения, и после этого следовало очередное сокращение. В конце концов, на маршруте оставалось только один – два автобуса. Маршрут прекращал свое существование почти безболезненно, во всяком случае, без резко негативной реакции.

Налицо структурное изменение элемента системы или внешней среды «пассажиры». Это структурное изменение заключается в постепенном повышении равнодушия к существованию маршрута, к снижению потребности в нем. Иными словами, к изменению внутренних характеристик элемента.

Возможность подобных структурных изменений определяет принадлежность элемента «пассажиры» к самоорганизующимся системам.

Самоорганизующиеся системы – это системы, которые способны в ходе своего функционирования изменять собственную структуру.

Свойство самоорганизации присуще всем живым и социальным системам.

Уместно заметить, что в системном исследовании основной упор делает-

ся на изучении структуры связей между элементами, а структура самих элементов считается неизменной. Тогда можно сделать вывод, что *кибернетический характер систем вызван недостаточной структуризацией отдельных элементов системы или окружающей её среды*, поскольку углубление структуризации может повысить корректность утверждения о постоянстве структуры элементов системы.

Отсюда вытекает *следующий инструмент работы с кибернетическими системами – углубление структуризации элементов*.

Естественно возникает та же проблема, что и с определением списка элементов системы. Чем более глубоко раскрыта структура элемента, тем точнее результаты управления или исследования, меньше необходимость учета обратных связей, но тем больше времени и усилий требуется на принятие решений или их выполнение. Возможные пути решения этого вопроса будут рассмотрены позднее.

Следующий элемент в списке свойств кибернетических систем:

5. *Наличие собственной информационной базы и информационных потоков между элементами.*

Это свойство так же, как и предыдущее, является ключевым для кибернетических систем. Так как управляющие воздействия, направленные на объект, могут вызывать различную реакцию, то для выработки очередных управляющих воздействий эту реакцию необходимо отслеживать. Под собственной информационной базой в данном случае понимается набор характеристик, позволяющий оценить реакцию объекта на управление им.

Для предыдущего примера таким показателем было количество жалоб на работу маршрута.

Этих параметров может возникать значительно больше при рассмотрении каких-то других объектов и ситуаций. Массив данных для оценки состояния объекта, может использоваться не один раз, а накапливаться. Накопленные данные также являются информационной базой, анализ которой позволяет по-

высить точность прогноза о поведении управляемого объекта.

Наличие информационных потоков является необходимым условием для передачи данных. Средства их передачи могут быть самыми разными: от отдельных исполнителей и отделов до сложных технических устройств.

Ярким примером кибернетических систем являются автоматизированные системы управления транспортом или дорожным движением.

6. *Наличие энергетических ресурсов.*

Наличие энергетических ресурсов присуще не только кибернетическим системам и их основной особенностью является переработка информации, а не энергии. Однако, для реализации всех факторов и функций, описанных выше, наличие энергетических ресурсов необходимо.

Поэтому это свойство будет считаться ключевым для кибернетических систем и в исследованиях, посвященных транспортным объектам, необходимо предусматривать необходимые для реализации целей управления энергетические ресурсы.

7. *Четкая цель развития.*

Этот фактор является принадлежностью всех искусственных систем, не только кибернетических. Поэтому четкая цель развития не будет выделяться в качестве ключевого свойства для кибернетических систем.

В ряде случаев при исследовании могут возникать проблемы с определением цели существования или развития искусственной системы. Но, по видимому, это нужно объяснять не отсутствием цели, а недостаточным для её формализации уровнем знаний. Если цели у искусственной системы нет, то есть она не выполняет никакой роли в удовлетворении потребностей общества в целом или человека в частности, то непонятно откуда и зачем она появилась?

Одной из центральных проблем кибернетики является вопрос о структуре самоорганизующихся систем. При создании объектов, относящихся к кибернетическим, следует предусматривать возможности изменения структуры объекта в ответ на нестабильность внешней среды. Для этого в системе должны

присутствовать как специальные элементы, так и резервы энергии, ресурсов, исполнителей и т.д.

1.3 Системный анализ транспортных систем

Системный анализ – совокупность методов и средств, используемых при исследовании и конструировании сложных и сверхсложных объектов.

Прежде всего, он относится к методам выработки, обоснования и принятия решений при проектировании, создании и управлении социальными, экономическими, человеко-машинными и техническими системами.

Системный анализ предназначен главным образом, для исследования сложных систем, созданных и функционирующих с участием человека.

Системный анализ выделился из системного подхода из-за наличия особенностей социально-экономических систем, которые были описаны в предыдущем подразделе. Этому выделению предшествовала качественная переоценка возможностей исследования объектов.

Одной из отличительных особенностей системного анализа является применение исключительно математического моделирования при решении исследовательских задач.

Данная особенность объясняется спецификой рассматриваемых объектов. Для выделения их из общего списка возможных объектов исследования необходимо рассмотреть различия между традиционными задачами и задачами, решаемыми методами системного анализа:

К традиционным задачам относятся проблемы исследования и конструирования технических объектов.

Характеристика традиционных (классических) задач.

1. Ограниченное количество достоверных исходных данных и аксиом.

Для этих задач характерно существование набора элементов системы, взаимосвязь между которыми носит функциональный характер. Поведение и свойства такого набора для заданных условий функционирования полностью

определяются состоянием его элементов. Если ввести условный показатель степени взаимосвязи между различными элементами I (нечто похожее на коэффициент детерминации), при этом значение $I = 1$ будет означать функциональную зависимость, а $I = 0$ – отсутствие всякой зависимости, то можно проиллюстрировать характерную особенность задач в сфере техники, рисунок 1.7.

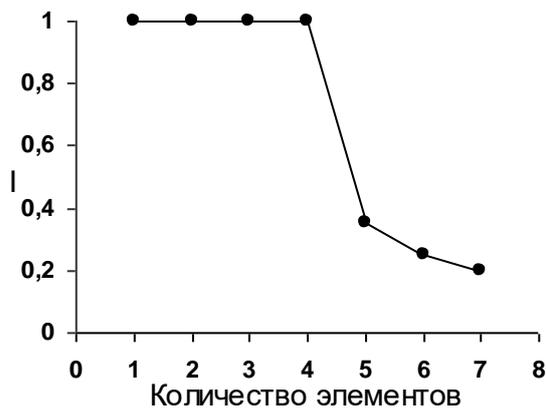


Рисунок 1.7

Точка на графике показывает степень взаимосвязи очередного элемента с совокупностью предыдущих или, иначе говоря, степень влияния очередного элемента на свойства накопленной совокупности элементов, включая последний. Для автомобиля четвертым элементом является водитель, элементами с

большим порядковым номером могут быть транспортное предприятие, дорожные условия, транспортный поток и т.д.

График иллюстрирует наличие достаточно очевидной ступени вниз в степени влияния элементов на объект исследования. Именно эта ступень в большинстве исследований автоматически принимается за границы технической системы.

Возможность свободного выделения объекта из окружающей среды предполагает и конечное число его характеристик. Естественно, что и собрать характеристики узлов, агрегатов или материалов, из которых создается или уже состоит объект сравнительно просто. Даже если речь идет о сложных технических системах, это лишь вопрос усилий, времени и средств, необходимых для исследования или принятия решений. Для заданных условий применения характеристики составных элементов системы могут считаться полностью стабильными и нет необходимости применять дополнительные ограничения и допущения.

Для технических систем часто используется понятие «замкнутой» систе-

мы, то есть они получают такое системное представление.

Замкнутая система – это объект, который имеет фиксированные границы и характеризуется высокой степенью независимости от внешней среды.

У замкнутой системы не происходит обмена энергией, веществом, информацией и так далее с окружающей средой. Считается, что характеристики замкнутой системой не зависят от окружающей среды. В общем случае это конечно же не так, но в некоторых случаях корректность такого представления не вызывает сомнения.

2. Основное внимание уделяется точности математического аппарата.

Математическое моделирование при решении традиционных задач не носит абсолютного характера. Оно является инструментом, который позволяет эффективно определить направление разработок, то есть сократить количество возможных альтернатив и выяснить общие закономерности для изучаемых процессов и элементов.

Высокая степень точности и достоверности исходных данных позволяют, а функциональные связи между элементами – требуют использования математического аппарата высокой степени точности. Для описания происходящих в таких объектах процессов, применяются дифференциальные или интегральные уравнения высоких порядков или другие, не менее сложные варианты моделирования, в том числе нейронные сети. Часто решение таких уравнений вызывает математические трудности, настолько они бывают сложными.

Однако такие модели позволяют достаточно полно рассчитать физические характеристики явления и объекта в целом.

И все же при решении традиционных задач окончательные выводы делаются только после проведения эксперимента с самим объектом или его физической моделью.

3. Возможность проведения эксперимента в реальных условиях.

Эксперимент не позволяет получить общих закономерностей и объективного прогноза поведения объекта при изменении условий функционирования.

Но эксперимент позволяет проверить правильность выводов, полученных с помощью математической модели на конкретном объекте и в реальных условиях, определить краевые условия и тем самым выделить конкретное решение, которое соответствует данному процессу. Сочетание математической модели и эксперимента обеспечивает достаточно высокую степень гарантии получения точного и надежного решения.

Эксперимент необходим еще и потому, что математические модели не позволяют гарантировать абсолютную надежность результатов, так как в них могут быть пропущены некоторые связи между элементами, условия функционирования или другие факторы.

Ярким примером неудачного математического моделирования может служить атомный реактор, который использовался на Чернобыльской атомной электростанции. Его характеристики определялись с помощью математической модели и один из его авторов, в то время президент академии наук СССР, академик Александров говорил, что реактор настолько безопасен, что он (Александров), может на нем спать. Истина оказалась совсем иной, а результаты этой ошибки обернулись самой большой экологической катастрофой двадцатого столетия.

Экспериментальные исследования являются необходимой частью решения любой традиционной задачи.

Перечисленные особенности являются положительными моментами с точки зрения возможностей исследования и принятия решений относительно технических систем. Поэтому и развитие общества достигает самых высоких темпов именно в области техники.

Иное дело сфера социально-экономической деятельности человека. Здесь темпы развития уровня знаний значительно ниже, что в первую очередь обусловлено особенностями социально-экономических задач.

Характеристика социально-экономических задач.

- 1. Большое количество исходных данных с неполной достоверностью.*

В отличие от традиционных задач, при рассмотрении социально-экономических проблем исследователь сталкивается с несколько иным набором элементов. Те наборы элементов, которые в предыдущем случае являлись системами (система ВАД, для приведенного выше примера), даже в самом детальном варианте рассматриваются как единые элементы социально-экономических систем.

Эти элементы приносят самую высокую долю определенности в решение социально-экономических задач, поскольку характеристики таких элементов наиболее стабильны. Можно продолжить пример с автомобилем. Если раньше он был объектом исследования и представлялся в виде набора элементов для получения расчётных характеристик, то теперь он является элементом транспортной системы. Его взаимодействие с другими элементами определяет характеристики системы в целом. Но эти характеристики уже не будут функционально зависеть от относительно узкого набора элементов. Обширные связи элементов социально-экономических систем приводят к плавному снижению степени взаимосвязи между ними, рисунок 1.8.

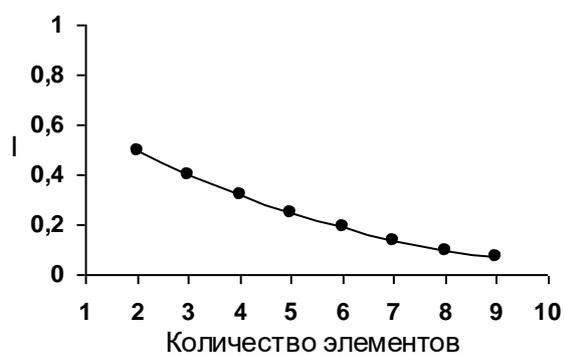


Рисунок 1.8

Так, каждый элемент оказывает на совокупность предыдущих элементов влияние не намного меньшее, чем предшествующий ему элемент, поэтому здесь сложно определить с границей системы. Кроме того, даже самые «влиятельные» элементы не обеспечивают функциональной зависимости для минимальной совокупности элементов системы.

Отсутствие четких границ системы приводит к тому, что любой вариант ограничения количества элементов в системе будет вызывать ощутимые погрешности описания реальности. Поэтому характеристики элементов системы или внешней среды приходится определять как случайные величины, поведение которых обусловлено действием многочисленных факторов, не учтённых в

исследовании.

Для решения задач в области организации перевозок, системы организации движения и транспортная сеть в целом, обычно выступают в качестве элементов внешней среды. Тогда и техническая скорость движения автомобилей определяется внешней средой. В исследовании она будет либо постоянной величиной (средней по результатам обследования), либо случайной, характеристика которой задана функцией распределения. Есть и другие способы представления, в частности – регрессивные модели, но они все равно не позволяют получить полностью достоверную оценку технической скорости.

Еще большее повышение точности при определении характеристик движения автомобиля на маршруте возможно, но требует дополнительных знаний. Для этого, необходимо умение расчета времени простоя на перекрестках, а для этого нужно знать характеристики всех светофоров, нерегулируемых перекрестков, точное время прибытия к каждому перекрестку и интенсивность движения на конкретных участках улично-дорожной сети. Первые два показателя можно вполне достоверно охарактеризовать, конечно, если сделать допущение о безотказной работе технических средства управления дорожным движением. Но два последних зависят от поведения слишком большого числа объектов, чтобы можно было оценить их с помощью функциональных зависимостей. Этими объектами являются другие участники движения, не имеющие никакого отношения к рассматриваемому объекту и, тем не менее, влияющие на его характеристики. Естественно, очень точно определить марки и количество автомобилей, которые окажутся на полосе движения в заданное время, да еще и их скорость просто невозможно, так как количество факторов опять же будет очень велико. Переход к вероятностным моделям, к сожалению, сейчас также далеко не всегда возможен, как уже отмечалось выше на примере задержки транспортных средств, на регулируемом перекрестке.

Такие же проблемы возникают и со многими другими элементами транспортных систем или внешней среды, не только с транспортной сетью.

2. Простота математического аппарата.

При исследовании социально-экономических систем редко используются модели с дифференциальными или интегральными уравнениями. Причина та же – отсутствие четких границ системы, то есть зависимость характеристик элементов от очень большого количества факторов.

Точный математический аппарат применяется для описания элементов, состоящих из большого количества малозначимых в отдельности элементов. Так, для описания транспортного потока используются дифференциальные уравнения первого порядка. Для формирования матрицы корреспонденций или расчета потоков пассажиров используются энтропийные модели.

Но и этих случаях математический аппарат весьма прост. Кроме того, использование этих моделей носит здесь только описательный характер и никак не отражает причинно-следственные связи, которыми обусловлено поведение объектов. Еще одним недостатком такого моделирования являются условия их создания в обширной системе допущений, не всегда выдерживающей критики, даже при достаточно строгой системе ограничений.

Это положение обусловлено наличием активного элемента – человека в таких системах. Характер и темперамент одного человека, возможно, и поддается описанию, но это вовсе не значит, что можно точно спрогнозировать поведение индивидуума в какой-то конкретной, даже повторяющейся, ситуации, не говоря уже о новых условиях. А для моделирования поведения всего транспортного потока с помощью аналитического инструментария, необходимо сделать допущение о полной зависимости поведения водителей в транспортном потоке от поведения других участников движения. Такое допущение вряд ли может считаться до конца справедливым даже в очень плотном потоке.

Поэтому, и в силу математической сложности даже внешне простых вопросов, использование точных математических методов крайне ограничено при рассмотрении социально-экономических систем. Поэтому здесь очень часто используется аппарат математической статистики, который позволяет получить

внешнее описание характеристик элементов или зависимостей между ними, без объяснения причин такой связи. Полная модель системы обязательно включает в себя аналитические модели принятия решений – её каркас, но основная сложность состоит не столько в виде связей между элементами, сколько в их количестве.

Повышение точности результатов исследования достигается как за счет углубления структуры системы, то есть разбиения её элементов на составные части, так и за счет расширения границ системы. Однако оба этих метода приводят не столько к усложнению инструмента моделирования, сколько к усложнению самой модели из-за увеличения её размеров.

3. Сложность, чаще невозможность, проведения эксперимента в чистых условиях.

Под чистыми условиями понимаются такие условия эксперимента, которые в точности соответствуют условиям эксплуатации объекта.

Проведение экспериментов с социально-экономическими системами в таких условиях практически невозможно, так как воспроизвести условия функционирования объекта слишком сложно из-за большого окружения системы.

Второй причиной является нестабильность структуры элементов системы или внешней среды. Она приводит к тому, что за время сбора исходной информации, моделирования, принятия решения и постановки эксперимента, условия функционирования объекта в общем случае изменяются. Также они изменяются и за промежуток времени от проведения эксперимента, до реализации управленческих воздействий, а он может быть весьма продолжительным.

Кроме того задачи, решаемые с социально-экономическими системами, обычно носят такой характер, что проведение эксперимента является очень дорогим процессом, даже по сравнению с краш-тестом для автомобилей. Дело в том, что кибернетический характер таких систем требует очень продолжительных экспериментов для установления действительных характеристик объектов.

И есть еще одно ограничение на проведение экспериментов – участие в

социально-экономических системах людей. Эксперимент может негативно отразиться на большом количестве людей, и отрицательные последствия могут быть слишком серьезными, для того чтобы нашлись смелые управленцы, готовые рисковать, проводя эксперимент.

В настоящее время, для проведения экспериментов с транспортными системами и проверки эффективности принятых управляющих воздействий, часто используются имитационные модели объектов управления. Основное распространение они получили при решении вопросов организации дорожного движения и логистических процессов. И этот способ, безусловно, является очень перспективным, поскольку позволяет получить общее представление о последствиях реализации управляющих воздействий, хотя и не лишён ряда недостатков, описанных выше, и не всегда может гарантировать полное соответствие результатов имитации реальному процессу.

Несмотря на все сложности, реальные эксперименты в этой области всё же проводились и, возможно, будут проводиться ещё, например, с частью системы и когда последствия эксперимента не отражаются на большом количестве людей, не имеющих непосредственного отношения к инициаторам системного исследования. Однако в общем случае, при исследовании социально-экономических систем натурный эксперимент не является столь же эффективным инструментом как в случае традиционных задач. С одной стороны он дает меньше положительных результатов, с другой – требует больших затрат времени и ресурсов на его проведение. Поэтому обычно процесс исследования заканчивается непосредственным преобразованием результатов моделирования в управляющие воздействия.

Эти три ключевых различия между традиционными и социально-экономическими задачами обусловили значительно меньшую скорость развития транспортной науки, по сравнению с её техническими аналогами. Да и понимание этих различий пришло далеко не сразу. Если начало активного использования системного подхода приходится на середину пятидесятых, то раз-

витие системного анализа начинается только в шестидесятых. И эти периоды практически совпадают с периодами развития транспортной науки, и это даёт основания полагать, что транспортные проблемы стали одной из причин выделения системного анализа из системного подхода. В самом процессе возникновения системного анализа различаются три фазы.

1. *Попытки применения математического аппарата для решения всех задач, возникающих в социально-экономической сфере (неудача).*

Успешное развитие математических методов исследования операций, линейного программирования, матричной алгебры, теории вероятностей и многих других математических методов, вместе с возникновением и развитием компьютерной вычислительной техники, на начальных этапах исследований создал иллюзию возможности скорого решения основных задач в социально-экономической сфере на высоком уровне. Считалось, что большая часть математических методов для такого решения уже имеется или скоро будет создана. Осталось только построить достаточно мощную вычислительную технику, соответствующее программное обеспечение и все задачи будут решены.

Впрочем, в то время и в естественных и технических науках делались громкие заявления, такие, например, как возможность получения термоядерной энергии в ближайшие десятилетия.

Но действительность оказалась гораздо сложнее. Факты не подтверждают полностью ни одну глобальную социально-экономическую теорию. Решение многих управленческих задач откладывалось на более поздний срок из-за их сложности и отсутствия соответствующего логического и математического аппарата. Как только в объекте возникал человек, сложности исследования вырастали, как снежный ком и готового к внедрению решения найти не удавалось. Да и математические возможности исследования оказались далеко не безграничными и быстро закончились после первых успехов. Вряд ли кто-то из исследователей транспорта мог себе представить, что эмпирическая формула задержки транспортных средств на регулируемом перекрёстке Вебстера, полу-

ченная с помощью первых ЭВМ, возможности которых, не идут ни в какое сравнение даже с самыми простыми смартфонами, просуществует в качестве основной до 20-х лет 21-го века.

Но это вовсе не означает, что прогресса в социально-экономической сфере нет, и не будет. Просто сложность социальных задач приводит к тому, что методом принятия решений в этой сфере до сих пор зачастую является экспертный (субъективный) подход, а часто используемым инструментом исследования – метод проб и ошибок. А прогресс в этой сфере дается очень большими усилиями. Явные неудачи обширного использования научных методов в социально-экономической сфере привели к пониманию, что ставка исключительно на вычислительную технику и быстрое развитие математических методов себя не оправдывает и необходимо найти другой путь к решению этих задач. Первым шагом на этом пути стало ограничение области применения математических методов, что сразу же дало позитивные результаты.

2. Успешное использование математических методов для решения отдельных, чаще технологических задач в социально-экономической сфере.

Математические методы, разработанные к середине шестидесятых, позволяли решать большое количество задач, многие из которых кажутся теперь очень простыми. Но в то время поиск кратчайших вариантов пути передвижения, решение задачи линейного программирования, транспортной задачи или составления рациональных развозных маршрутов были еще относительно новыми проблемами.

В этой сфере были достигнуты заметные успехи. И этот этап можно считать началом выделения системного анализа из системного подхода, в ходе которого пришло понимание сложности решения социально экономических задач, за которым последовало понимание необходимости применения специальных методов работы с такими объектами. Третий этап уже полностью соответствует системному анализу.

3. Анализ сферы и условия применения тех или иных эконометрических ме-

тодов и моделей в процессе принятия решений.

Естественно, что достижения в области вычислительной техники позволяют многого достичь. Но и возлагать надежды только на нее нельзя.

Например, в сфере пассажирского транспорта до сих пор в полной мере не решена задача составления рациональных маршрутов городского транспорта. И это несмотря на то, что первые методы маршрутизации с использованием ЭВМ относятся к началу шестидесятых, а уровень вычислительной техники за это время вырос колоссально. Тоже можно сказать и о задаче поиска оптимальных развозных маршрутов или задачах в сфере организации дорожного движения. Техника значительно продвинулась вперед, а вот уровень решения транспортных задач поднялся совсем немного, если сравнивать его с изменениями в технических системах. Просто посмотрите, как с 60-х годов прошлого века изменились автомобили, или телефоны, например!

В то же время, с помощью системного анализа всё-таки решаются весьма сложные задачи. И большинство современных течений в транспортной науке основано именно на нем. В частности, логистика является одним из вариантов системного анализа, с более широкими границами системы по сравнению со стандартным вариантом исследования.

Основная отличительная черта системного анализа – отсутствие строгих указаний к постановке задачи и моделированию объекта исследования. В системном анализе документированной является только последовательность его проведения. Но и она имеет много разных вариантов, обусловленных различным авторством, целями и свойствами объекта исследования. Рассмотрим один из таких вариантов.

Этапы выполнения системного анализа.

1. *Определение цели функционирования системы и целей функционирования отдельных её подсистем.*

Этот этап в настоящее время еще недостаточно формализован, однако несколько ниже в монографии будут указаны возможности для его формализа-

ции. В данном разделе будет только подчеркнута важность правильного определения цели, под которым понимается соответствие её представления в исследовании действительным целям существования и функционирования объекта исследования.

Метод решения задачи может и не гарантировать получения оптимального результата, что не очень хорошо, но и не очень страшно при правильно выбранной цели. Все равно будет получено решение как минимум не худшее, чем существующий вариант, а в большинстве случаев, превосходящее его. Иными словами будет получен рациональный вариант решения.

Если цель поставлена неверно, то последствия решения такой задачи при мощном математическом аппарате будут резко отрицательными, а при невысокой мощности математического аппарата будут несколько хуже существующего варианта.

Эта ситуация иллюстрируется рисунком 1.9 и таблицей 1.1.

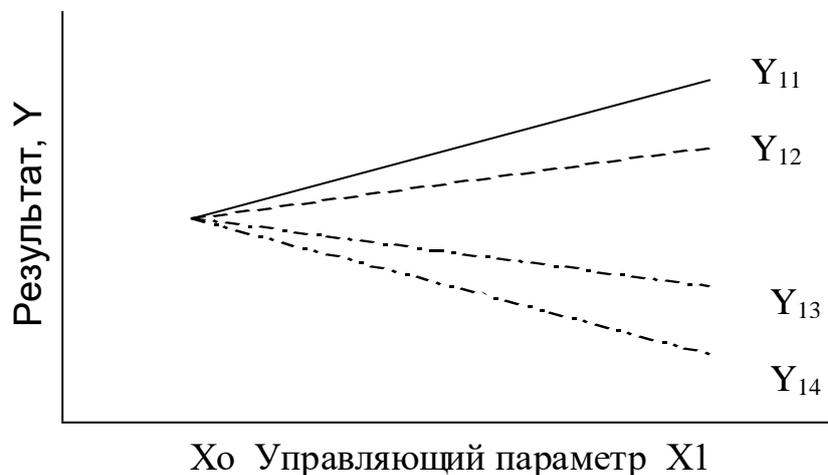


Рисунок 1.9

Показатель Y представляет собой оценочный показатель для действительной цели системы, X — управляющий параметр. Возможные результаты описаны в таблице 1.1.

Примером неправильно поставленной цели может служить минимизация затрат на перевозку пассажиров в городе при решении задачи маршрутизации.

Таблица 1.1 – Последствия выбора

Описание варианта		Выбор цели	
		Верный	Неверный
Уровень математического аппарата	Высокий	Y_{11}	Y_{14}
	Низкий	Y_{12}	Y_{13}

Неверность такой цели заключается в том, что при отсутствии системы ограничений решение приведет к закрытию всех маршрутов. В этой постановке задачи вместо цели функционирования системы на первое место по значимости вышла система ограничений. Если ограничить возможные альтернативы только вариантами, при которых все запросы на передвижения удовлетворяются, то более или менее приемлемое решение может быть получено. Но насколько оно лучше существующего варианта, и лучше ли вообще, решить сложно.

Несомненно, система ограничений является неотъемлемой частью любого исследования, в том числе и системного. Но она не может подменять собой цель, ограничения играют основную роль при выполнении других этапов системного анализа.

2. Определение множества альтернатив для достижения поставленной цели.

При решении большинства задач с транспортными системами классические методы математической оптимизации не могут применяться. Имеются в виду такие методы, как поиск общего или частного экстремума, метод ветвей и границ, градиентного спуска и так далее.

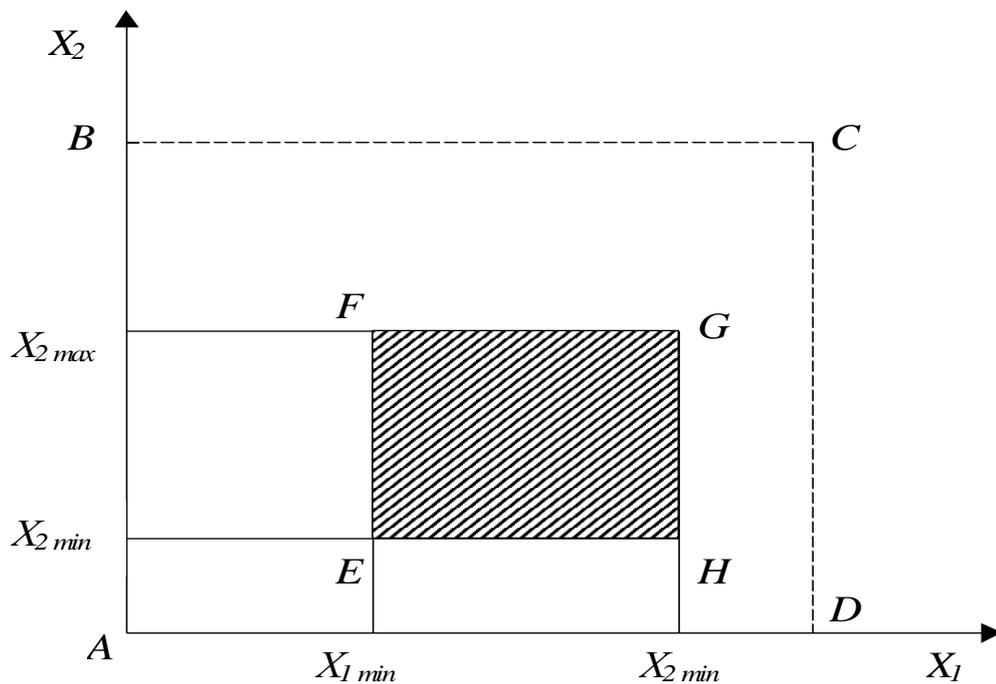
Невозможность их применения объясняется сложной структурой связей между элементами, которая не позволяет привести задачу в соответствие с требованиями этих методов. Стремление к приспособлению проблемы под известный математический аппарат, для получения решения, часто заканчивается слишком грубой системой допущений, сводящей на нет все положительные результаты исследования.

В таких условиях основным методом получения оптимального результата является полный перебор всех возможных состояний системы или, иначе говоря, всех альтернатив.

Поэтому правильный выбор множества альтернатив также во многом определяет успех в решении задачи.

На рисунке 1.10 прямоугольник $ABCD$ ограничивает все множество допустимых решений для двух управляющих параметров X_1 и X_2 . Для каждого из них приняты нижние и верхние пределы изменения при исследовании. Прямоугольник $EFGH$ ограничивает множество альтернатив для достижения цели.

Если допустить, что оптимальное решение с равной вероятностью может находиться в любой точке из $ABCD$, то вероятность получения оптимального результата Y_{opt} при выборе набора альтернатив $EFGH$ пропорциональна его площади.



$X_{i \min}, X_{i \max}$ - пределы изменения i -го параметра в исследовании

Рисунок 1.10

$$P_{Y_{opt}} = \frac{S_{EFGH}}{S_{ABCD}}, \quad (1.3)$$

где $P_{Y_{opt}}$ – вероятность получения оптимального решения; S_{EFGH} , S_{ABCD} – площадь прямоугольников, ограничивающих множество альтернатив в исследовании и все допустимое множество решений соответственно.

Если множество альтернатив слишком узкое, то и вероятность попадания в него оптимального решения невелика. Если множество альтернатив слишком широкое, то просмотреть все варианты часто бывает просто невозможно, несмотря на высокие мощности ЭВМ. Повысить вероятность попадания оптимального решения во множество альтернатив можно, получив хотя бы общее представление о характере влияния управляющих параметров на критерий эффективности объекта исследования.

Это только общие требования к выбору альтернатив. Более детальную информацию дать сложно. Но в самом простом варианте, когда не учитывается ограничение по вычислительной мощности компьютеров, выбор множества альтернатив сводится к созданию системы ограничений при решении задачи.

Выше уже рассматривался пример с автобусным маршрутом, для которого определялось количество возможных вариантов состояния. В этом примере активным элементом системы был только подвижной состав. Система ограничений определялась на основе свойств объекта и ресурсных ограничений. С одной стороны количество автобусов на маршруте не может быть отрицательным или нулевым, так как маршрута в этом случае просто не будет. С другой стороны максимальное количество автобусов определялось их наличием в транспортном предприятии.

В общем случае система ограничений может быть построена аналогичным образом. Для каждого активного элемента должны быть определены возможные пределы изменения его состояния, то есть минимальное и максимальное значение параметра. При нескольких параметрах такие действия должны

быть выполнены для каждого параметра.

Для случая, когда параметр носит дискретный характер количество вариантов для элемента после этого уже определено. Если параметр является непрерывной величиной, то необходимо определиться с желаемой или возможной точностью его рассмотрения и задать шаг изменения.

Общее количество альтернатив N_a будет рассчитываться как произведение количества вариантов состояния для каждого активного элемента системы.

$$N_a = \prod_i^{N_e} n_{ei}, \quad (1.4)$$

где N_e – количество активных элементов в системе; n_{ei} – количество вариантов состояния i -го элемента системы.

Этот простой подход позволяет достаточно легко сформировать множество альтернатив для достижения цели.

Под активным (управляемым) элементом понимается тот элемент системы, который может непосредственно изменять свои параметры в процессе исследования.

Иными словами активные элементы являются инструментами в руках исследователя, и они же будут инструментам реализации управляющих воздействий.

С этой точки зрения пассивные элементы системы – это элементы, изменяющие свое состояние в процессе исследования в результате воздействия на них активных элементов.

Например, при определении оптимальных параметров светофорного регулирования, вид цикла, его продолжительность и удельное содержание отдельных фаз являются активными элементами. Пассивным элементом может быть количество автомобилей, скапливающихся в очереди перед светофором за время запрещающего сигнала.

Но существуют и сложности, о которых желательно иметь представление при формировании системы ограничений.

В некоторых случаях существуют зависимость количества вариантов состояния одного элемента системы, от состояния другого. Например, грузоподъемность автомобиля не может быть меньше грузоподъемности ковша экскаватора, а ограничения с учетом динамической нагрузки еще жестче. Дополнительные ограничения выдвигает внешняя среда, да и общее количество альтернатив вовсе не обязательно определяется произведением.

3. Моделирование системы.

Особенности социально-экономических объектов и развитие системного анализа, рассмотренные выше, диктуют необходимость очень внимательного подхода к моделированию объекта, иначе решение задачи не принесет результата, пригодного к использованию.

Такой подход выражается в последовательности действий от постановки задачи моделирования в социально-экономической сфере до выбора конкретной модели и метода её решения.

Порядок моделирования в системном анализе.

3.1. Определение цели моделирования.

3.2. Выделение области определения задачи.

3.3. Определение класса задачи (например, линейная или нелинейная).

3.4. Выбор класса применяемых методов и моделей.

3.5. Выбор конкретной модели.

Приведенный порядок моделирования в большей степени относится к научному исследованию, чем к инженерной работе. Поэтому он будет рассмотрен в несколько упрощенном варианте.

Для этого, прежде всего, рассмотрим возможные варианты моделирования.

Самая общая классификация моделей выделяет два их типа – физические и математические.

Физические модели представляют собой широкий диапазон средств отражения свойств исследуемого объекта. Существуют, например, натурные модели, максимальным образом отражающие форму моделируемого объекта, например уменьшенная копия автомобиля. Но в системном анализе, физические модели представлены в основном аналоговыми моделями, основанными на допущениях о сходстве процессов исследуемого объекта и модели. Так, для моделирования распределения транспортных потоков на начальных этапах исследований использовались гидравлические и электрические аналоговые модели. При этом делалось допущение о соответствии процессов распределения транспортных потоков с процессами распределения потоков электричества по проводникам или жидкости по трубам. Недостатков у такого способа моделирования социально-экономических объектов много, в первую очередь они дороги и не очень точны.

Невысокая точность аналоговых моделей, это их общая проблема, вызванная наличием допущений об аналогии процессов происходящих в объекте и физической модели. Дело в том, что характер процессов, происходящих с социально-экономическими системами, определяется активным участием в них человека. Любая же аналоговая модель будет представлять эти процессы с помощью физических объектов, которые не имеют никакого отношения к сознанию. Чтобы допущение об аналогии было корректно, количество элементов (людей) в системе должно быть таким, которое позволяет пренебречь их сознательностью. Но даже все население Земли не скоро подойдет к подобным размерностям при сохранении тенденций своего роста, не говоря уже о каких-то, сравнительно небольших, относительно ограниченных объектах, выполняющих какие-то транспортные функции.

Вторым, менее существенным, недостатком аналоговых моделей является неудобство их использования. Они очень громоздки, дороги и недостаточно гибки для проведения с ними глубоких и разнообразных исследований социально-экономических объектов.

Эти особенности привели к тому, что в настоящее время от использования физического моделирования в системном анализе практически отказались и одним из отличительных признаков системного анализа служит преимущественное использование в нем методов математического моделирования.

И даже аналоговые модели с развитием вычислительной техники, становятся математическими. В настоящее время уже существует большое количество компьютерных программ – симуляторов электрических сетей, которые позволяют исследовать их характеристики, не создавая материального объекта. Это значительно удешевляет процесс аналогового моделирования транспортных систем, но не преодолевает второго его недостатка – низкой точности моделирования, обусловленного грубостью допущений об аналогиях движения потоков в транспортных и электрических цепях.

Представить разницу между математическим и физическим моделированием поможет самый простой пример.

Поведение упругого тела может быть представлено или физической моделью – пружиной, или математической моделью. Для данного случая математической моделью является закон Гука: величина деформации пружины прямо пропорциональна прилагаемой нагрузке P_y :

$$P_y = E_y \cdot S_y, \quad (1.5)$$

где E_y – модуль упругости; S_y – относительная деформация пружины.

Закон Гука является одним из ярких примеров аналитических моделей, но в системном анализе используются все три вида моделирования, приведенные выше. Математические модели могут описывать взаимосвязи между самыми разными показателями, иметь гораздо более сложный вид, чем (1.5), представлять собой не одну зависимость, а целый вычислительный алгоритм.

Создание модели в системном анализе должно быть подчинено одной цели – в конечном счете, она должна позволять определять значение критерия

оптимизации при разных состояниях объекта исследования.

Перед созданием математической модели вначале необходимо определить условия функционирования объекта и сформулировать соответствующие ограничения. Чтобы подчеркнуть важность задания условий функционирования, можно вернуться к примеру, в котором поведение упругого тела, пусть это будет пружина, моделируется законом Гука. Для заданного тела модуль упругости считается постоянным. Этот закон настолько известен, что его достоверность не вызывает никакого сомнения.

Однако, он верен далеко не всегда. Можно представить, что случится, если пружину разогревать до температуры плавления материала, из которого она сделана. Будет ли теперь величина деформации пропорциональна нагрузке? Вряд ли, ведь пружина вначале перестанет быть упругой, а затем вообще потеряет форму и станет жидкой. Модель больше не соответствует поведению объекта. То же самое несоответствие будет наблюдаться и при охлаждении пружины до сверхнизких температур, когда она также потеряет свойства упругости, и любая деформация будет приводить к её разрушению.

Предположим, что модель должна быть несколько шире и что модуль упругости для тела является функцией от его температуры t . Тогда общий вид закона Гука изменится за счет появления дополнительного фактора. Конкретная зависимость здесь не приводится, запишем лишь в общем виде:

$$P_y = f(E_y, S_y, t). \quad (1.6)$$

В данном случае ввод дополнительной переменной уточнит модель, расширит её возможности. Однако у этого действия существует побочный результат – необходимость исследования зависимости между E_y и t .

Существует и другой путь. Если условия задачи, то есть условия эксплуатации пружины, характеризуемые минимальной t_{min} и максимальной t_{max} температурой, относительно стабильны и далеки от крайних значений температуры,

то можно оговорить это в соответствующих ограничениях и сделать допущение о постоянстве модуля упругости для заданных условий.

$$E_y = \text{const}, \text{ при } t_{\min} < t < t_{\max}. \quad (1.7)$$

Снова получен закон Гука. Если разница между t_{\min} и t_{\max} относительно невелика, то принятое допущение вообще никак не отразится на результатах моделирования при известной точности вычислений.

Такая методика формирования математических моделей позволяет исследователю четко представлять результаты моделирования и избегать ошибок, вызванных нечеткой системой ограничений и допущений.

Не все проблемы моделирования могут быть решены на стадии формирования ограничений и допущений. Причиной возникновения ошибок может стать пропуск в модели одного или нескольких факторов, от которых реально зависит исследуемый параметр. Для устранения подобной ошибки в общем случае необходимо рассматривать бесконечное множество факторов. Так как это в принципе невозможно, то избежать ошибок по этой причине на все сто процентов вряд ли удастся. Поэтому нужно лишь иметь представление об этой опасности и пытаться сократить её возможные отрицательные последствия.

В заключение описания третьего этапа системного анализа приводятся примеры математических моделей из области транспортных систем.

Взаимодействие между автомобилем и постом погрузки может быть описано зависимостью времени погрузки от различных факторов.

Самый простой вариант:

$$t = \text{const} . \quad (1.8)$$

Здесь константа может быть либо нормативом, либо средним временем погрузки по результатам обследования, либо результатом чётко организован-

ного, возможно автоматизированного процесса погрузки, всегда происходящего в одних условиях, например – загрузка автосамосвалов одинаковой грузоподъемности навалочным грузом из бункера.

Но можно составить более сложный и, возможно, более точный вариант модели:

$$t = \text{const} + t_1 \cdot n_2, \quad (1.9)$$

где t_1 – время погрузки единицы груза; n_2 – количество единиц груза.

В данном случае и константа, и величина t_1 могут быть определены по результатам обследования или каким-то другим образом.

Возможно описание этого взаимодействия другими моделями, с другим набором факторов в правой части. Но ведь взаимодействие между погрузочным механизмом и автомобилем заключается еще и в динамической нагрузке на автомобиль. Что описывать в модели, а что нет, определяется постановкой задачи и целями, которые преследуются исследованием. Если показатель никоим образом не отражается на значении критерия эффективности системы, он не нужен в модели.

Теперь обратим внимание на то, что две разные модели могут описывать один и тот же фактор. Определение или задание условий функционирования объекта исследования здесь рассматриваться не будет, это относительно простой процесс. Рассмотрим лишь процесс формирования моделей, когда условия функционирования объекта уже заданы.

Первая модель (1.8) была результатом очень грубого допущения – для заданных условий время погрузки не зависит ни от каких факторов. Эта формула может быть верной при очень жестком ограничении, когда используются автомобили одной вместимости, отсутствуют непроизводительные простои автомобилей. Тогда колебания фактических значений времени погрузки будут малы настолько, что ими можно пренебречь. При несоответствии заданных усло-

вий функционирования этим ограничениям, модель необходимо уточнить.

Вторая модель (1.8) основана на более корректном допущении о постоянстве времени погрузки одной единицы груза. Но возможно и эта модель окажется недостаточно точной после сравнения фактических данных и расчетных значений. Тогда в модели необходимо учесть дополнительные факторы или более глубоко структурировать объект исследования. Например, представить общее время погрузки в виде суммы времени ожидания погрузки, времени оформления документов и так далее. То есть порядок действий тот же, что и выше. Определены условия функционирования и рассматривается корректность допущений для них. Допущения рассматриваются от самых грубых, до более мягких. Как только допущение признается достаточно корректным, определяется конкретный вид модели.

Такие действия выполняются для всех пар элементов, то есть для каждого взаимодействия внутри системы и каждой реакции элементов системы на воздействия внешней среды.

4. Поиск оптимального варианта управления с помощью полученной модели.

Если исследование подошло к этому этапу, то уже сформулирована его цель, имеется система ограничений, определено множество альтернатив для достижения цели, разработана математическая модель системы, позволяющая для каждого варианта её состояния определить значение целевой функции.

Теперь для получения решения необходимо просмотреть все возможные состояния системы и выбрать то из них, при котором целевая функция имеет наилучшее значение. Если таких вариантов несколько, окончательное решение выбирается с привлечением дополнительных данных. Это могут быть неучтенные факторы, близость какого-то показателя к критическим значениям и так далее.

Полученное решение представляет собой набор параметров состояния активных элементов системы. Оптимальный вариант управления реализуется через достижение полученных параметров.

Конечно, пересмотр всех вариантов состояния системы не обязателен, если модель настолько проста, что для выбора решения возможно применение методов математической оптимизации. Кроме того, перебор всех вариантов состояния системы может быть практически невыполнимым.

Поэтому в транспортных исследованиях часто применяются **эвристические алгоритмы**, которые не дают гарантии получения оптимального решения, но позволяют получить решение, лучшее чем существующий вариант, то есть рациональное. Эвристические алгоритмы основаны на таких путях поиска рационального варианта, которые представляются их автору самыми разумными. Количество просматриваемых вариантов при этом резко сокращается, правда и глобальный оптимум может оказаться за пределами рассматриваемого набора состояний.

Если цель была выбрана верно, ограничения реальны, допущения корректны, модель точна, то и решение приведет к положительным, то есть эффективным, результатам, хотя и не обязательно оптимальным.

Приведенная последовательность операций является одним из наиболее простых и понятных вариантов исследования в рамках системного анализа. Но существуют различия не только в количестве операций исследования, но и в последовательности их выполнения.

В системном анализе любой объект может быть рассмотрен с самых разных позиций. Чаще всего выделяют макро и микроподходы, рис. 1.11.

В рамках первого подхода исследуемый объект рассматривается как нечто целое. Свойства объекта считаются постоянными, и изучаются только его взаимосвязи с другими объектами такого же уровня. Если описывать этот вариант в системных терминах, то в виде системы здесь представляется не сам объект исследования, а его внешняя среда. Сам объект изучается как элемент такой системы.

При реализации микроподхода в виде системы представляется исследуемый объект. Его свойства определяются свойствами и взаимодействием эле-

го процесса, рационального использования ресурсов (микрподход).

Примеры задач, которые могут решаться в рамках данного подхода – составление различных технологических планов, выбор техники и технологии для выполнения транспортной работы.

Более конкретные примеры:

- снижение затрат на перевозку какого-либо вида груза;
- совершенствование организации дорожного движения на фрагменте улично-дорожной сети (УДС);
- повышение скорости доставки узлов и агрегатов на завод;
- совершенствование работы цепи поставки какого-то товара;
- организация перевозки пассажиров в городе;
- организация междугородного маршрута и так далее.

3. Анализ отдельных процессов внутри небольших транспортных объектов.

Чаще всего к третьему виду анализа относятся задачи невысокой сложности, возникающие в простых транспортных объектах. Например, расчет расписания на автобусном маршруте, параметров светофорного регулирования на перекрестке и так далее. Разница между вопросами, рассматриваемыми в рамках второго подхода и этими задачами, состоит скорее в отсутствии большого разнообразия вариантов решения последних и понятном списке элементов, составляющем соответствующую систему. Здесь обычно имеются конкретные и относительно простые методики решения, не возникает проблем с определением цели исследования, границ системы и используемых моделей.

Кроме того, сюда относятся задачи рационального использования отдельных транспортных средств, только часть которых можно отнести к общепринятому кругу задач по созданию и совершенствованию транспортных систем. Это задачи организации разовой перевозки обычных грузов, организации ремонта, технического обслуживания, выпуска подвижного состава.

Различия между вторым и третьим видом системного анализа во многом

условны, так как граница между большими и небольшими транспортными объектами не может быть четкой.

Существует очевидная связь между видами системного анализа и уровнями планирования работы транспортных объектов, поскольку степень детализации при рассмотрении объектов определяет и степень точности результатов решения. Более подробное рассмотрение объекта позволяет получить более конкретные указания и приблизить по времени их реализацию. Подробнее эта связь будет рассмотрена позднее.

Как подчеркивалось выше, основным инструментом исследования в системном анализе является математическое моделирование. Существует большое количество направлений моделирования. В системном анализе распространение получили только некоторые из них.

Модели каждого из этих направлений могут быть использованы в каком-либо из двух случаев:

при характеристике внешней среды;

при описании взаимодействия между элементами внутри системы.

Есть еще и критерий эффективности системы, но вопросы его формирования рассматриваются отдельно. Поэтому для каждого из направлений будут указываться возможности использования только для двух случаев.

Приведенное ниже описание во многом перекликается с выбором метода моделирования системы из подраздела 1.3, но здесь используется специфическая терминология, характерная для системных исследований, и методы характеризуются несколько с иных позиций, поэтому есть смысл их повторить

Направления использования математического аппарата в системном анализе.

1. Прогностическое направление (регрессивные модели, тренды).

Самый простой вариант моделирования в системном анализе, аналог статистических моделей в предшествующем материале. Модели получают на основе набора известных статистических данных, после обработки методами ма-

тематической статистики. Использоваться такие модели могут на любом этапе исследования.

Основной их недостаток состоит в том, что они не раскрывают внутренних причин существования тех или иных взаимосвязей. Второй недостаток – учёт случайного характера связей между объектами только на уровне оценки качества модели. Если модель принята к рассмотрению, то её использование всегда будет давать один результат при подстановке тех же исходных данных. Впрочем, можно определить доверительный интервал, в который искомое значение результата будет попадать с определенной вероятностью.

Модели прогностического направления могут быть использованы в обоих случаях, как при характеристике внешней среды, так и при описании взаимодействия между элементами внутри системы. Но при моделировании взаимосвязей между элементами предпочтительней выглядят модели принятия решений.

2. *Модели принятия решений* (детерминированные зависимости, теория вероятностей, теория игр).

Здесь характеристики взаимосвязей между различными элементами описываются с помощью детерминированных (аналитических) моделей. Для них характерна попытка определения функциональных связей между элементами. Для транспортных объектов примеров моделей принятия решений также существует много. Здесь можно привести зависимость для определения средней дальности поездки пассажиров на i -м маршруте \bar{l}_i .

$$\bar{l}_i = P_i / Q_i, \quad (1.10)$$

где P_i , Q_i – соответственно транспортная работа и объём перевозок на i -м маршруте.

В данном случае средняя дальность поездки пассажира является одной из

характеристик спроса на перевозки. Модель всегда будет верна, так как она соответствует определению этого показателя.

Для этих моделей также характерна жесткая связь между исходными данными и результатом.

В системном анализе модели принятия решений основное применение получили в моделировании системы, то есть в описании взаимодействий между её элементами.

3. *Модели поведения* (имитационное моделирование).

Они являются одним из наиболее совершенных методов моделирования в случаях, когда поведение объекта зависит от очень большого количества факторов, влияние каждого из которых невелико и нельзя проследить достаточно четких тенденций изменения исследуемого параметра. В таких условиях модели прогностического направления требуют слишком много исходных данных. Кроме того, для данного случая их использование весьма затруднительно, так как для расчета конкретного значения искомого параметра требуется знание всех значений независимых переменных.

При использовании моделей поведения не делается попыток определения зависимостей между некоторыми элементами, вместо этого поведение объекта описывается как случайное. Основной характеристикой случайной величины является закон распределения. Поэтому на основании наблюдений устанавливается соответствие случайной величины какой-либо функции распределения. Подобных случайных величин в модели может быть несколько. Остальные связи описываются моделями другого направления.

Для определения оптимального состояния системы проводится большое количество численных экспериментов, в которых значения случайных величин принимаются в соответствии с их функциями распределения. В общем случае каждый расчет приводит к различным результатам, но на основании результатов можно определить взаимосвязь между параметрами на входе в модель и на её выходе. Конкретные указания к действию получают после дополнительной

обработки результатов.

Описание поведения элемента с помощью моделей поведения применяется исключительно при характеристике элементов внешней среды.

4. *Автоматизированные системы управления (ЭВМ + человек).*

Эти модели резко отличаются от всех предыдущих, поскольку сразу представляют собой действующую и относительно полную модель объекта исследования, которая может быть использована для совершенствования методов управления им. Поэтому такие модели сложно отнести к какому-то одному варианту использования.

Модели всех предыдущих направлений позволяют формализовать процесс, то есть описать поведение объектов какими-то математическими зависимостями. Процесс формализации поведения объекта исследования может оказаться практически невыполнимым из-за его сложности. А решения принимать нужно. Поэтому еще одним инструментом исследования и одновременно выработки управляющих воздействий служат автоматизированные системы управления.

Основное направление использования АСУ – контроль над ходом работы и выработка управляющих воздействий. Возможность исследования поведения объектов является попутным результатом их функционирования. Автоматизация здесь обычно заключается в сборе исходной информации для выработки управляющих воздействий и расчете параметров функционирования системы.

Так как процесс формализации в большинстве АСУ, скорее всего не может претендовать на полную завершенность, то возможно возникновение нештатных ситуаций, когда оператор должен принимать волевые управленческие решения. В этих случаях поведение объекта фиксируется средствами сбора информации АСУ. В результате достаточно продолжительных наблюдений можно установить взаимосвязь между параметрами, характеризующими поведение объекта, и управляющими воздействиями.

ТЕМА 2. ПОРЯДОК ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

2.1 Порядок исследования транспортных систем

Общие положения системного подхода и системного анализа транспортных объектов, которые были изложены в первом разделе, позволяют сформировать достаточно четкий порядок исследования или принятия управленческих решений при рассмотрении транспортных объектов.

Выполнение этих этапов позволяет в значительной мере формализовать процесс исследования транспортных объектов.

В данном разделе приводятся только основные аспекты выполнения каждого из этапов. При наличии общепринятого аппарата выполнения этапов, этот аппарат будет рассматриваться в следующих разделах.

1-й этап. *Выбор цели функционирования объекта и формирование критерия эффективности системы.*

2-й этап. *Определение границ системы.*

3-й этап. *Формирование структуры внешней среды.*

4-й этап. *Изучение внутренней структуры транспортной системы и определение составляющих её элементов.*

5-й этап. *Нахождение зависимостей, характеризующих взаимосвязи между элементами и создание математической модели поведения системы.*

6-й этап. *Поиск с помощью полученной модели, оптимального или рационального состояния системы.*

7-й этап. *Выработка управляющих воздействий, направленных на достижение оптимального состояния системы.*

2.1.1 Выбор цели функционирования и формирование критерия эффективности системы

Важность правильного выполнения этого этапа была подчеркнута в первом разделе. В то же время сейчас он всё ещё является и одним из наиболее сложных этапов, так как не до конца формализован и требует для своего выполнения определенных творческих усилий и навыков.

Обычно в рамках этого этапа системного исследования выделяются два вопроса – *вербальное описание цели* как общего направления исследования; и формализация цели, то есть её *представление в виде критерия эффективности системы*.

Примерами результатов вербального описания цели могут служить такие формулировки, как "целью объекта является получение максимальной прибыли" или "целью объекта является сокращение простоя транспортных средств на перекрестке".

Наиболее просто решение первого вопроса достигается на основании изучения той роли, которую исследуемый объект играет в системе более высокого уровня. Например, автобусный маршрут является частью транспортного предприятия, соответственно и цель его функционирования может быть определена исходя из задач транспортного предприятия. Однако здесь существуют сложности, так как этот же автобусный маршрут является еще и элементом транспортной системы города, и его цели могут определяться задачами этой системы. Поэтому выбор системы более высокого уровня во многом определяет цель исследования.

Подобная неоднозначность приводит к появлению большого числа критериев эффективности при решении одних и тех же задач. Такая ситуация вполне естественна, так как существование разных объектов исследования и разнообразных условий их функционирования, обуславливает существование различных постановок задачи.

Однако для схожих объектов, в одной и той же постановке задачи, при

известной системе более высокого уровня, правильных критериев не может быть много. Тем не менее, продолжая рассмотрение маршрутной системы в качестве примера, можно заключить, что при решении одной и той же задачи маршрутизации, различными авторами использовались прямо противоположные критерии эффективности маршрутной системы городского пассажирского транспорта – от минимума затрат транспортных предприятий на организацию перевозок, до минимума времени передвижения пассажиров. Поэтому необходимо определить, на что нужно ориентироваться исследователю при выборе направления повышения эффективности объекта исследования.

Даже если вербальное описание цели завершено, это не означает преодоления всех сложностей данного этапа. Для того чтобы иметь возможность составления математической модели объекта, цель функционирования объекта необходимо представить в виде критерия эффективности, то есть формализовать. В приведенных выше примерах формализация не вызывает больших трудностей: $P \rightarrow \max$, для первого случая и $t_{np} \rightarrow \min$, для второго.

В то же время могут существовать показатели, характеризующие отдельные составляющие цели, которые с трудом поддаются формализации. В большей степени это относится к характеристикам качества обслуживания клиентуры транспортных систем. Причина – показатель качества в сфере потребления является комплексным и субъективным понятием. Чаще всего из всего списка составляющих качества выделяются основные, по мнению исследователя, и для них решается задача оптимизации.

Примером такого подхода из сферы городских пассажирских перевозок может служить представление качества перевозок временем передвижения. В сфере организации дорожного движения весь спектр качества движения часто представляется или временем поездок транспортных средств или уровнем аварийности. В зарубежной практике для фрагментов УДС часто используется критерий уровня обслуживания участников дорожного движения, основанный на их скорости. Эти варианты в какой-то степени представляют собой попытку

получения результата – критерия эффективности системы, при невозможности более полной формализации критерия, основываясь только на представлениях проектировщика, а не участников транспортного процесса об уровне работы объекта. Естественно, что в этом случае, результаты не всегда могут считаться достаточно обоснованными, так как не опираются на объективное отношение участников процесса к параметрам работы объекта, да и остальные составляющие качества в критерии никак не отражаются.

Однако попытки свести в один критерий различные составляющие, которые имеют разный физический смысл, приводят к вычислительным трудностям. Преодолению всех этих трудностей посвящены специальные методы формализации, рассматриваемые в следующем разделе. Его материал позволяет сделать этот процесс понятным и обеспечить правильное выполнение данного этапа системного исследования, при безошибочном соблюдении описанной процедуры выбора цели и её формализации в критерии эффективности.

2.1.2. Определение границ системы

Этот этап также формализован в недостаточной степени. Но если цель функционирования объекта определена, то можно корректно поставить задачу, решением которой будут границы системы.

Целью любого исследования или принятия решения является выбор варианта состояния объекта, обеспечивающего оптимальное (или рациональное) значение критерия эффективности в заданной системе ограничений.

$$\mathcal{E} \rightarrow \text{opt} . \quad (2.1)$$

Рациональным считается значение критерия, лучшее, чем некоторое его значение, принятое в качестве базы для сравнения. Чаще всего за базу сравнения принимается значение критерия, обеспечиваемое существующим на момент начала исследования вариантом объекта. С точки зрения выражения (2.1)

это означает, что при рационализации объекта направление изменения критерия сохраняется, просто не гарантируется получение наилучшего, в заданной системе ограничений результата. Поэтому, вне зависимости от того, какой вариант решения будет получен, рациональный или оптимальный, это не меняет вида выражения (2.1) и в дальнейшем для обозначения обоих процессов будет использоваться только один термин – оптимизация.

Что касается направления оптимизации, то их существует только 2 – минимум или максимум. Так как переход от одного направления к другому легко осуществляется с помощью изменения в критерии знака «+» на «-» и, наоборот, то без нарушения общности можно утверждать, что если существует (2.1), то его всегда можно представить в виде критерия (2.2), который будет в дальнейшем считаться основным.

$$\mathcal{E} \rightarrow \max . \quad (2.2)$$

При наличии критерия (2.2) возможно начинать решение оптимизационной задачи по поиску желаемого состояния объекта, решение которой требует определенных затрат. При этом известно, что чем большее количество состояний объекта рассматривается, тем больше вероятность получения решения с заданной эффективностью или тем более эффективное решение может быть найдено, если желаемый уровень эффективности не задан. Но тем больше и трудоемкость проведения исследования. Такое же утверждение будет справедливым и для количества взаимодействий между элементами, учитываемых в исследовании. Чем большее их количество учитывается, тем вероятнее получение эффективного решения.

Общее количество состояний объекта, как мы помним, определяется количеством активных элементов системы и набором возможных состояний каждого из них. Количество взаимодействий между элементами системы также во многом определяется длиной их списка.

Границы системы выделяют два класса объектов: элементы системы и элементы внешней среды. Или, иными словами, границы системы выделяют элементы системы из внешней среды, то есть определяют количество элементов в системе и её качественный состав при известном уровне детализации.

С учетом этого, можно в общем плане утверждать, что проведение границ системы с одной стороны отражается на эффективности объекта исследования, с другой стороны на затратах на достижение результатов исследования.

Теперь, если о характере обеих зависимостей сделать правдоподобные предположения, то можно получить общую закономерность, позволяющую определить оптимальное количество элементов системы, то есть сформировать её границу. Можно рассмотреть такую закономерность на самом простом примере транспортной системы, целью которой определен некий результат её функционирования R , имеющий стоимостное измерение. Тогда, с учётом общих затрат на исследование Z_u , критерий (2.2) приобретает следующий вид:

$$\mathcal{E} = R - Z_u \rightarrow \max . \quad (2.3)$$

В качестве рассматриваемого примера здесь принимается самое простое допущение, согласно которому включение любого элемента в систему приводит к одинаковым последствиям, то есть, зависит не от свойств конкретного элемента, а только от общего количества элементов в системе.

При этом, в соответствии с предположениями относительно сложности процесса исследования, сделанными в первом разделе, предполагается, что затраты на исследование будут прямо пропорциональны квадрату количества элементов в системе n_e :

$$Z_u = c \cdot n_e^2, \quad (2.4)$$

где c – удельные затраты на исследование, связанные с включением од-

ного элемента в систему (затраты на определение его параметров, взаимодействий и поиск желаемого решения).

Что касается эффективности системы, то здесь подобная, простейшая линейная или другая, не ограниченная сверху, зависимость вряд ли будет служить хорошим описанием действительности, что обусловлено ограниченным характером результатов работы реальных объектов. Это не строгое утверждение, а предположение, сформулированное в результате анализа многих критериев эффективности, которые применялись и применяются при исследовании транспортных систем.

Рассмотреть эти критерии можно на отдельных примерах.

Допустим, в качестве критерия эффективности при решении задачи совершенствования организации дорожного движения, принято количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на рассматриваемом фрагменте транспортной сети. Цель исследования – сокращение их количества, то есть чем меньше количество ДТП, тем выше эффективность системы. Для этого случая существует предельное значение критерия эффективности, равное нулю.

Предел, равный или больший нуля, имеется и для другого критерия в этой сфере – общего времени поездки автомобиля или отдельных составляющих времени поездки, например, времени задержки на перекрёстке.

Пределы также существуют и для критериев эффективности в сфере организации перевозок. Так, например, задача составления рациональных развозных маршрутов решается с целью минимизации пробега автомобилей. Естественно, что пробег автомобилей, при заданном объёме перевозок, не может быть меньше некоей величины, обусловленной условиями размещения потребителей развозимой продукции.

Нужно сразу заметить, что все выше перечисленные задачи всегда решаются для заранее определенного периода времени. Иначе значение показателя эффективности легко будет изменяться за счет варьирования периода реализации разработок. Это утверждение касается и следующего случая.

При использовании прибыли предприятия в качестве критерия эффективности, утверждения о наличии предела выглядят несколько менее очевидными. Однако и здесь существует предел, равный максимальному доходу от реализации продукции системы. Так как максимальное значение прибыли может быть достигнуто при затратах на производство, равных нулю, необходимо только убедиться в существовании предела для дохода от реализации продукции системы.

Для этого вначале необходимо сделать оговорку о том, что речь идет о реальном доходе, то есть инфляционные процессы не изменяют величины дохода. Тогда доход должен рассматриваться как средство доступа к товарам и услугам, существующим в рассматриваемом периоде (в том числе и производящимся). Даже если предположить, что система, в результате реализации своей продукции получает доступ ко всем имеющимся в мире на данный момент товарам и услугам, то все равно количество этих благ для заданного периода времени ограничено, и это количество служит пределом для дохода системы, хотя достичь его вряд ли кому удастся.

Такие рассуждения касаются и всех других известных в транспортных исследованиях случаев. На этом основании и был сделан вывод о наличии предела у эффективности, который принимается как категорическое, недоказуемое утверждение. По аналогии с принятым в математической статистике подходом к использованию статистических гипотез, такие утверждения считаются верными до тех пор, пока не будут опровергнуты на каком-то, единственном, примере. А так как рассмотрение существующих критериев такого исключения не предоставило, до появления критерия, не имеющего предела, будет правильным исходить из необходимости учета существования предела у любой функции эффективности (2.2). Если для этой функции использовать линейную модель, то зависимость эффективности системы от количества элементов будет иметь вид, отображённый на рисунке 2.1.

Наличие перелома прямой при подходе к пределу нарушает допущение

об однородности последствий ввода элемента в систему, поэтому линейная,

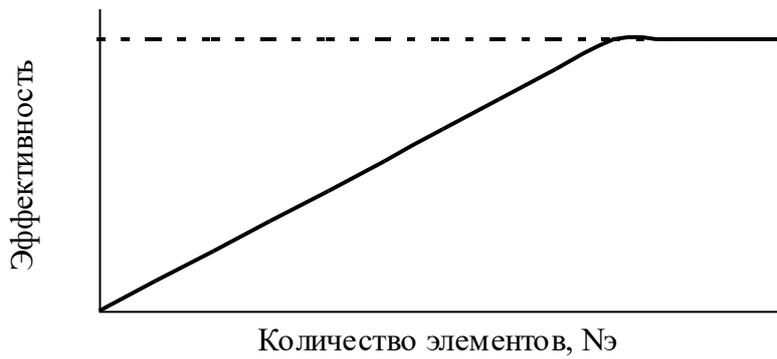


Рисунок 2.1.

равно как любая другая, не ограниченная сверху, зависимость не будет подходящим описанием для характера зависимости эффективности системы от количества элементов в рассматриваемой системе.

сматриваемой системе.

Наличие предела у результата функционирования системы, при допущении об однородности последствий включения элементов в систему означает, что включение нового элемента в систему каждый раз приводит к росту эффективности меньшему, чем включение предыдущего. Для описания такого случая хорошо подходит геометрическая прогрессия со знаменателем, меньшим единицы.

$$r_{i+1} = r_i \cdot q, \quad (2.5)$$

где r_{i+1} , r_i — результат включения $i+1$ -го и i -го элементов в систему соответственно; $q < 1$ — знаменатель геометрической прогрессии.

Однородность последствий в этом случае означает постоянство отношения результата включения нового элемента по отношению к результату включения предыдущего элемента, которое равно q .

Теперь можно получить общий вид зависимости критерия (2.3) от количества элементов системы, вспомнив формулу суммы первых n членов геометрической прогрессии

$$\mathcal{E} = \frac{r(q^{n_e} - 1)}{q - 1} - c \cdot n_e^2 \rightarrow \max. \quad (2.6)$$

Если задаться конкретными значениями r , q и c то можно определить оптимальное количество элементов, которое позволяет добиться её максимума, а также графически изобразить зависимость (2.6), рисунок 2.2.

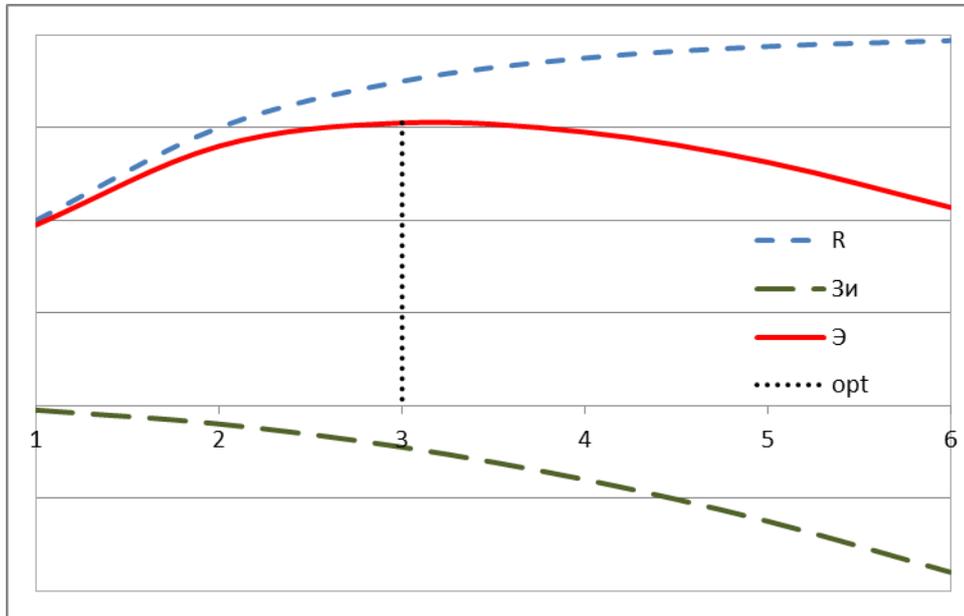


Рисунок 2.2

Количество элементов системы, обеспечивающее максимальную эффективность исследования, на графике обозначено как «opt».

Конечно, график 2.2 служит только иллюстрацией к процедуре проведения границ системы. Порядок просмотра элементов в процессе принятия решений относительно границ системы в общем случае не настолько формализован и, чтобы гарантировать полноту исследования, необходимо просмотреть большое количество элементов окружающей среды. Кроме того, для построения этого графика были приняты слишком жесткие ограничения и многие факторы, которые оказывают влияние на значения параметров, не были учтены. Реальные зависимости гораздо разнообразнее и получить их весьма сложно.

В первую очередь необходимо учитывать существование временного лага между процедурой выбора границы системы и реализацией решений. Затраты на исследование предшествуют реализации решений и не совпадают с ними

по продолжительности, это нужно учитывать при определении суммарной эффективности. В затратах на исследование должны отражаться не только материальные и трудовые составляющие, но и затраты времени на его проведение, хотя эта проблема носит в большей степени технический характер.

Основные же проблемы связаны с определением ожидаемых значений эффективности и затрат на исследование в результате включения дополнительного элемента в систему.

Самый простой случай, когда эффективность выражается стоимостными показателями, например прибылью объекта. Тогда при рассмотрении вопроса о включении объекта необходимо только решить какое влияние на доходы, расходы объекта оказывает изменение его состояния и какие затраты будут понесены на выбор оптимального состояния. Эти вопросы обычно решить весьма сложно, проблема здесь общая для любого критерия эффективности. Не исследовав объект, нельзя точно сказать какое влияние он может оказать на работу всей системы и какими будут затраты на его исследование. Поэтому основным способом прогнозирования оценок для показателей при определении границ системы служит экспертный метод, который носит исключительно гипотетический характер и не дает никаких гарантий надежности предсказаний. Повысить точность прогноза можно, но это требует соответствующих затрат на дополнительные исследования.

Более сложным, для определения рациональных границ системы, является вариант использования натуральных измерителей для показателей, встречающихся в критерии эффективности. Здесь более высокая сложность прогноза обусловлена необходимостью определения соотношения между затратами на исследование и значениями натуральных показателей в критерии эффективности. А это еще в большей степени снижает надежность и точность прогноза значений показателей в результате включения рассматриваемого объекта в систему.

Есть еще один аспект в этом вопросе, который вносит дополнительную

сложность в процесс исследования и, соответственно, отражается на процедуре принятия решений при проведении границ системы. Для обеспечения надежности результатов исследования необходимо исследовать взаимодействие между всеми элементами системы. Так как включение нового элемента в систему приводит к необходимости изучения не только его структуры, но и к необходимости изучения взаимосвязей со всеми уже набранными в систему элементами, то затраты на исследование элемента всегда зависят от общего количества элементов в системе.

И такая особенность скорее облегчает процесс принятия решений при проведении границ системы, так как вводит дополнительный фактор, учесть который относительно легко, что в условиях общей неопределенности является весьма положительным моментом. И если выработаны ориентиры на первых элементах, то прогнозирование затрат в дальнейшем существенно облегчается с учетом этого фактора.

Однако в общем случае четких тенденций, которые изображены на графиках, конечно же, не существует и зависимость может быть весьма сложной, рисунок 2.3.

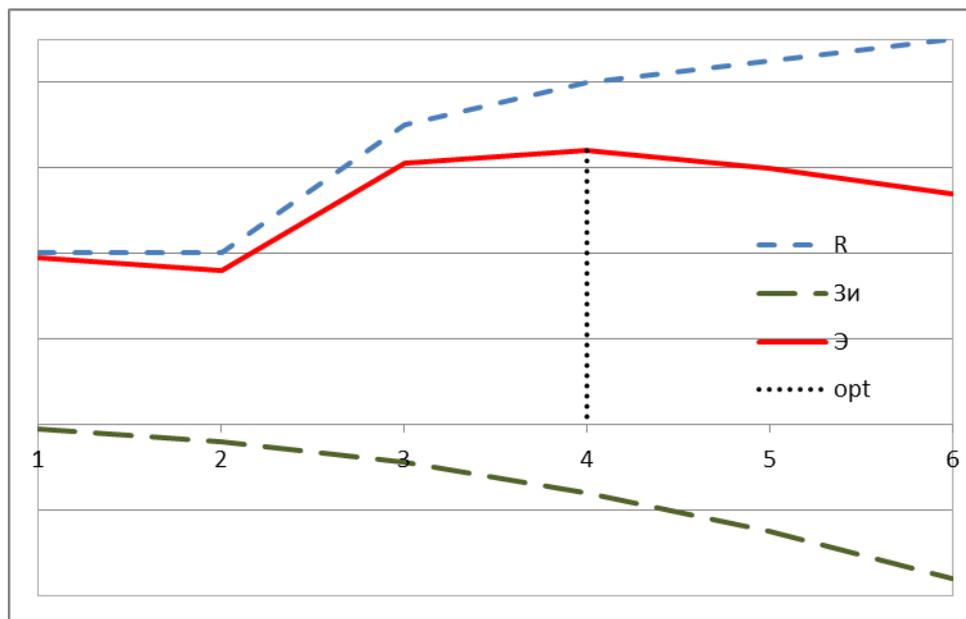


Рисунок 2.3

Подводя итог особенностям выполнения этого этапа, следует отметить, что он требует определенных знаний о свойствах объекта исследования и не всегда может быть до конца формализован. Однако, знание последствий включения элементов в систему, существенно облегчает процесс проведения её границ.

2.1.3. Формирование структуры внешней среды

На этом этапе необходимо охарактеризовать условия функционирования системы, которые генерирует внешняя среда. Они характеризуются набором параметров внешней среды, оказывающих значимое влияние на состояние элементов системы.

В качестве характеристик внешней среды при решении вопросов организации перевозок часто принимаются объём перевозок за определенный период и параметры транспортной сети. При решении задач в сфере организации дорожного движения примерами наиболее распространенных характеристик служат параметры транспортного потока. Список характеристик может быть значительно шире и, при отсутствии стандартной методики решения поставленной задачи, определяется в каждом случае индивидуально, в зависимости от целей исследования.

Следует учитывать, что параметры внешней среды должны быть определены на период реализации решений исследования, а так как между периодом сбора информации и периодом реализации результатов исследования существует временной лаг, то всегда необходимо определять прогнозные значения параметров внешней среды.

При выполнении этого этапа могут возникнуть две ситуации, обусловленные разным уровнем стабильности параметров внешней среды.

Сразу следует оговориться, что вопрос считать или не считать состояние элементов внешней среды стабильным отражается на точности результатов исследования системы и, следовательно, на эффективности принимаемых реше-

ний. Решается он в результате анализа параметров состояния внешней среды и, по сути, представляют собой принятие или отвержение допущения о стабильности параметров внешней среды. Если допущение принимается, то возникает первая ситуация.

- *Внешняя среда достаточно стабильна или стабильны тенденции изменения её состояния.*

В этом случае для определения параметров внешней среды в основном используются модели прогностического направления. Постоянное значение параметров внешней среды обычно описывается частным случаем регрессивных моделей – средней величиной, хотя существуют и другие методы прогнозирования, например, по последнему значению.

Вторая ситуация возникает тогда, когда допущение о стабильности параметров внешней среды считается неприемлемым.

- *Характеристики внешней среды подвержены сильным колебаниям.*

В этом случае возможно несколько вариантов действий.

Первый вариант заключается в расширении границы системы, то есть во включении нестабильного элемента внешней среды в список элементов системы.

В соответствии с технологией системного подхода, необходимо описать влияние на включенный элемент новых элементов внешней среды и элементов самой системы, так как это взаимодействие (второе) теперь будет частью модели системы. Новые элементы внешней среды, которые оказывают влияние на вновь сформированную систему, возможно, будут обладать достаточно стабильными характеристиками.

Этот вариант является хорошим выходом, когда нестабильная структура элемента внешней среды обусловлена его связями с ограниченным количеством других элементов внешней среды, имеющих относительно стабильные характеристики или влиянием на него некоторых элементов системы.

Например, сильные колебания объема перевозок, которые будут считать-

ся неприемлемыми для принятия решений по эффективному управлению маршрутом, могут быть преодолены путем включения элемента "пассажиры" в систему "маршрут". Тогда, например, изучение влияния тарифа исследуемого маршрута (элемент системы "маршрут") и других маршрутов (новые элементы внешней среды) на объём перевозок может устранить нестабильность внешней среды. Эти действия помогут преодолеть проблему, если характеристики других маршрутов достаточно стабильны. Однако здесь следует учитывать последствия расширения границ системы, описанные в предыдущем пункте порядка исследования транспортных систем.

Второй вариант решения этой проблемы заключается в более глубокой структуризации нестабильного элемента внешней среды. Если продолжить пример с объёмом перевозок то, возможно, что выделение для него более узких интервалов времени поможет получить стабильные значения объёма в определенные промежутки времени. Но тогда решения необходимо принимать не только по каждому интервалу в отдельности, но и увязывать их между собой, поскольку существуют связи между этими интервалами. Например, количество подвижного состава на маршруте может изменяться только с учетом времени оборота на нем и продолжительности работы водителей на линии.

Третьим вариантом учета нестабильности структуры внешней среды является описание её состояния как случайной величины. В этом случае модель объекта исследования относится к моделям поведения. Они используются тогда, когда применение первых двух вариантов действий не дает положительных результатов из-за обширных связей нестабильного элемента, которые и определяют его состояние. Но в этом случае для выработки конкретных управляющих воздействий на исследуемый объект необходима дополнительная обработка результатов многочисленных экспериментов с созданной моделью.

2.1.4. Изучение внутренней структуры транспортной системы и определение составляющих её элементов

Содержание этого этапа во многом аналогично содержанию предыдущего

го этапа определения структуры внешней среды. Разница заключается только в том, что здесь характеризуются параметры элементов системы.

Так как эти элементы являются управляемыми в процессе исследования, то помимо общих характеристик, примеры которых будут описаны ниже, для каждого элемента должны быть определены пределы его изменения. То есть на данном этапе начинается формирование системы ограничений, точнее, той её части, которая определяет количество возможных вариантов состояния системы. При её формировании в основном используются ресурсные ограничения.

Основное применение при моделировании системы нашли модели принятия решений, а внешняя среда чаще всего описывается прогностическими моделями. Разницу в методах моделирования следует учитывать при характеристике элементов системы. Нестабильные элементы в системе присутствовать не могут, все элементы должны быть охарактеризованы достаточно точно. Окончательный ответ на вопрос о стабильности элементов может быть дан только после выполнения следующего этапа, однако и на этом этапе возможна оценка стабильности характеристик элементов. Для устранения нестабильности из приведенных в предыдущем пункте подходит только один вариант действий – структуризация нестабильного элемента системы.

Характеристики элементов позже будут использоваться в математической модели объекта, а сама модель еще не создана, поэтому на данном этапе точно неизвестно какие характеристики необходимы. Для преодоления этой проблемы при выполнении этого этапа можно использовать "избыточное" описание, которое состоит в сборе всей легкодоступной информации об объекте.

Такое описание поможет в преодолении необходимости повторного выполнения четвертого этапа после моделирования системы. Это, в свою очередь, существенно повлияет на продолжительность исследования, так как для определения некоторых параметров могут потребоваться дополнительные и относительно продолжительные обследования, которые лучше проводить параллельно с выполнением других этапов исследования.

Последнее замечание – степень доступности информации является условным понятием и решение о том, какую информацию нужно собирать, все-таки должно основываться на предварительных представлениях о содержании математической модели.

2.1.5. Нахождение зависимостей, характеризующих взаимосвязи между элементами и создание математической модели поведения системы

Порядок создания математической модели достаточно прост, при наличии критерия эффективности системы и списка её элементов, для которых на предыдущем этапе заданы пределы изменения параметров состояния. Важно, в основном, только понимание целей моделирования, заключающееся в построении математической процедуры расчета значений критерия эффективности, в зависимости от параметров элементов системы. В соответствии с этой целью построение математической модели предусматривает определенный порядок описания зависимостей.

Вначале пытаются раскрыть связи составляющих критерия эффективности с параметрами внешней среды и элементов системы. Если все параметры, от которых зависит значение критерия, известны, то есть они являются управляемыми параметрами активных элементов системы или известными характеристиками элементов внешней среды и системы, то математическая модель системы создана. В противном случае создаются модели, описывающие зависимости для неизвестных параметров. Процесс построения модели заканчивается, когда все значения на входах в модель будут известны.

При создании каждой зависимости проводится анализ возможности её использования в модели системы. Он проводится путем выдвижения ограничений, которые определяют условия функционирования объекта, и принятия допущений о независимости исследуемых параметров от дополнительных факторов, не учтенных в модели. В этом случае неучтенные в модели параметры считаются постоянными. Они представляют собой характеристики элементов системы или внешней среды.

Для каждой зависимости выбирается тип модели из числа направлений моделирования, которые были описаны в рамках первой темы.

Степень точности описания взаимосвязей между элементами оказывает прямое влияние на эффективность результатов исследования, но точность моделирования ограничена имеющейся информацией об элементах системы и окружающей среды. Поэтому возможно, что может потребоваться выполнение дополнительных действий из числа тех, которые выполнялись на 3-ем и 4-ом этапах исследования. Целесообразность их повторного выполнения должна определяться с учетом возможного повышения эффективности объекта исследования. Кроме того, в результате этих действий может потребоваться углубление структуризации элементов. Структуризация предполагает выделение нескольких подсистем в элементе. Иными словами увеличивается количество элементов в базовой системе. Поэтому при структуризации нужно руководствоваться теми же соображениями, что и при проведении границ системы.

Примером структуризации элементов системы служит представление пункта погрузки в виде совокупности постов, если характеристик всего пункта в целом не достаточно для описания взаимодействия с другими элементами системы на требуемом уровне точности. Если вернуться к системе допущений, то эта необходимость возникает, когда допущение о независимости времени ожидания погрузки от количества постов и типа механизмов на них признается некорректным.

Несмотря на кажущуюся из описания простоту порядка составления математической модели, отмеченной выше, сам процесс моделирования является самым творческим по своему содержанию среди всех этапов исследования, поскольку каждый его шаг должен сопровождаться принятием многих решений. Это выбор системы ограничений, которые будут характеризовать условия функционирования объекта, принятие допущений о характере взаимосвязей и выбор типа модели для описания взаимосвязей. Если эти действия выполнены, то дополнительно может потребоваться определение конкретных параметров

модели, например для моделей прогностического направления.

2.1.6. Поиск оптимального состояния системы

Основные особенности выполнения этого этапа были описаны при рассмотрении последовательности системного анализа. Здесь лишь следует отметить, что математическая модель объекта может быть дополнена алгоритмом поиска оптимального состояния системы. Обычно это делается при решении достаточно распространенных задач, когда модель может использоваться более одного раза.

Примерами таких моделей могут служить программы расчета рациональных развозных маршрутов при перевозке мелкопартионных грузов или программы маршрутизации городского пассажирского транспорта.

В качестве механизма поиска оптимального решения в них чаще всего используются эвристические алгоритмы, дающие рациональные решения.

Если же задача относительно проста, количество возможных вариантов состояния системы невелико, постановка задачи нетрадиционна и модель вряд ли будет использоваться еще, то наилучшим вариантом, возможно, будет расчет параметров модели системы для всех вариантов её состояния.

2.1.7. Выработка управляющих воздействий, направленных на достижение оптимального состояния системы

На этом этапе определяются конкретные механизмы воздействия на объект исследования, позволяющие достичь параметров активных элементов системы, при которых расчетный критерий эффективности системы имеет оптимальное значение.

Это может быть просто план работы, например продолжительность циклов светофорного регулирования или план выпуска автомобилей на линию и график их работы. В более сложных случаях, когда инструментарий исследования несколько шире, определяется план создания новых объектов, например установки тех же светофоров или строительства новых постов погрузки. То

есть здесь проект намерений превращается в соответствующую проектно-сметную документацию по реализации результатов исследования.

Этот этап является обязательным при решении любых задач и использовании любого инструментария, не только системного подхода. При его выполнении следует еще раз убедиться в достоверности исходных данных, принятых гипотез и допущений, а также в степени точности математической модели объекта. В заключение данного подраздела на рисунке 2.4 приводится схема выполнения этапов исследования транспортных систем.

2.2 Списки элементов транспортных систем

Приведенный выше порядок исследования транспортных систем позволяет добиться, в значительной степени, определенной последовательности выполнения работ по принятию управленческих решений при исследовании транспортных объектов.

Но при выполнении многих этапов могут возникать ситуации, когда для получения приемлемых результатов требуется повторное выполнение предыдущих этапов исследования. Такие возвраты значительно увеличивают продолжительность исследования и его трудоемкость. Кроме того, желательно, чтобы отдельные виды исследовательских работ могли быть совмещены по времени выполнения, что даст возможности относительно свободного планирования исследовательских работ и, возможно, позволит сократить его трудоемкость.

Для выполнения этого условия были сформированы списки элементов, которые могут включаться в транспортную систему при исследовании. Содержание списков основано на опыте выполненных исследований транспортных объектов и носит достаточно информативный характер. Использование списков часто помогает упростить процесс формирования системы, описывающие транспортный объект в исследовании. Каждый из элементов списка описывается относительно ограниченным набором характеристик, что позволяет на самых начальных стадиях решения задачи заняться формированием исходных

данных для нее.

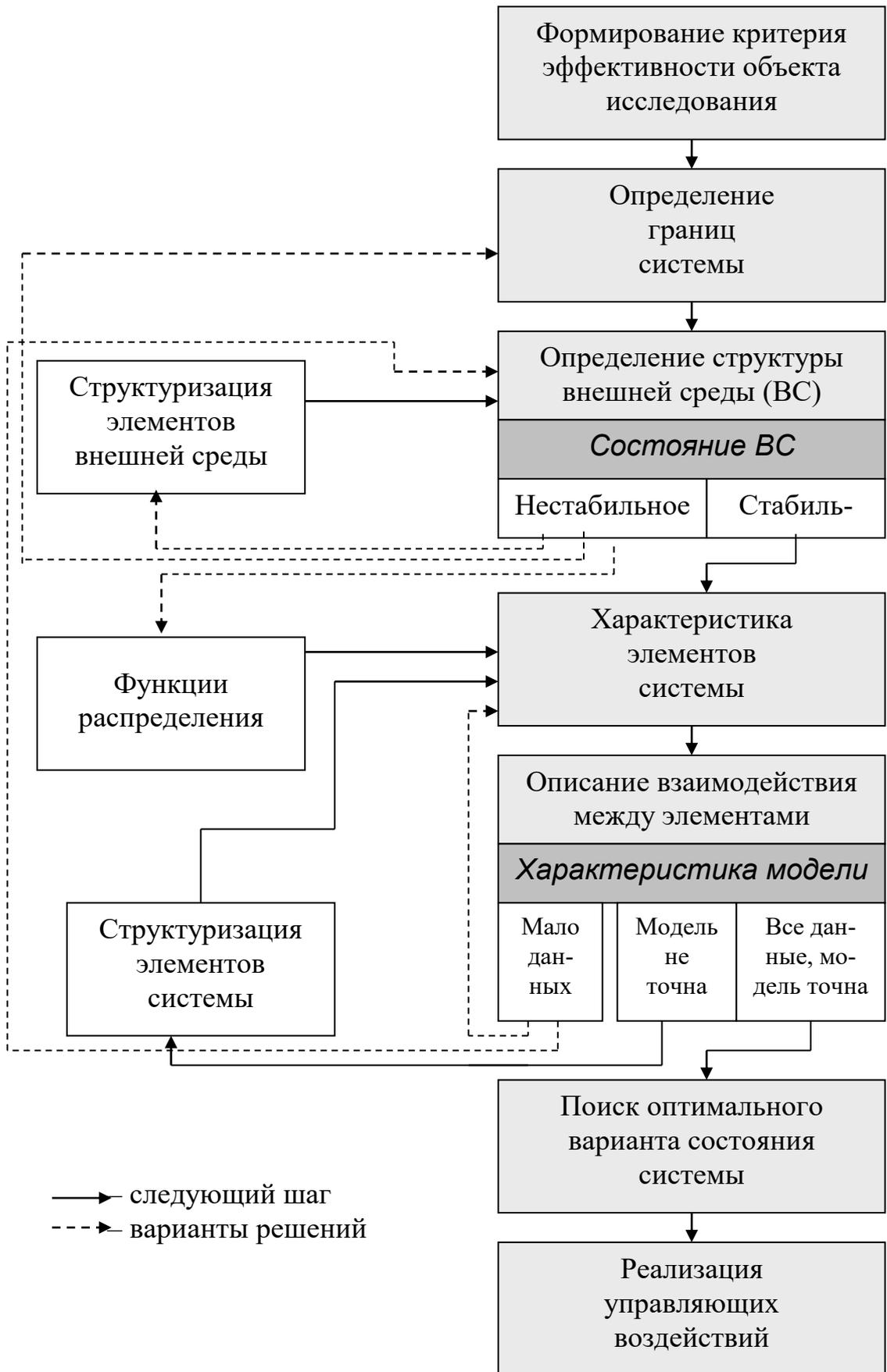


Рисунок 2.4 – Порядок исследования транспортных систем

Списки элементов не требуются при решении стандартных задач, для которых разработаны соответствующие математические методы, поскольку здесь уже известен массив исходной информации необходимой для решения задачи и существуют математические модели. Например, они не требуются при расчете кратчайших расстояний или решении транспортной задачи. Но, обычно, такие задачи являются только частью всего процесса исследования и принятия решений и они не могут охватить весь спектр вопросов, возникающих при изучении транспортных объектов.

При решении новых или относительно сложных задач, их постановка и моделирование системы занимает продолжительное время и зависит от характеристик элементов системы или внешней среды. В этом случае знание списка элементов и их характеристик позволяет существенно сократить продолжительность исследовательских работ и повысить их эффективность, за счет совмещения двух этапов исследования и предоставления дополнительной информации для постановки задачи.

Каждый из элементов списка может характеризоваться качественными и количественными признаками. Качественные признаки относят элемент к какому-то классу объектов, обладающему определенным набором общих свойств, количественные характеризуют объект внутри класса.

В связи с существенными различиями между задачами в сфере организации дорожного движения и задачами по организации перевозок, здесь будут рассмотрены два варианта таких списков.

2.2.1 Элементы систем в организации перевозок

Список элементов состоит из двух частей. К основным элементам относятся те, которые присутствуют при решении практически всех задач с описанными объектами. Дополнительные элементы могут не присутствовать в исследованиях и используются для более узкого класса объектов или нестандартных вариантов исследования.

Основные элементы:

- *объект перевозок (груз или пассажиры).*

К наиболее распространенным качественным характеристикам объекта перевозок относятся виды грузов и категории пассажиров. Количественно этот элемент транспортной системы может характеризоваться объёмом перевозок за какой-то период, распределением объёма по периодам времени. Грузы дополнительно могут быть охарактеризованы объёмом партии, стоимостью единицы груза, временем доставки и так далее.

- *транспортные средства (подвижной состав).*

Качественной характеристикой подвижного состава обычно является его тип, определяющий вид объекта перевозок, для которого он предназначен. Количественными характеристиками транспортных средств являются стоимостные показатели и техническая характеристика.

Пример стоимостных показателей – цена транспортного средства и стоимость одного километра пробега.

В качестве характеристики также возможно использование количества доступного подвижного состава, если задача решается в рамках предприятия.

- *транспортная сеть (коммуникации различных видов транспорта с соответствующими средствами управления движением).*

Характеристики транспортной сети будут рассмотрены в пятом разделе. Здесь можно привести примеры таких параметров, как возможность проезда различными видами транспорта или средняя техническая скорость движения на сети. Также могут быть использованы стоимостные параметры создания или реконструкции транспортной сети.

Дополнительные элементы:

- *средства погрузки-разгрузки.*

Характеристики этих элементов транспортной системы аналогичны по своему содержанию характеристикам подвижного состава.

- *складские площади, играющие роль межсменных и межоперационных*

компенсаторов.

В первую очередь следует отметить, что к этим элементам относятся только складские площади, играющие определенную роль в цепях поставок грузов. Кроме них существуют складские площади производственного назначения, которые могут не иметь прямого отношения к транспортировке грузов и они обычно не рассматриваются в качестве элементов транспортной системы.

Характеристиками складских площадей является возможность хранения и переработки того или иного вида груза, например открытые площадки или крытые склады (качественная характеристика), их ёмкость и перерабатывающая способность (количественные характеристики). Кроме них используются стоимостные характеристики, такие как стоимость строительства, эксплуатации складских площадей, стоимость переработки единицы груза.

2.2.2 Элементы систем в организации движения

Для задач в области организации дорожного движения может использоваться следующий список элементов транспортной системы.

- *транспортный поток тех видов транспорта, которые оказывают влияние на параметры транспортной сети или элементов организации движения.*

Основными характеристиками транспортного потока служат его состав, интенсивность, плотность и скорость.

- *транспортная сеть (коммуникации различных видов транспорта).*

Для решения задач в области организации дорожного движения обычно используются характеристики дорожных условий, например количество полос движения, вид покрытия, ширина обочины, радиусы поворотов и так далее. Могут также использоваться стоимостные характеристики, такие как стоимость строительства и эксплуатации одного километра дороги.

- *технические средства управления движением.*

Здесь список характеристик определяется видом средств управления дорожным движением. В общем плане следует выделить стоимостные и технические характеристики. Например, стоимость часа эксплуатации светофора и

продолжительность различных фаз светофорного цикла.

Списки элементов системы помогают определить конкретный состав объекта исследования. Они представляют собой условный трафарет, накладывая который на объект исследования, можно получить конкретный список элементов, которые с наибольшей степенью вероятности будут участвовать в исследовании. Затем можно начинать сбор характеристик этих элементов, параллельно с постановкой задачи и моделированием системы.

Добиться строгой последовательности выполнения этапов исследования с помощью таких списков не всегда удается, так как результаты выполнения отдельных этапов или всего исследования в целом в отдельных случаях требуют расширения списка объектов, рассматриваемых в исследовании, или дополнения и уточнения характеристик элементов.

В частности при моделировании системы, для повышения точности модели иногда возникает необходимость учета дополнительного фактора. Например, для уточнения характеристик транспортного потока при совершенствовании системы организации дорожного движения может потребоваться знание источников зарождения и поглощения транспортных корреспонденций, то есть включение в исследование дополнительных элементов, которых нет в списке.

Эти списки не являются указанием к проведению границ транспортной системы при исследованиях, какие-то из них могут являться элементами внешней среды.

В частности, при решении вопросов организации автомобильных перевозок, транспортная сеть во многих случаях выступает в качестве элемента внешней среды. То есть она не является инструментом повышения эффективности объекта, а лишь формирует условия его работы.

Эта постановка вполне корректна, так как улично-дорожная сеть является объектом общего пользования и автомобили, которые рассматриваются в исследовании, составляют относительно небольшую часть транспортного потока и, соответственно, обычно не оказывают существенного влияния на параметры

сети. Это значит, что допущение о независимости параметров транспортной сети от параметров состояния объекта исследования является достаточно корректным для данного случая. Объект перевозок также очень часто выступает в качестве элемента внешней среды.

Однако принципиальных отличий в сборе характеристик элементов системы или элементов внешней среды нет. Поэтому сбору информации об элементах из списков ничто не препятствует. В то же время характеристики объектов могут дать дополнительную информацию к проведению исследования. В частности на основании характеристик объекта перевозок можно сделать вывод о целесообразности его включения в список элементов системы, если значения объёма перевозок подвержены сильным колебаниям из-за величины тарифа.

Таким образом, список элементов транспортной системы предоставляет помощь при проведении системных исследований в области транспорта. Если же решаются сравнительно простые задачи, он может помочь полностью устранить повторное выполнение отдельных этапов исследования.

В следующих темах, в частности, рассматриваются вопросы выполнения отдельных этапов исследования.

ТЕМА 3. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В большинстве источников, посвященных системным исследованиям или смежным с ними сферам, не дается конкретных указаний к выполнению первого этапа системного анализа. В них предполагается, что список возможных целей функционирования системы ничем не ограничен и исследователь вправе выбирать любой набор критериев на основе логического анализа свойств системы.

Отсутствие четких указаний к формированию критерия эффективности приводит к существованию большого количества вариантов целевой функции для одной и той же постановки задачи и, как следствие, к соответствующему количеству вариантов решения задачи. Это обусловлено субъективностью принятия решений, поскольку оба этапа формирования критерия эффективности, то есть вербальное описание цели и её формализация, могут приводить к разным вариантам, зависящим от взглядов исследователя на результаты функционирования объекта.

В отдельных работах даются более конкретные указания к составлению критерия эффективности. В них предлагается базовый критерий, который в общем случае имеет следующий вид.

$$\mathcal{E} = R - C \quad (3.1)$$

где \mathcal{E} – эффективность системы; R – результаты функционирования объекта, то есть степень удовлетворения потребностей пользователя; C – затраты всех видов ресурсов на достижение этих результатов.

Если наполнить конкретным содержанием обе составляющих базового критерия эффективности, на основе той роли, которую объект исследования играет в системе более высокого уровня, то для этого объекта можно получить

критерий эффективности.

При исследовании экономических систем с точки зрения производителя, когда основной целью является получение прибыли, проблем с использованием этого показателя не возникает. В качестве результатов выступают доходы системы, в качестве затрат – капитальные вложения и текущие издержки.

Если же решаются вопросы создания или совершенствования работы системы с точки зрения потребителей её продукции или делаются попытки комплексной оценки влияния мероприятий на экономическое окружение объекта исследования, то использование дохода в качестве основного оценочного показателя результатов функционирования системы выглядит неубедительным. Примерами таких исследований могут являться мероприятия в области пассажирского транспорта, направленные на повышение качества перевозок пассажиров или другие инвестиционные проекты, целью которых является достижение социального эффекта.

Стандартный выход из этого положения заключается в делении результатов на основные R_o и сопутствующие R_c .

$$R = R_o + R_c \quad (3.2)$$

В качестве основных результатов практически всегда выступает доходная часть исследуемого объекта, а под сопутствующими результатами понимаются результаты воздействия исследуемого объекта на его окружение.

$$R_c = \sum_{i=1}^{n_c} R_{ci}, \quad (3.3)$$

где n_c – количество сопутствующих результатов (количество объектов, на которые воздействует исследуемый объект);

R_{ci} – результат i -го воздействия.

Но такое представление результатов функционирования объекта по своей сути означает переход к той же неограниченности возможных составляющих критерия эффективности, которая упоминалась в начале раздела. Это объясняется тем, что количество объектов, подвергающихся прямому и косвенному воздействию исследуемого объекта, практически ничем не ограничено, то есть:

$$n \rightarrow \infty \quad (3.4)$$

Конечно, эти воздействия могут иметь самую разную степень влияния и в частных случаях равняться нулю, но это не помогает решить проблему неопределенности содержания критерия эффективности. В каждом случае необходимо ответить на вопрос о существенности того или иного сопутствующего результата и достаточно часто их список может оказаться весьма длинным.

Поэтому обычно выделяются наиболее значимые по общепринятому мнению сопутствующие результаты. Для транспортных объектов это воздействие транспорта на окружающую среду и качество перевозок пассажиров. Часто в качестве сопутствующих результатов учитываются положительные изменения прибыли клиентов транспортной системы.

Но если с первыми двумя сопутствующими результатами проблема заключается только в неполноте списка, то использование последнего результата прямо ведет к искажению показателя эффективности, так как любому мероприятию по созданию или совершенствованию экономических объектов сопутствуют не только положительные, но и отрицательные результаты. Например, сокращение затрат на перевозки за счет технологических мероприятий приводит и к росту эффективности исследуемого объекта и к снижению эффективности его поставщиков.

Кроме того, учёт результатов работы объекта с точки зрения обслуживаемых объектов в качестве сопутствующих результатов приводит к серьезным противоречиям в критерии эффективности. Эти противоречия вызваны нали-

чием основных результатов (доходов) исследуемого объекта. Естественно, что для обслуживаемого объекта доходы обслуживающего его объекта являются расходами. Поэтому одна и та же величина должна учитываться с разными знаками в критериях эффективности обслуживающих и обслуживаемых объектов. Примером такого противоречия служит учёт результатов работы пассажирских транспортных систем с точки зрения пассажиров в качестве сопутствующих результатов при решении вопросов совершенствования маршрутных схем или других технологических вопросов. Тогда доходы пассажирских транспортных предприятий являются основными результатами, и повышение уровня тарифа на перевозки приводит к однозначному повышению критерия эффективности такой системы, что выглядит не совсем убедительно с точки зрения здравого смысла, так как такое мероприятие увеличивает расходы пассажиров на передвижение.

Еще одним недостатком такого подхода к формированию критерия эффективности является часто возникающая необходимость использования в критерии показателей, имеющих различный физический смысл.

3.1. Многокомпонентные критерии эффективности

Использование описанных выше подходов приводит к тому, что весьма частым результатом выбора цели исследования и формирования критерия эффективности системы являются многокомпонентные критерии. Например, в [23] приводится интегральный критерий эффективности логистической системы, который состоит из семи показателей, краткая характеристика которых приведена в таблице 3.1.

Естественно, что сведение этих показателей в один критерий без дополнительных преобразований невозможно, так как они имеют разный физический смысл и, как следствие, различные измерители. Даже бальная оценка состояния тех или иных показателей не помогает преодолению этих противоречий.

Таблица 3.1 – Составляющие критерия эффективности логистической системы

Наименование составляющей критерия	Единицы измерения
Экономическая эффективность	руб./руб
Снижение трудоемкости	тыс. нормо-часов
Условное сокращение численности персонала	чел.
Точность поставки заказов	баллы
Уровень автоматизации	баллы
Увеличение сбыта	баллы
Условия труда	баллы

В то же время, решение задач с такими многокомпонентными критериями не имеет строго обоснованных математических методов. Поскольку каждая составляющая многокомпонентного критерия представляет собой самостоятельный критерий эффективности системы, то решение задачи оптимизации по каждой составляющей в общем случае приведет к получению такого же количества оптимальных решений. Ни одно из них не может быть принято за окончательное решение, так как оно, скорее всего, не обеспечивает оптимального значения остальных критериев. Для преодоления этих трудностей используются принципы оптимизации и методы решения многокритериальных задач.

3.1.1 Принципы многокритериальной оптимизации

Использование принципов многокритериальной оптимизации является самым общим способом преодоления неопределенностей в решении многокритериальных задач.

Самый известный из них – **принцип Парето**.

В соответствии с ним в качестве оптимального рекомендуется выбирать только такой вариант, который является оптимальным по Парето или «эффективным».

Оптимальным по Парето называется такой вариант решения, который не может быть улучшен ни по одному критерию, без того, чтобы не ухудшилось значение какого-либо другого критерия.

Как правило, имеется множество оптимальных по Парето вариантов ре-

шения, они считаются паритетными и каждый из них более предпочтительным, чем любой вариант, не являющийся оптимальным по Парето. Для выбора одного из вариантов требуется привлечение дополнительной информации и нередко строгое обоснование оказывается невозможным.

В литературе не приводятся общие для всех случаев методы поиска оптимальных по Парето вариантов, но можно предложить последовательную оптимизацию по каждому из частных критериев, заканчивающуюся тогда, когда найден вариант решения, при котором значение какого-либо другого частного критерия хуже, чем в предыдущем варианте. Тогда предыдущий вариант признается оптимальным по Парето. Использование такого подхода в самом простом случае, то есть при использовании одной методики перебора вариантов, приведет к получению нескольких оптимальных по Парето вариантов, количество которых равно количеству частных критериев.

При выборе окончательного варианта решения чаще всего используется экспертный метод с использованием дополнительной, трудно формализуемой информации. Но могут рекомендоваться и некоторые общие ориентиры, например близость значения какого-либо частного критерия для варианта к предельно низким значениям свидетельствует не в его пользу. По этому же принципу могут оцениваться варианты с точки зрения реализуемости управляющих параметров.

Большее количество «эффективных», то есть потенциально оптимальных результатов может быть получено с использованием **принципа доминантности**.

Здесь «эффективным» считается вариант решения, при котором значения всех частных критериев лучше, чем у базового варианта.

Но его применение еще больше увеличивает свободу выбора окончательного решения и, таким образом, в меньшей степени, чем принцип Парето, гарантирует получение действительно оптимального в заданном смысле решения.

Остальные принципы многокритериальной оптимизации в еще большей степени, чем принцип доминантности, ослабляют требования к отбору вариантов решения.

Таким образом, принципы многокритериальной оптимизации только позволяют сократить количество возможных вариантов решения, но не дают окончательного ответа на вопрос об оптимальном решении.

3.1.2 Методы решения многокритериальных задач

Существуют относительно формализованные методы перехода от многокомпонентного критерия к единому критерию, позволяющие получить корректную с математической точки зрения постановку задачи.

Самым простым из них является **метод последовательной оптимизации**. При его реализации вначале необходимо ранжировать критерии по их значимости. Пусть (3.5) представляет собой критерий, уже ранжированный в порядке значимости составляющих.

$$y_1 \rightarrow \text{opt}; y_2 \rightarrow \text{opt}; \dots y_n \rightarrow \text{opt} , \quad (3.5)$$

где n – количество частных критериев эффективности.

После ранжирования решается однокритериальная задача поиска оптимального значения самого значимого критерия.

$$y_1 \rightarrow \text{opt} . \quad (3.6)$$

Затем задаются допустимые пределы изменения для этого частного критерия Δy_1 и решается задача оптимизации второго частного критерия в полученной области.

$$y_2 \rightarrow \text{opt}; \text{ при } y_1 \in [y_{1\text{opt}} - \Delta y_1; y_{1\text{opt}} + \Delta y_1] , \quad (3.7)$$

где y_{1opt} – оптимальное значение первого частного критерия эффективности; Δy_1 – допустимое отклонение от оптимума первого частного критерия эффективности.

На следующем этапе задается допустимое отклонение для второго критерия и оптимизируется третий критерий в области решений, ограниченных уже для Δy_1 и Δy_2 . Процесс продолжается до тех пор, пока не оптимизирован последний, n -й критерий.

Отсутствие достаточно точных указаний к ранжированию частных критериев и определению пределов отклонения от оптимального состояния может привести к разным решениям в одних и тех же условиях.

Если считается, что значимость первого частного критерия эффективности в ранжированном многокомпонентном критерии не превышает суммарной значимости остальных частных критериев, то для перехода к однокритериальной задаче может быть использован **метод комбинированной целевой функции**. Он заключается в присвоении каждому частному критерию весового значения, исходя из условия (3.8).

$$\sum_i^n w_i = 1, \quad (3.8)$$

где w_i – весовой коэффициент при i -м частном критерии.

Перед формированием комбинированной целевой функции необходимо нормировать частные критерии, то есть привести их к единому масштабу измерения. Для этого необходимо наличие хотя бы одного, а лучше нескольких, фактических значений частных критериев эффективности, характеризующих возможные состояния объекта исследования. Наиболее часто используемым способом нормировки является переход от стандартных измерителей к таким единицам измерения, чтобы имеющиеся значения частного критерия находи-

лись в пределах от нуля до единицы. Такой переход осуществляется через зависимость (3.9).

$$y_i' = \frac{y_i - \min(\forall y_i)}{\max(\forall y_i) - \min(\forall y_i)}, \quad (3.9)$$

где y_i , y_i' – фактическое и нормированное значение i -го частного критерия соответственно; $\min(\forall y_i)$, $\max(\forall y_i)$ – соответственно минимальное и максимальное значение i -го частного критерия из имеющегося набора.

После определения весовых значений и нормировки частных критериев составляется комбинированная целевая функция.

$$\sum_i^n w_i \cdot y_i' \rightarrow opt. \quad (3.10)$$

Направление оптимизации (*min* или *max*) выбирается по большинству частных критериев, остальные критерии приводятся к тому же направлению умножением на -1 .

После этого решается однокритериальная задача поиска минимального или максимального значения для (3.10).

Полученное с помощью комбинированной целевой функции решение должно быть оценено с позиций каждого частного критерия эффективности на предмет его корректности. В общем случае это решение не оптимизирует ни один из частных критериев, а представляет собой некий компромисс между ними.

Основным недостатком метода является сложность объективной оценки значений весовых коэффициентов. Даже использование методов математической статистики не позволяет освободиться от необходимости субъективной оценки значений некоего показателя качества работы объекта исследования,

ствующего объекта за ориентир при выборе граничных значений отдельных критериев чаще всего принимаются существующий уровень этих показателей. Этот путь является самым простым, однако, далеко не всегда его можно назвать верным. Кроме того, такой подход не может быть использован при создании новых объектов.

Примером такого подхода к определению граничных условий может служить использование существующего значения коэффициента пересадочности при решении задачи маршрутизации, так как она практически всегда решается для уже существующего объекта.

В то же время выбор предельного количества ДТП, при создании транспортной развязки является, несомненно, более сложным вопросом, от ответа на который зависит окончательный вариант решения задачи.

Общим недостатком, для всех описанных выше вариантов решения многокритериальных задач, *является необходимость принятия субъективных решений в процессе выбора окончательного варианта состояния объекта или формирования целевой функции*. Каждый исследователь может иметь свои взгляды на процессы, происходящие с объектом и, как следствие, одна и та же задача может иметь столько вариантов решения, сколько предпринималось попыток её решить. Причем разница между вариантами решений может заключаться не в уровне их точности, то есть степени близости к оптимальному варианту состояния объекта, а в самом понимании этого оптимального состояния.

Для описанного выше подхода характерно несколько основных аспектов:

- *процесс вербального описания цели исследования или функционирования объекта опирается только на очень общие указания, которые не дают гарантии принятия объективного решения;*
- *при формировании критерия эффективности, на основании целей её функционирования, допускается весьма свободный выбор составляющих критерия эффективности;*

- *принципы многокритериальной оптимизации позволяют сократить количество вариантов состояния системы, потенциально пригодных в качестве оптимальных, но не дают окончательного ответа на вопрос о том какое же состояние системы является оптимальным в данной задаче;*

- *методы решения многокритериальных задач, в конечном счете, сводятся к субъективной оценке исследовательской группой значимости каждой составляющей в критерии эффективности.*

Это означает, что ни принципы, ни методы решения многокритериальных задач не позволяют в полной мере избавиться от субъективности в выборе цели исследования и необходимо формализовать этот процесс в рамках исследования или принятия решений от начала, до составления критерия эффективности объекта.

3.2 Последовательный выбор критерия эффективности

Для преодоления указанных выше недостатков необходима выработка алгоритма принятия решений при определении цели и формировании критерия эффективности объекта исследования.

Добиться этой цели можно, если разработать принципы формирования объективного критерия эффективности, содержание которого определяется свойствами объекта исследования, условиями его функционирования и особенностями задачи, которая решается в процессе исследования. Следует отметить, что приводимые далее рассуждения не претендуют на общий характер, а сформулированы лишь для случаев решения прикладных задач относительно транспортных объектов.

Первым принципом определения цели и формирования критерия эффективности является необходимость обеспечения объективности критерия, то есть его соответствия объекту исследования.

Для его выполнения сначала необходимо вспомнить понятие цели – предвосхищение в сознании результата, на достижение которого направлены

действия, и уточнить использовавшееся и раньше понятие критерия. Критерий (греческое *kriterion* – мерило для оценки чего-либо) – средство проверки того или иного утверждения, гипотезы и тому подобного. В процессе исследований критерий выступает как формализованное отображение цели.

Под действием понимается единичный элемент деятельности, в процессе которого достигается результат, который не разлагается на более простые цели. В соответствии с этим, деятельность представляет собой совокупность действий, направленных на достижение более общих, чем элементарные, целей и в дальнейшем удобнее оперировать понятием деятельности, имеющем достаточно общие цели. Из определения цели можно сделать вывод, что для любой деятельности характерно наличие объекта, для которого она является средством достижения желаемого результата и в сознании которого формируется цель деятельности. Если в качестве объекта выступает, например, маршрутная система, то цель её функционирования формируется в сознании действующих в системе участников – пассажиров, транспортных предприятий и должностных лиц, ответственных за организацию её работы. Именно эти варианты цели и являются объективными, так как присущи объекту исследования.

Каждый из активных участников имеет собственное представление о желаемых результатах своей деятельности в рамках транспортной системы. Эти цели могут быть частично, или даже полностью, противоположными. Общую цель функционирования системы можно отобразить, если задаться определенными приоритетами значимости участников системы и формализовать цель каждого из них в виде частных критериев.

В демократическом государстве такие приоритеты формируются на основе принципа равноправия граждан. Они закреплены статьями 21 и 24 Конституции Украины, поэтому общий критерий эффективности многих транспортных систем может быть записан как простая сумма частных критериев:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^{N_y} \mathcal{E}_i, \quad (3.12)$$

где \mathcal{E} – критерий эффективности объекта исследования; \mathcal{E}_i – частный критерий эффективности i -го участника объекта; N_y – количество участников объекта, которые осуществляют в нем свою деятельность.

Под эффективностью объекта здесь и далее понимается показатель, характеризующий качество его работы, а под качеством – совокупность свойств объекта, обуславливающих его способность удовлетворять потребности, в соответствии с его предназначением.

В связи с этим показатель эффективности должен полностью отражать цель создания и функционирования объекта исследования и вполне может быть представлен общей зависимостью (3.1), характеризующей позитивные и негативные стороны в способности объекта удовлетворять потребности пользователя. Однако утверждения, отраженные в (3.12) и (3.1), в полной мере относятся только к функционированию существующего объекта и текущей деятельности его участников, в рамках оперативного управления работой объекта, так как не учитывают разнообразных условий решения оптимизационных задач.

Эти разнообразные условия могут возникать при изменении структуры объекта исследования, а именно такие решения могут, и должны, приниматься в рамках задач по повышению эффективности функционирования транспортных систем на текущем или перспективном уровне планирования. С учетом большего масштаба задач, объект исследования в этом случае будет иметь другие границы и других участников.

В деятельности человека, в частности, можно выделить две основные группы действий, которые находятся между собой в тесной взаимосвязи, но отличаются друг от друга по содержанию: принятие решений и их реализация.

С точки зрения текущего планирования работы, деятельность индивидуумов в существующей транспортной системе относится к реализации принятых

ранее решений относительно её параметров, а сама задача текущего планирования посвящена принятию решения о выборе параметров системы, которые позволят улучшить её работу. При отсутствии действующего варианта транспортных систем эта задача состоит в выборе параметров создаваемой системы, обеспечивающих её эффективную работу.

Принятие решений является одним из видов деятельности. Поэтому ему также присуще наличие объекта, осуществляющего деятельность и цель деятельности, сформированная в сознании участников объекта. Но при текущем планировании работы системы в качестве объекта выступают только те участники транспортной системы, которые инициируют принятие решений по изменению структуры системы и готовы потратить на это определенные ресурсы. Такие решения могут приниматься непосредственно органами управления рассматриваемого объекта, но в связи с возможной сложностью её структуры, принятие обоснованных решений в транспортной сфере зачастую невозможно, без использования научных методов исследования.

Роль научного исследования в этом случае заключается в выработке научно обоснованных решений, позволяющих достичь максимальной эффективности объекта. Организации и коллективы, которые производят научные решения, в этом случае выступают в роли субъекта. Субъект – индивид (или социальная группа), который познаёт, обладает сознанием и активно действует. В этом смысле объект исследования – процессы, на которые направлены познавательная или иная деятельность субъекта.

Таким образом, при принятии решений объект исследования представляет собой деятельность групп лиц, только часть, которых, обычно выступает в роли заказчика – субъекта, который имеет определенные намерения и готов потратить некоторые ресурсы или возможности для их реализации. Тогда результаты исследования предназначены для группы людей, которых представляет заказчик (или одного человека в частном случае).

Вторым принципом определения цели и формирования критерия эффек-

тивности является необходимость отражения в критерии интересов заказчика при решении задач по повышению эффективности функционирования транспортных систем.

Для большинства как фундаментальных, так и прикладных исследований характерно наличие такого заказчика. Исключения могут составлять только работы, которые выполняются одним исследователем или группой исследователей по собственной инициативе. Но и это только надуманные исключения, так как в этом случае заказчик и исполнитель выступают как одно лицо, но адресат для результатов тот же – группа людей (один человек). Поэтому в дальнейшем постановка задачи по определению эффективности работы транспортной системы основана на наличии заказчика исследования.

Сначала будет рассмотрен самый простой вариант при определении цели функционирования объекта исследования – когда оно предназначается для одного человека.

Для этого случая можно провести довольно простую цепочку умозаключений, основанных на следующих допущениях о цели жизнедеятельности человека:

Допущение 1. Целью, которую преследует в жизни каждый человек, является максимальное удовлетворение его потребностей.

Потребность – состояние, обусловленное неудовлетворенностью требований организма и направленное на устранение этой неудовлетворенности. Потребности могут носить самый разнообразный характер, и любое действие человека, в конечном итоге, имеет целью их удовлетворение. То есть вся жизнедеятельность человека представляет собой совокупность действий, направленных на достижение удовлетворения потребностей. Для достижения этой цели необходимо не только наличие разнообразных средств удовлетворения потребностей, но и наличие прав доступа к ним.

Третьим принципом определения цели и формирования критерия эффективности объекта исследования выступает ограниченность средств удовлетво-

рения потребностей человека, которая предопределяет наличие в жизнедеятельности человека двух её видов, направленных на:

- собственно удовлетворение потребностей (природных, культурных, интеллектуальных, нравственных и т.д.);
- получение прав доступа к средствам удовлетворения потребностей (экономическая деятельность, затраты сил, времени и т.д.).

Тогда, в общем случае, каждый поступок может включать в себя элементы обоих видов деятельности, то есть быть направленным на достижение обеих целей, как на собственно удовлетворение потребностей, так и на получение прав доступа к средствам их удовлетворения.

Наличие заказчика при решении задач в сфере транспортных систем обуславливает тот факт, что все эти исследования направлены или непосредственно на повышение степени удовлетворения потребностей заказчика, или на расширение возможностей заказчика в доступе к средствам удовлетворения его потребностей.

Если ввести понятие весового значения (удельного содержания) каждой из двух подвидов деятельности в поступке или намерении, то для них можно записать

$$S_y + S_\partial = 1, \quad (3.13)$$

где S_y , S_∂ – весовое значение непосредственного удовлетворения потребностей и получения прав доступа к средствам их удовлетворения соответственно.

Следующее допущение касается значений удельного содержания S_y и S_∂ в зависимости от сферы жизнедеятельности, в которой решаются задачи исследования.

Допущение 2. Область жизнедеятельности человека, в которой значения

S_y и S_δ близки друг к другу, достаточно узка. Графически это допущение представлено на рис. 3.1.

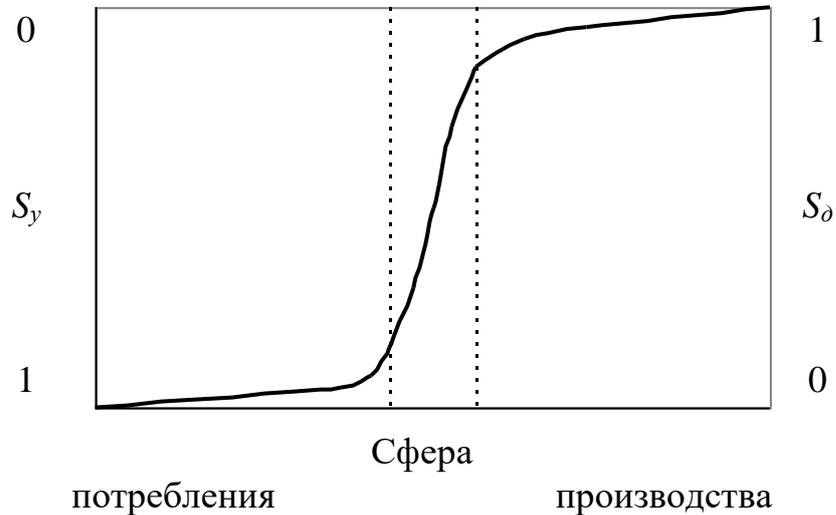


Рисунок 3.1

С учетом допущения 2 можно утверждать, что для подавляющего большинства действий или намерений одно из весовых значений R_y и R_δ значительно превышает другое.

$$\begin{cases} S_y \gg S_\delta, \text{ для сферы потребления} \\ S_\delta \gg S_y, \text{ для сферы производства} \end{cases} \quad (3.14)$$

С учетом (3.14) для деятельности в сфере производства или потребления, без существенных погрешностей полагаем, что минимальное значение удельного содержания подцели равно нулю.

$$\begin{cases} S_\delta \approx 0, \text{ для сферы потребления} \\ S_y \approx 0, \text{ для сферы производства} \end{cases} \quad (3.15)$$

Теперь можно утверждать, что в сфере производства основной целью де-

ятельности человека является получение прав доступа к средствам удовлетворения потребностей. Так как общепринятым эквивалентом обмена товарами, в том числе и средствами удовлетворения потребностей, являются деньги, то в наибольшей степени цель деятельности человека в сфере производства отражается в получении дохода и, соответственно, доход должен выступать в качестве результата в критерии эффективности при решении задач в этой сфере.

Допущение 3. При решении задач в сфере производства в качестве результата в критерии эффективности должен выступать доход объекта.

$$R = D, \quad (3.16)$$

где D – доход от деятельности транспортного объекта.

С учетом (3.15), в сфере потребления целью деятельности является непосредственное удовлетворение потребностей человека.

Свойство приносить пользу, то есть удовлетворять потребности, называется полезностью, поэтому в сфере потребления результатом является степень удовлетворения потребностей или, иными словами, потребленная полезность.

Допущение 4. В сфере потребления результатом является степень удовлетворения пользователей объекта или, другими словами, потребленная (полученная) ими полезность.

$$R = U, \quad (3.17)$$

где U – полученная пользователями объекта полезность.

Относительно затрат на достижение результата для рассматриваемой группы объектов можно сделать достаточно корректное в обеих сферах деятельности допущение, которое основано на том, что среди затрат на достижение большинства результатов самую значительную часть составляют затраты труда и собственности. Эти виды ресурсов являются предметом обмена и, со-

ответственно, имеют стоимостной эквивалент, поэтому можно сформулировать

Допущение 5. При определении затрат на достижение результата, в большинстве случаев достаточно использования только финансовых затрат.

При принятии этого допущения критерий (3.1) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = U - Z \rightarrow \max, \text{ для сферы потребления} \\ \mathcal{E} = D - Z \rightarrow \max, \text{ для сферы производства} \end{cases}, \quad (3.18)$$

где Z – финансовые затраты на достижение результата.

Остается только определить, каким образом должны учитываться сопутствующие результаты (3.2). Их появление в (3.1) в случае субъективного подхода к построению критерия обусловлено обширными последствиями функционирования объекта исследования.

Говоря о месте сопутствующих результатам в описанной выше последовательности действий необходимо вспомнить о наличии в ней заказчика и его конкретных целях, которые должна отражать цель исследования транспортного объекта. Этими целями, как было отмечено раньше, могут быть либо непосредственное удовлетворение потребностей заказчика, либо получение (расширение) прав доступа к средствам удовлетворения потребностей. Поэтому, если какие-то последствия функционирования объекта исследования не относятся к этим двум подцелям, или к затратам (потерям) заказчика, то они его не интересуют и не должны учитываться в критерии эффективности. Следовательно они не должны находить своего отражения в (3.18), то есть в желаемых результатах и затратах на их достижение.

Если какие-то последствия функционирования объекта все же оказывают влияние на эффективность исследования, несмотря на отсутствие отражающих их показателей в критерии после его вывода, то это означает, только то, что в процессе вывода был охвачен не весь спектр результатов, или не учтены важ-

ные для заказчика затраты. Тогда модель целей, представленная критерием эффективности, оказалась не достаточно точна. Такая ситуация вполне возможна, так как критерий (3.18) построен на целом ряде допущений и она может свидетельствовать о некорректности некоторых из них в данной, конкретной ситуации.

В этом случае либо в результатах, либо в затратах может появляться дополнительная составляющая и возникать необходимость определения степени её влияния на критерий. Ситуация внешне аналогична многокомпонентному критерию.

Например, возможен случай, когда заказчик не хочет сокращать количество рабочих мест на своем предприятии, даже если это приводит к повышению его эффективности. С точки зрения критерия (3.18) это означает, что для этого заказчика целью работы предприятия является не только получение дохода, но и содержание рабочих мест (некорректно допущение о том, что исключительной целью экономической деятельности является получение дохода). Поэтому наличие рабочих мест для заказчика – составляющая результата. Вновь в одном критерии появляются составляющие, имеющие разный физический смысл.

Но для рассматриваемого случая, когда заказчиком является один человек, соотношение этих целей выяснить достаточно просто, так как оно определяется отношением заказчика к этим факторам. Формально это выглядит как определение вида функции:

$$R = f(D, N_{pm}), \quad (3.19)$$

где N_{pm} – количество рабочих мест на предприятии.

С этой целью возможно использование какой-либо разновидности метода обследования намерений, либо других методов, основанных на фактических действиях заказчика в ситуациях принятия решений до начала исследований.

При этом нет необходимости использовать принципы и методы решения многокритериальных задач и принятия субъективных решений, поскольку отношение заказчика к результатам и есть объективная оценка целей функционирования объекта исследования.

В общем случае (3.19) можно записать как

$$R = f(D, U, Z, X), \quad (3.20)$$

где X – фактор, который не был учтён в критерии.

В отдельных случаях определение вида зависимости результатов от различных составляющих может приводить не к расширению критерия (3.18), а к появлению новых ограничений в постановке задачи, но зависит это только от вида связи (3.20).

Таким образом, в частных случаях, когда не все допущения из числа перечисленных могут быть признаны корректными, возможно более широкое толкование критерия эффективности объекта исследования (3.1), чем (3.18).

Однако такие случаи не опровергают утверждения об отсутствии необходимости учета сопутствующих результатов, а только свидетельствуют о комплексности понятий результатов и затрат, и для критерия эффективности (3.1) должно быть принято равенство:

$$\forall R_c = 0. \quad (3.21)$$

Это равенство вовсе не отрицает существования сопутствующих результатов, они были, есть и будут. Оно лишь указывает на то, что сопутствующие результаты не должны присутствовать в критерии эффективности объекта исследования и общий вид критерия всегда будет иметь вид (3.1). В нем должны быть отражены только показатели, в изменении которых заинтересован заказчик.

Более сложный случай возникает тогда, когда заказчиком является группа лиц или единственный заказчик представляет интересы группы лиц. Повышенная сложность здесь обусловлена возможным существованием противоречий внутри любой группы людей при ограниченных ресурсах.

Но эти сложности возникают далеко не всегда. Можно, например, вспомнить о том, что предприятие, как заказчик исследования, представляет интересы всех своих работников, количество которых может быть достаточно большим. Тем не менее, проблем с определением критерия эффективности предприятий обычно не возникает.

Если сложности все же существуют, то в основном они относятся к установлению вида зависимости результатов и затрат при некорректности каких-либо допущений, сделанных в начале раздела. Эти сложности преодолимы, если учесть, что любой заказчик представляет собой конечное множество индивидуальных заказчиков.

Если при рассмотрении данного вопроса пользоваться терминологией системного исследования, то перед формированием критерия эффективности нужно четко определить задачи исследования, то есть выделить *целевой сегмент*, для которого оно проводится. После этого определить, в соответствии с (3.1) и (3.18) в чем заключается результат, к которому стремятся объекты, составляющие целевой сегмент, и какие затраты они несут на достижение этого результата, то есть сформировать частные критерии эффективности для каждого i -го элемента целевого сегмента.

Сопутствующие результаты не должны учитываться в частных критериях. Они могут выступать в качестве параметров, от которых зависят значения результатов или затрат, но их использование теперь будет определяться только степенью их влияния на составляющие критерия.

Не существует принципиальных ограничений по количеству элементов, составляющих целевой сегмент. В него могут входить элементы с противоположными интересами, важно только, чтобы они имели кроме противоречий и

общие цели, а это условие выполняется практически всегда.

После определения частных критериев для всех элементов, составляющих целевой сегмент, определяется критерий эффективности объекта исследования как сумма частных критериев.

$$\mathcal{E} = \sum_i^{n_3} \mathcal{E}_i, \quad (3.22)$$

где n_3 – количество индивидуальных заказчиков; \mathcal{E}_i – критерий эффективности i -го заказчика.

Описанная последовательность действий создает возможность получения общего критерия эффективности для исследования. Его упрощения возможно путем построения дополнительной системы ограничений и допущений, если в этом есть смысл и условия задачи позволяют сделать это.

Теперь можно сформулировать последний принцип определения цели и формирования критерия эффективности объекта исследования.

Четвертый принцип определения цели и формирования критерия эффективности объекта исследования состоит в том, что критерий эффективности должен отражать только те стороны функционирования объекта, в которых заинтересован заказчик исследования.

Но, как известно, кроме линейного критерия, на практике существуют еще подходы, в которых в качестве критерия используются относительные, а не абсолютные показатели. Причем в знаменателе такого критерия в основном используется какая-либо характеристика расходов и этот случай можно описать таким вариантом критерия (3.1).

$$\mathcal{E} = R/C \quad (3.23)$$

Чтобы избавиться от неопределенности, какой критерий абсолютный

(3.1) или относительный (3.23) стоит использовать, целесообразно рассмотреть возможные результаты использования обоих критериев при различных постановках задачи, с точки зрения использования выделенных для достижения результатов ресурсов.

Первая постановка предполагает наличие у заказчика неограниченных ресурсов, которые он готов потратить на достижение желаемого результата. Однако вряд ли её можно считать реальной, а приводится она здесь, собственно, только для того, чтобы обозначить её нереальность. Такая задача вряд ли могла бы быть решенной с помощью математического моделирования, поскольку для безграничного объёма ресурсов существует и бесконечное количество вариантов их использования для достижения результата. Да и попробуйте решить такую задачу – купить как можно больше мяса (например) за как можно меньшую сумму. Такая постановка задачи является нереальной именно из-за отсутствия ограничений и иллюстрирует их актуальность при отсутствии установленной связи между результатом и затратами на его достижение.

При рассмотрении транспортных систем правильным будет всегда исходить из ограниченности ресурсов, которые можно использовать на достижение цели и считать, что для первой постановки задачи нет необходимости в использовании критерия эффективности.

Вторая постановка предполагает наличие у заказчика ограниченного объёма ресурсов, которые он готов потратить на достижение желаемых результатов:

$$C_f \leq C_{f \max}, \quad (3.23)$$

где $C_{f \max}$ – максимально возможный объём ресурсов f -го вида на достижение результатов.

При полном использовании всех доступных ресурсов $C_{f \max} = const$ и операция деления становится просто лишней, оба критерия, (3.1) и (3.23) будут приводить к одному и тому же оптимальному результату.

Если же ресурсы могут использоваться не полностью, то сокращение расходов будет приводить к ускоренному росту критерия (3.23) и он может привести к выбору оптимального результата с незначительными затратами ресурсов, $C_{f_{opt}} \ll C_{f_{max}}$. Но это означает, что относительный критерий укажет на вариант с максимальным результатом только при наличии приемлемых вариантов использования неиспользованных ресурсов $C_{f_{max}} - C_{f_{opt}}$. В то же время общий критерий требует рассмотрения всех вариантов использования средств для достижения результатов и всегда укажет на вариант с максимальным результатом, тем самым обеспечивая максимальную эффективность принимаемых решений.

Однако приведенные выше соображения касаются тех задач, для которых корректным является допущение 5 о возможности описания всех затрат на достижение результатов, с помощью финансовых показателей. При решении задач исследования транспортных объектов это допущение является корректным в большинстве случаев, а достигается это в основном за счёт того, что функционирование объекта рассматривается в течение какого-то, постоянного периода времени. Например: время оборота – для пассажирского маршрута, период пик – для систем организации дорожного движения, рабочий день – для маршрутных систем городского пассажирского транспорта, год – для транспортной системы страны и т.д.

Такая постановка задачи позволяет не учитывать в C – затратах всех видов ресурсов на достижение результатов функционирования объекта из (3.1), такой важный ресурс как время, необходимое на достижение результата.

Однако существуют транспортные системы, в которых это время не может считаться постоянным. Ярким примером таких систем является перевозка грузов по разовым заявкам в междугородном или в международном сообщении.

Результатом деятельности автотранспортных предприятий, которые функционируют на рынке разовых заказов, является доход от перевозок за обо-

ротный рейс, который начинается и заканчивается в месте дислокации предприятия. Продолжительность этого рейса является случайной, так как при отправке в рейс заранее неизвестны не только затраты времени на выполнение отдельных элементов транспортного процесса, но и итоговый пробег транспортного средства. Зачастую случайным является даже количество ездов с грузом за оборотный рейс. Получение одного и того же дохода от перевозки грузов за разное время являются разным результатом для транспортного предприятия, чем больше времени на это потрачено, тем менее эффективным был оборотный рейс. Поэтому расходы на эту деятельность полностью могут быть описаны минимум двумя видами ресурсов: финансовыми затратами на обеспечение транспортного процесса и затратами времени на достижение результата. С учетом этого, а также того, что этот вид деятельности априори относится к экономической активности, целью которой является получение дохода, критерий (3.1) принимает следующий вид:

$$\Xi = D_{об} - Z_{об} - V_{об} \cdot k_v \rightarrow \max, \quad (3.24)$$

де $D_{об}$ – доход транспортного предприятия за оборотный рейс; $Z_{об}$ – финансовые затраты на выполнение оборотного рейса; $V_{об}$ – затраты времени на выполнение оборотного рейса; k_v – переводной коэффициент, учитывающий стоимость единицы времени работы транспортного средства.

Переводной здесь коэффициент необходим для того, чтобы решить проблему разного физического смысла слагаемых, появляющуюся в (3.24) в данном случае. Численное значение переводного коэффициента для каждого транспортного предприятия является некоторым ориентиром, основанным на достигнутом уровне доходности перевозок и собственном опыте работы, то есть субъективной величиной, которую уверенно можно считать постоянной для каждого перевозчика

$$k_b = \text{const.} \quad (3.25)$$

Получение объективной оценки этого коэффициента требует проведения дополнительных исследований, что не всегда является оправданным. Более целесообразным способом получения формулы для объективного критерия эффективности при выполнении разовых перевозок грузов является переход к удельной величине прибыли за оборотный рейс, путем деления зависимости (3.24) на время выполнения оборотного рейса

$$\mathcal{E}' = \frac{D_{об} - Z_{об} - V_{об} \cdot k_b}{V_{об}} = \frac{D_{об} - Z_{об}}{V_{об}} - k_b \rightarrow \max . \quad (3.26)$$

С учетом равенства (3.25), окончательный вариант критерия эффективности обслуживания транспортным предприятием разовых заказов на междугородные перевозки грузов имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}' = \frac{D_{об} - Z_{об}}{V_{об}} \rightarrow \max . \quad (3.27)$$

Этот критерий не имеет никаких противоречий и субъективных оценок и позволяет объективно оценить эффективность обслуживания разовых заказов на перевозку груза в междугородном сообщении. Он построен на описанной в данном подразделе последовательности формирования обоснованного критерия при исследовании транспортных объектов. При этом он имеет не линейный вид, что иллюстрирует гибкость подхода и возможность решения в его рамках вопросов, которые возникают при выполнении данного этапа системного исследования.

Приведенный способ получения частного критерия эффективности, пу-

тём деления общего критерия на одно из слагаемых, может пригодиться и в других случаях, когда в исходном критерии встречается какое-то слагаемое, имеющее иной физический смысл и иную единицу измерения, чем остальные элементы зависимости. Тогда не обязательно проводить исследования для установления соотношения между различными составляющими критерия, скорее всего для поиска оптимального (рационального) состояния системы вполне хватит частного критерия, подобного (3.27). Однако если в критерии встречается больше чем две группы слагаемых с разными единицами измерения, таким способом разрешить возникающие противоречия не удастся.

Подводя итоги описанию последовательности выбора цели и формирования критерия эффективности, можно утверждать, что благодаря ей, такой выбор из творческого процесса превращается в техническую процедуру, состоящую из следующих этапов:

1) Выделение целевого сегмента, то есть формирование круга лиц, интересы которых представляются заказчиком.

2) Определение вида частных критериев эффективности для каждого из заказчиков на основе (3.1).

а) определение сферы, к которой относится деятельность отдельного заказчика по изменению структуры объекта или по его созданию (потребление или производство) и проверка корректности допущения 2;

б) выделение ожидаемых заказчиком результатов (проверка корректности допущений 3 или 4);

в) определение расходов заказчика на достижение цели (проверка корректности допущения 5);

г) определение отношения заказчика к дополнительным факторам, которые его интересуют, если некоторые допущения не были признаны корректными;

3) свертка общего критерия эффективности по зависимости (3.22).

В данном подразделе был рассмотрен пример транспортного объекта,

действующего в экономической сфере, но многие транспортные объекты имеют социальный характер, направленный на удовлетворение потребностей их пользователей, что вносит дополнительные сложности в описанный процесс. Поэтому в следующем материале подробно рассмотрен пример формирования критерия именно для такого объекта.

3.3 Обоснование критерия эффективности для маршрутных систем городского пассажирского транспорта

Применение описанного выше подхода целесообразно проиллюстрировать на примере исследования пассажирской транспортной системы города, функционирование которой сопровождается разнообразными экономическими, социальными и экологическими последствиями.

Это разнообразие возникает вследствие большого количества и активной деятельности в городской маршрутной системе её участников, имеющих собственные мотивацию и полномочия. Её работа, так или иначе, касается подавляющего количества всех горожан, однако в большинстве исследований можно ограничиться рассмотрением трёх групп участников:

- пассажиров городских маршрутов, которые формируют спрос на маршрутные пассажирские перевозки и полностью или частично оплачивают работу других участников транспортного процесса;
- транспортных предприятий, выполняющих работу на городских маршрутах на основе договоров с органами местной власти;
- органов местной власти, организующих, руководящих и контролирующих транспортный процесс, а также распределяющих некоторую часть доходов между транспортными предприятиями (в соответствии со сложившейся в Украине практикой).

Приведенный перечень охватывает непосредственно действующих в системе участников и соответствует как действующему законодательству, так и перечню элементов транспортных систем.

Существуют и другие, кроме горожан, участники процесса функционирования таких систем, например центральные органы государственной власти и контролирующие органы. Однако их влияние на транспортный процесс сводится в основном только к формированию законодательных, административно-правовых, ведомственных и других требований и контролю их выполнения. Поэтому при решении задач повышения эффективности маршрутного пассажирского транспорта в городах эти требования целесообразно учитывать не в критерии эффективности, а в системе ограничений. При этом описанные органы правильнее учитывать как элементы внешней среды.

Необходимо также помнить, что владельцы, равно как и работники участников (юридических лиц) и физические лица (участники транспортного процесса, пассажиры) являются как жителями города, так и гражданами государства, поэтому несут административно-правовую ответственность за свою деятельность в рамках действующего законодательства, что также нужно учитывать в системе ограничений при решении рассматриваемого круга задач.

Кроме этого, органы местной власти несут перед жителями города ответственность за свою деятельность в рамках избирательного процесса органов местного самоуправления, что определяет их мотивацию при выполнении функций управления маршрутной системой.

На этом общее описание мотивации и полномочий субъектов системы маршрутного пассажирского транспорта в городах, в рамках действующего законодательства, при отсутствии благотворительных акций и целевых государственных или внебюджетных программ, можно считать законченным. Это позволяет перейти к учету экономических, социальных и экологических последствий работы городских маршрутов.

В современной транспортной науке сформирован достаточно широкий перечень показателей работы городских маршрутов пассажирского транспорта и маршрутной системы вообще. Этот перечень иногда пополняется, в качестве новых характеристик используются различные комбинации отдельных пара-

метров из числа существующих, однако достаточно четкую общую классификацию этих факторов в литературных источниках найти сложно. Поэтому стоит сформировать конкретный перечень показателей, которые могут выступать в качестве целей функционирования маршрутной системы города.

Согласно определению потребительской (социальной) и производственной (экономической) сфер человеческой деятельности, а также определению экологии как научной дисциплины, предметом которой является изучение закономерностей влияния общества на биосферу и тех изменений в ней, которые влияют на общество в целом и каждого человека в отдельности, возможна такая градация параметров работы маршрутного транспорта:

– экономические параметры – все показатели работы маршрутов и маршрутной системы в целом, имеющих денежное измерение без дополнительных числовых или логических преобразований (доходы и расходы участников транспортного процесса, стоимость различных продуктов и услуг, величина налогов и т.д.);

– экологические параметры – показатели работы маршрутов и маршрутной системы в целом, характеризующие влияние транспортного процесса на окружающую среду (количество вредных веществ, уровень загрязнения различных элементов окружающей среды, площадь участков земли, занятой сооружениями транспорта и т.д.);

– социальные параметры – другие показатели работы маршрутов и маршрутной системы в целом, которые могут оказывать влияние на участников транспортного процесса и использоваться ими, или другими лицами, для принятия решений относительно объекта исследования (натуральные характеристики передвижений пассажиров и использования транспортных средств, временные характеристики элементов транспортного процесса, пространственные характеристики маршрутной схемы и прочее).

Необходимости в отдельном описании экономических параметров объекта исследования нет, поскольку в отношении к ним участников транспортного

процесса нет никаких особенностей, по сравнению с другими сферами человеческой деятельности.

Получение относительной характеристики остальных показателей должно обеспечивать соблюдение принципа объективности параметров в критерии эффективности. В данном случае нецелесообразно использовать методы обследования намерений, как не обеспечивающие объективности результатов оценки, в случае большого количества участников. Более правильным здесь является использование специальных методов для изучения отношения участников транспортного процесса к параметрам работы маршрутной системы.

Роль пассажиров, как потребителей, в процессе функционирования маршрутной системы, полностью относит их деятельность к сфере удовлетворения потребностей, несмотря на некоторые исключения, например, служебные поездки. Но и эти исключения носят условный характер, поскольку относятся к источнику возникновения потребности, а не к роли пассажиров как потребителей услуг транспорта.

В соответствии с этим, результатом деятельности пассажиров в маршрутной системе является степень удовлетворения их потребностей в передвижениях (полезность передвижений), а расходами – затраты всех видов ресурсов пассажиров, в том числе стоимостных и натуральных, на осуществление передвижения. С целью формализации цели и получения критерия эффективности в этом случае необходимо установить вид зависимости, определяющей отношение пассажиров к натуральным и стоимостным показателям передвижений.

Получение относительной характеристики стоимостных и натуральных показателей в критерии эффективности маршрутной системы возможно за счет изучения фактического поведения пассажиров в транспортной системе, параметров системы и специальных методов их обработки. Такая возможность обусловлена активной ролью пассажиров в маршрутной системе, наличием альтернативных вариантов удовлетворения потребностей в передвижениях, и высокой частотой использования транспорта, поскольку для большинства город-

ских жителей Украины самая частая покупка – это поездка в транспорте. Каждый раз, совершая передвижения, пассажир "голосует" за качество транспортного обслуживания своим выбором. Проблема оценки предпочтений пассажиров заключается только в выборе соответствующего инструмента, который позволяет учесть сложный, относительный характер выбора варианта среди нескольких альтернатив. Возможным вариантом такого инструментария являются модели дискретного выбора или модели, специально разработанные для анализа поведения пассажиров общественного транспорта [22].

С помощью таких методов возможна оценка отношения пассажиров, но только для тех показателей, которые сам пассажир может учесть при выборе вариантов пути передвижения. Это полностью относится к экономическим факторам, равно как и к подавляющему большинству социальных факторов.

В то же время пассажир не имеет средств измерения большинства экологических параметров, поскольку в обычном случае для этого нужна специальные методы и соответствующая аппаратура. Кроме этого, реальные колебания значений экологических параметров не влияют мгновенно на состояние людей и поэтому обычно не учитываются ими при выборе вариантов пути передвижения. Поэтому отношение пассажиров к экологическим факторам в основном проявляется в их гражданской позиции и реализуется в политической деятельности граждан – пассажиров маршрутных систем, минимально – через их участие в избирательном процессе.

Через избирательное право также реализуются пожелания пассажиров по повышению качества работы маршрутов, то есть улучшению экономических и социальных параметров работы маршрутной системы. С учетом такой роли и мотивации пассажиров городского маршрутного транспорта, ответственность за выработку и принятие решений в этом случае лежит на городской администрации, как ответственном избирательном органе власти, поэтому будет рассмотрена позже.

Деятельность следующего участника функционирования объекта иссле-

дования – транспортных предприятий, полностью относится к экономической сфере, то есть в сферу получения прав доступа к средствам удовлетворения человеческих потребностей. В соответствии с этим, результатом деятельности транспортных предприятий является доход от перевозок пассажиров, а расходами – финансовые затраты на организацию и реализацию транспортного процесса. Для транспортных предприятий имеют стоимостную оценку также и экологические параметры их работы, поскольку функции транспортных предприятий в обеспечении экологической безопасности работы транспорта сводятся к выполнению соответствующих нормативов и требований при осуществлении производственной деятельности. Стоимость выполнения нормативов и требований, равно как и финансовые последствия их невыполнения, всегда могут быть определены относительно легко.

Поскольку связь между доходами и затратами в критерии (3.1) носит достаточно простой характер, проблем с их учетом не возникает.

Деятельность городских властей в процессе функционирования маршрутной системы, как и в предыдущем случае, с транспортными предприятиями, относится к экономической сфере получения прав доступа к средствам удовлетворения потребностей людей. Но администрация города должна решать задачи управления, а форма её ответственности перед жителями города, через избирательный процесс, весьма специфична. Поэтому основными функциями городских органов власти в этом процессе является разработка условий работы и правил поведения других участников транспортного процесса (в рамках действующего законодательства) и контроль над соблюдением этих правил.

На уровне городских властей решаются практически все вопросы рациональной организации работы маршрутной системы, ответственность за результаты её работы также лежит на городской администрации, отношение которой к социальным параметрам работы городской маршрутной сети определяется пассажирами; к экономическим – пассажирами и транспортными предприятиями, к экологическим – отношением жителей города и государственной поли-

тикой, то есть, в конечном итоге, отношением к этому вопросу граждан всего государства и мировыми требованиями.

Непосредственно жители города в первую очередь заинтересованы в учете социальных и экономических параметров маршрутной системы. Учёт администрацией города экологических последствий работы городского пассажирского транспорта может потребоваться в случае специальных – экологических, а не транспортных, исследований или прямого требования заказчика.

В соответствии с перечнем участников транспортного процесса, первым вариантом заказчика являются пассажиры. В этом случае критерий эффективности должен отражать результаты работы пассажирской транспортной системы с точки зрения пассажиров. Такой вариант заказчика возможен при наличии общественных или иных организаций, созданных для защиты интересов пассажиров, которые имеют необходимые ресурсы для решения технологических вопросов работы маршрутов пассажирского транспорта или для решения более общих вопросов управления всей маршрутной системой.

Если целевым сегментом являются пассажиры, то результатом для каждого из них является удовлетворение городскими маршрутами потребностей в передвижениях (изменениях места расположения), а затратами на его достижение – все виды ресурсов, которые пассажир тратит на осуществление передвижений, в том числе их продолжительность и стоимость. Критерий эффективности работы маршрутной системы j -го пассажира будет иметь такой вид:

$$\mathcal{E}_n = \sum_{k=1}^{N_n} (U_k - \sum_{i=1}^n a_i \cdot c_{ik}) \rightarrow \max, \quad (3.28)$$

где \mathcal{E}_n – критерий эффективности маршрутной системы города с точки зрения пассажира; N_n – количество передвижений пассажира за рассматриваемый период, ед.; U_k – полезность k -й смены местоположения, характеризующая степень удовлетворения потребностей пассажира (результат k -го пере-

движения); n – количество значимых видов затрат ресурсов пассажира на осуществление k -го передвижения; a_i – коэффициент значимости затрат i -го вида ресурсов пассажира на осуществление передвижения; c_{ik} – расходы i -го вида ресурсов пассажира на осуществление k -го передвижения.

В этом случае всегда возникает вопрос расчета коэффициентов значимости при параметрах пути передвижения, для которого рекомендуется использование специальных методов моделирования, как уже отмечалось выше. При формировании критерия они считаются известными и постоянными для всех пассажиров, а вопрос определения общего критерия эффективности для всего целевого сегмента «пассажиры» решается на основе принципа равноправия с помощью выражения (3.22).

$$\mathcal{E}_n = \sum_{j=1}^{N_3} \mathcal{E}_{nj} = \sum_{j=1}^{N_3} \sum_{k=1}^{N_{nj}} (U_{kj} - \sum_{i=1}^n a_i \cdot c_{ikj}) \rightarrow \max, \quad (3.29)$$

где E_n – критерий эффективности пассажирской транспортной системы города с точки зрения пассажиров; N_3 – количество заказчиков (пассажиров) в городе, перевозимых за рассматриваемый период.

Коэффициенты значимости при затратах у разных пассажиров часто имеют одинаковые значения для всего целевого сегмента. Такой случай возникает, когда изучается отношение к транспортным факторам выборочным методом, результаты которого распространяются на всю генеральную совокупность. Тогда выражение (3.29) целесообразно перегруппировать, объединяя результат передвижений для всех пассажиров и расходы пассажиров в соответствующие составляющие общего социального эффекта.

$$\mathcal{E}_n = \sum_{j=1}^{N_3} \sum_{k=1}^{N_{nj}} U_{kj} - \sum_{j=1}^{N_3} \sum_{k=1}^{N_{nj}} \sum_{i=1}^n a_i \cdot c_{ikj} \rightarrow \max. \quad (3.30)$$

Теперь положительная и отрицательная составляющие выражения эффективности представляют собой общие результаты и затраты пассажиров на передвижение за рассматриваемый период, за счёт чего критерий эффективности целевого сегмента пассажиры приобретает свой конечный вид:

$$\mathcal{E}_n = U_n - C_n \rightarrow \max, \quad (3.31)$$

где U_n – суммарная полезность передвижений для пассажиров маршрутной системы города; C_n – общие натуральные и стоимостные затраты пассажиров на осуществление передвижений за рассматриваемый период.

Вторым вариантом заказчика являются пассажирские транспортные предприятия, выполняющие работу на городских маршрутах и соответственно критерий эффективности в этом случае должен отражать результаты работы пассажирской транспортной системы с точки зрения владельцев этих предприятий. Такой вариант заказчика возможен при наличии одного или нескольких предприятий, которые вместе действуют в этом направлении. Это также возможно при наличии организаций, созданных для защиты интересов транспортных предприятий, которые имеют необходимый потенциал для решения отдельных технологических вопросов работы маршрутов пассажирского транспорта или для решения более общих вопросов управления всей маршрутной системой.

Второй вариант целевого сегмента не обязательно имеет высокую вероятность реализации в современных условиях, когда основным видом взаимодействия между перевозчиками является конкурентная борьба. Для одного относительно мелкого перевозчика нет смысла в решении задачи управления всей маршрутной системой и такой подход реален только в случае высокого уровня монополизма городских перевозок или при решении отдельных технологических вопросов работы одного или нескольких маршрутов, то есть при третьем варианте системного анализа. Однако и этот заказчик может быть рас-

смотрен для достижения общности примера.

С учетом описанной в предыдущем разделе системы допущений и уравнения (3.14), критерий эффективности для второго сегмента формируется на основе выражения для экономической деятельности, поэтому результатом для них будет доход, а расходами – капитальные и текущие затраты на производство транспортной продукции. Для одного, l -го, транспортного предприятия критерий эффективности будет иметь следующий вид:

$$\mathcal{E}_{mnl} = D_{mnl} - C_{fmnl} \rightarrow \max, \quad (3.32)$$

где \mathcal{E}_{mnl} – критерий эффективности пассажирской транспортной системы города с точки зрения l -го транспортного предприятия; D_{mnl} , C_{fmnl} – доходы от перевозок и финансовые затраты на реализацию транспортного процесса l -го транспортного предприятия за рассматриваемый период соответственно.

Если заказчиком выступают несколько предприятий, то для них должен приниматься единый критерий эффективности, который в наиболее распространенном случае равноправия участников целевого сегмента формируется на основе выражения (3.22):

$$\mathcal{E}_{mn} = \sum_{l=1}^{N_{mn}} \mathcal{E}_{mnl} = \sum_{l=1}^{N_{mn}} (D_{mnl} - C_{fmnl}) \rightarrow \max, \quad (3.33)$$

где \mathcal{E}_{mn} – критерий эффективности пассажирской транспортной системы города с точки зрения транспортных предприятий-заказчиков; N_{mn} – количество транспортных предприятий-заказчиков.

Как и в предыдущем случае, составляющие выражения эффективности целесообразно перегруппировать, объединяя результаты работы на маршрутах для всех транспортных предприятий и их финансовые расходы

$$\mathcal{E}_{mn} = \sum_{l=1}^{N_{mn}} D_{mnl} - \sum_{l=1}^{N_{mn}} C_{fml} = D_{mn} - C_{fmn} \rightarrow \max, \quad (3.34)$$

где D_{mn} , C_{fmn} – соответственно суммарные доходы от перевозок и затраты на реализацию транспортного процесса всех предприятий-заказчиков за рассматриваемый период.

Возможен также и третий вариант заказчика – городские власти, которые в идеальном случае учитывают интересы обоих предыдущих участников. Наличие собственных интересов в работе маршрутной системы у органов местного самоуправления не предусмотрено государственным законодательством, но у них есть интерес в повышении эффективности работы маршрутной системы для привлечения на свою сторону избирателей, которыми являются и пассажиры, и работники транспортных предприятий. Поэтому для такого заказчика возможной является постановка задачи исследования, когда ставится задача повышения эффективности работы маршрутной системы сразу для этих двух групп заказчиков.

Описанная выше последовательность формирования критерия эффективности транспортных систем, в самом простом случае с равной значимостью всех участников, в такой постановке задачи приводит к сумме критериев (3.31) и (3.34).

$$\mathcal{E}_{\text{п+тп}} = \mathcal{E}_{\text{п}} + \mathcal{E}_{\text{тп}} \rightarrow \max, \quad (3.35)$$

где $\mathcal{E}_{\text{п+тп}}$ – критерий эффективности сегмента «пассажиры + транспортные предприятия».

При использовании этого критерия необходимо учитывать, что доходы транспортных предприятий состоят из платы за проезд, которую вносят пассажиры, и компенсации стоимости проезда льготных категорий пассажиров.

Способ начисления компенсации пропорционален количеству обслуженных пассажиров льготных категорий, с тем же тарифом, что и у обычных пассажиров. При едином тарифе на перевозку пассажира доход всех транспортных предприятий, которые работают на городских маршрутах будет равен:

$$D_{mn} = \sum_{l=1}^{N_{mn}} \sum_{k=1}^{Q_l} T_{lk} = Q \cdot T, \quad (3.36)$$

где Q_l – объём перевозки пассажиров l -го транспортного предприятия за рассматриваемый период; T_{lk} – стоимость проезда k -го пассажира при использовании маршрута l -го транспортного предприятия, пусть $T_{lk} = \text{const} = T$; Q – общий объём перевозки пассажиров всеми транспортными предприятиями за рассматриваемый период; T – единый тариф на перевозку пассажиров.

Единый тариф на перевозку пассажиров вводится здесь для простоты изложения, никакого влияния на выводы это допущение не оказывает. Следует также обратить внимание на то, что общий объём перевозки пассажиров всеми транспортными предприятиями равен количеству поездок всех пассажиров за рассматриваемый период:

$$Q = \sum_{j=1}^{N_s} N_{nj}. \quad (3.37)$$

Стоимость проезда в свою очередь также является одним из видов затрат пассажиров на передвижение в маршрутной системе города и, соответственно, одним из слагаемых в правой части выражения (3.30). Чтобы иметь возможность для объединения критериев (3.31) и (3.34) в единый критерий, тариф в (3.30) нужно выделить в отдельное слагаемое и пусть это будет последнее, n -е слагаемое. Пользуясь свойством коммутативности сумм и учитывая (3.37), выражение (3.30) можно переписать так:

$$\mathcal{E}_n = \sum_{j=1}^Q U_j - \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{n-1} a_i \cdot c_{ij} - \sum_{j=1}^Q a_m \cdot T_j \rightarrow \max, \quad (3.38)$$

где a_m – коэффициент значимости при тарифе на перевозку пассажиров;
 T_j – тариф на перевозку пассажиров.

Вспомнив, что оба множителя в последнем слагаемом постоянны,
 $a_m = \text{const}$ и $T_j = \text{const} = T$, (3.38) можно записать следующим образом:

$$\mathcal{E}_n = \sum_{j=1}^Q U_j - \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{n-1} a_i \cdot c_{ij} - Q \cdot a_m \cdot T \rightarrow \max. \quad (3.38)$$

Второе слагаемое в уравнении (3.35), то есть эффективность транспортных предприятий, имеет денежное измерение, поэтому для достижения корректности всего выражения, первое слагаемое также нужно перевести в денежное измерение, путём деления его на коэффициент значимости при тарифе:

$$\mathcal{E}_n = \sum_{j=1}^Q \frac{U_j}{a_m} - \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{a_m} \cdot c_{ij} - Q \cdot T = U' - Q \cdot T \rightarrow \max. \quad (3.39)$$

где U' – общая остаточная полезность передвижений пассажиров маршрутным транспортом в денежных единицах, с учётом затрат нефинансовых ресурсов на них.

После этих преобразований и подстановки всех элементов в интегральный критерий эффективности объединённого целевого сегмента «пассажиры + транспортные предприятия» (3.35), он приобретает окончательный вид:

$$\mathcal{E}_{\text{п+тп}} = U' - Q \cdot T + Q \cdot T - \mathcal{Z}_{\text{фм}} = U' - \mathcal{Z}_{\text{фм}} \rightarrow \max. \quad (3.40)$$

После сокращения в (3.35) подобных слагаемых становится очевидным, что для объединённого целевого сегмента целью исследования системы городского пассажирского транспорта является максимум разности между степенью удовлетворения потребностей населения в передвижениях и затратами на организацию перевозок. А вопросы распределения денежных потоков между пассажирами и перевозчиками в критерии не отражаются. Собственно в основном для иллюстрации этого свойства и был рассмотрен пример последовательного создания критерия для маршрутной системы городского пассажирского транспорта. Описанная в предыдущем разделе процедура позволяет формировать объективный критерий даже при наличии противоречий в целевом сегменте.

Возвращаясь к задаче по повышению эффективности работы маршрутной системы города нужно отметить, что денежные потоки между пассажирами и транспортными предприятиями из неё не исчезают. При детальном описании процессов в системе, они должны быть частью модели всей системы, так как стоимость проезда может оказывать серьезное влияние на вероятность выбора пассажирами того или иного варианта пути следования.

Таким образом, реализация последовательного подхода позволяет избавиться от неопределенности в формировании критерия эффективности системы. Он в достаточной степени формализован и прост. Но, конечно, он не может гарантировать простоту составления математической модели системы, так как его составляющие могут иметь весьма сложную связь с технологическими параметрами элементов системы.

Сложности в наибольшей степени относятся к показателям степени удовлетворения потребителей продуктами системы (транспортными услугами). В этом случае, для получения того вида критерия, который может быть применим в исследованиях, требуется проведение самостоятельных исследований, направленных на установление соотношений между результатами деятельности и затратами на его достижение.

ТЕМА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

На этом этапе исследования определяется та часть исходной информации, которая задает условия функционирования объекта исследования. Общие указания к определению структуры внешней среды, рассмотренные во втором разделе, не могут дать достаточно полного представления об этой процедуре из-за разнообразия решаемых задач. Поэтому необходима дальнейшая структуризация вариантов рассмотрения проблем транспортных объектов.

При решении задач могут быть выделены **три уровня планирования работы** транспортных систем, которые существенным образом отличаются друг от друга по содержанию работ и, следовательно, по используемой исходной информации:

1. *Перспективное планирование.*
2. *Текущее планирование.*
3. *Оперативное планирование.*

Эти уровни планирования во многом соответствуют трем вариантам системного анализа транспортных систем по используемому инструментарию и кругу решаемых задач.

При перспективном транспортном планировании в основном определяются стратегические направления развития объекта исследования, то есть политика капитальных вложений. Для пассажирских и грузовых перевозок здесь обычно рассчитываются потребное количество и структура подвижного состава, в сфере организации дорожного движения определяются потребности в развитии транспортной сети.

Внутренняя структура объекта исследования в этом случае обычно считается постоянной. Такие задачи обуславливают невысокие требования к степени детализации исходной информации, используемой в качестве характеристики внешней среды, но предъявляют высокие требования к её стабильности. Чаще всего это возможные объёмы работы при рассмотрении вопросов органи-

зации перевозок, количество передвижений или уровень автомобилизации при рассмотрении вопросов организации дорожного движения.

На уровне *текущего транспортного планирования* решаются вопросы выбора рациональной технологии и организации работ. Для решения таких вопросов требуется более детальная информация. При рассмотрении вопросов организации перевозок самым распространенным видом исходной информации являются матрицы корреспонденций грузов или пассажиров, в организации дорожного движения – интенсивности транспортных потоков на рассматриваемых участках сети. Такая информация, помимо высокой детализации, должна обладать и относительной стабильностью, поскольку период реализации решений на уровне текущего планирования может быть достаточно продолжительным, доходящим до нескольких лет. Этот уровень планирования является самым сложным как с точки зрения сбора исходной информации, так и с точки зрения применяемых здесь методов решения поставленных задач.

Решение задач оперативного планирования призвано дать ответы на вопросы о конкретных вариантах исполнения тех или иных видов работ или предложить варианты преодоления возникших нестандартных ситуаций, вызванных нестабильностью характеристик внешней среды.

Если проводить сравнение между текущим и оперативным планированием в сфере пассажирских перевозок, то составление маршрутной схемы города относится к задачам текущего планирования, а организация доставки и вывоза зрителей массового мероприятия – к оперативному планированию. Соответственно и исходная информация для решения задач оперативного планирования не обязана быть стабильной, зато должна быть очень подробной и точной, так как здесь корректировка решений с учетом новых обстоятельств может быть сильно осложнена из-за дефицита времени.

При решении задач оперативного планирования в основном используются готовые наборы информации, не требующие переработки. Эти наборы чаще всего просто формируются заказчиком транспортной работы. Поэтому в даль-

нейшем будут рассмотрены только методы определения структуры внешней среды для перспективного и текущего планирования.

В методах определения структуры внешней среды можно выделить общие подходы, характерные практически для всех задач в сфере транспортных процессов. Эти подходы в наибольшей степени относятся к перспективному планированию, когда требуется определение относительно небольшого списка характеристик внешней среды. Для их определения используются **два способа получения информации:**

- *эмпирический;*
- *теоретический.*

Первый предполагает проведение различного рода обследований для получения характеристик внешней среды. Второй – создание математических моделей, описывающих поведение внешней среды, для получения прогнозных значений её характеристик.

Следует отметить, что при исследовании всегда требуется знание характеристик внешней среды на будущий период реализации результатов исследования. В то же время обследования могут предоставить лишь информацию, характеризующую состояние объекта на момент проведения обследования.

Поэтому применения теоретических моделей при получении характеристик внешней среды не избежать. Это могут быть самые простые методы прогнозирования, например, по последнему или среднему, из числа зафиксированных значений. Но, тем не менее, процедура перехода от результатов обследования к прогнозируемым параметрам является обязательной.

С другой стороны, любая теоретическая модель требует, для определения конкретных значений её коэффициентов, наличия хотя бы минимального набора фактических значений, характеризующих объект.

Таким образом, можно заключить, что в общем случае, *для получения характеристик внешней среды требуется совместное использование эмпирических и теоретических способов.*

Наибольшее развитие **при перспективном планировании** работы транспортных систем получили модели прогностического направления, из которых могут быть выделены три различных типа моделей.

1. Модель "развития".
2. Модель "спрос – предложение".
3. Модель "эластичности".

Все эти варианты, с точки зрения используемого математического аппарата, относятся к статистическим, регрессивным моделям. Разница между ними заключается только в списке параметров, определяющих значение искомой переменной или в разрешающих способностях, обусловленных видом модели.

Свои названия они получили на основании особенностей их использования в прикладных системных исследованиях. Эти модели относятся к моделям «черного ящика», для которых характерно только внешнее описание характера связей между переменными, без объяснения причин возникновения и существования взаимодействий между ними.

Модель "развития" включает в себя тренд, то есть основную тенденцию развития, периодические (сезонные) и случайные колебания.

Более подробно ознакомиться с методами обработки временных рядов можно в литературе, посвященной вопросам математической статистики. Здесь будет рассмотрен только самый простой вариант прогнозирования, основанный на определении тренда. В этом случае общий вид модели "развития":

$$Y = f(t, \varepsilon). \quad (4.1)$$

где Y – искомое значение (зависимый либо результирующий признак); t – время; ε – случайная составляющая.

При получении тренда ставится задача определения конкретного вида зависимости, позволяющей прогнозировать величину результирующего признака для заданного промежутка времени. Для этого вначале, из всего многообразия

возможных форм моделей развития, получаемых путем преобразования данных, необходимо выбрать одну. Затем с помощью метода наименьших квадратов, получить значения коэффициентов модели, при которых длина вектора невязки фактических и расчетных значений будет минимальной.

Рассмотрим процесс получения модели на конкретном примере.

Пусть результирующим признаком является годовой объём перевозок Q , являющийся наиболее распространенной характеристикой внешней среды. По результатам документированного обследования зафиксированы значения объёма перевозок, которые приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения параметров модели развития.

Номер наблюдения	Год, t	Объём перевозок, Q , тыс. т.	Расчетные значения	
			t^2	$Q \cdot t$
1	14	634	196	8876
2	15	648	225	9720
3	16	646	256	10336
4	17	652	289	11084
5	18	674	324	12132
6	19	676	361	12844
Итого	99	3930	1651	64992

Необходимо определить прогнозное значение Q на 2020 год с помощью модели "развития".

Вначале требуется выбрать вариант модели для расчетов. Пусть это будет линейная модель, которая имеет следующий вид:

$$Q = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (4.2)$$

где a_0 , a_1 – коэффициенты модели.

Значения коэффициентов находятся решением системы нормальных уравнений, принимающей для этого случая такой вид:

$$\begin{cases} a_0 \cdot n + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n Q_i \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^n t_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot t_i \end{cases}, \quad (4.3)$$

где n – количество наблюдений.

Расчеты обычно проводятся в табличном виде, и в данном случае система записывается так:

$$\begin{cases} 6 \cdot a_0 + 99 \cdot a_1 = 3930 \\ 99 \cdot a_0 + 1651 \cdot a_1 = 64992 \end{cases}.$$

Решением этой системы будут значения 516,4 для a_0 и 8,4 для a_1 . Окончательный вид модели:

$$Q = 516,4 + 8,4 \cdot t. \quad (4.4)$$

Теперь можно рассчитать прогнозное значение объема перевозок для 1987 года:

$$Q = 516,4 + 8,4 \cdot 20 = 684,4 \text{ тыс. т.}$$

Результаты расчетов графически представлены на рис. 4.1.

Допускается включение в линейную модель дополнительных переменных, которые представляют собой преобразованную шкалу времени. Пусть это будет t^2 . Тогда модель приобретет следующий вид:

$$Q = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2. \quad (4.5)$$

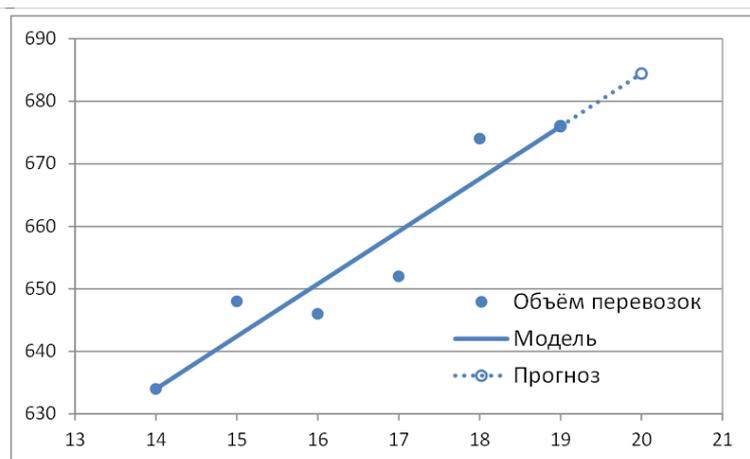


Рисунок 4.1

Степень многочлена или любой другой вариант преобразования временной шкалы выбирается свободно и таким способом можно добиться весьма высокой степени точности описания фактических данных. Однако значительное усложнение расчетов обычно

не имеет смысла, поскольку временная шкала является лишь условной привязкой при описании поведения исследуемого параметра.

Если в качестве базы расчетов использовать совершенно иную шкалу, например начинающуюся с 0, то это приведет лишь к изменению значений коэффициентов модели, но не результатов прогнозирования. Фактически, значения параметра определяются совершенно иными факторами, которые никак не отражены в модели развития. Поэтому существуют весьма серьезные ограничения на использование моделей развития.

В первую очередь экстраполяция тренда за пределы учетного временного ряда возможна, тогда и только тогда, когда допустимо предположение о неизменности факторов, действовавших в отчетном периоде, и в прогнозируемом периоде.

Тщательная проверка корректности этого допущения достаточно сложна, что сводит на нет основное преимущество модели развития – простоту. Поэтому обычно она осуществляется на уровне предположений или графического анализа временного ряда исследуемой переменной.

Такой подход не дает надежных гарантий корректности прогнозирования. Поэтому модели развития часто получаются как один из результатов поиска вида модели «спрос-предложение».

Модели «спрос-предложение» с точки зрения математического аппарата

представляют собой многофакторные регрессивные модели. Они имеют следующий общий вид:

$$Y = f(x_i, \varepsilon), \quad (4.6)$$

где x_i – факторы, определяющие значение результирующего признака (независимые или факторные признаки).

Модели «спрос-предложение» потенциально имеют более высокую информационную способность, чем модели развития, что определяется наличием в ней факторов, от которых в действительности может зависеть значение результирующего признака. Однако реальное количество факторных признаков может быть велико или вообще бесконечным. Поэтому на начальных стадиях формирования моделей «спрос-предложение» определяется доступный набор данных, состоящий из результатов наблюдения за изменением результирующего и факторных признаков. Затем проводится их анализ, который выполняется с помощью специальных инструментов и характеристик качества модели и значимости её коэффициентов.

После такого анализа возникает одна из двух ситуаций.

1. На результирующий признак воздействует множество факторов с приблизительно одинаковой и невысокой степенью влияния. В этом случае возможен возврат к моделям развития, если изменение результирующего признака имеет относительно четкие тенденции или использование для характеристики внешней среды моделей поведения в противном случае.

2. Из множества факторов, действующих на результирующий признак, выделяется один или несколько, оказывающих существенно более высокое влияние, чем остальные. В этом случае, основные факторы остаются в модели, малозначачие факторы из модели исключаются, при этом считается, что их влияние отражается в случайной составляющей.

Наряду с несомненными достоинствами, модели «спрос-предложение»

имеют и существенный недостаток, заключающийся в том, что для получения прогнозного значения вначале необходимо определить значения факторов, от которых зависит результирующий признак. А это может стать серьезной проблемой при определении структуры внешней среды, так как, по сути, они не обязательно зависят от параметров элементов системы и, следовательно, в качестве факторных признаков здесь могут выступать только характеристики других элементов внешней среды, которые неподвластны исследователю.

Такие модели могут применяться и при создании математической модели объекта исследования для описания взаимодействия между элементами.

Пример получения модели «спрос-предложение». В качестве доступного набора данных выступают результаты наблюдений за себестоимостью перевозок S , параллельно зафиксированы значения объема перевозок груза и стоимость основных фондов предприятия Φ , которые здесь считаются основными факторами, определяющими значение себестоимости. Данные для расчетов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения параметров модели «спрос-предложение».

Номер наблюдения	Себестоимость перевозки 1 тонны груза, S , коп/т	Стоимость основных фондов предприятия, Φ , млн. грн.	Объем перевозок, тыс. т.	Расчетные показатели				
				Φ^2	Q^2	$Q*\Phi$	$S*\Phi$	$S*Q$
1	9,8	3,2	634	10,24	401956	2028,8	31,36	6213,2
2	9,3	3,2	648	10,24	419904	2073,6	29,76	6026,4
3	9,4	3,4	646	11,56	417316	2196,4	31,96	6072,4
4	9,6	3,5	652	12,25	425104	2282,0	33,60	6259,2
5	9,8	3,7	674	13,69	454276	2493,8	36,26	6605,2
6	9,9	3,7	676	13,69	456976	2501,2	36,63	6692,4
Итого	57,8	20,7	3930	71,67	2575532	13578,2	199,57	37868,8

Необходимо определить прогнозное значение себестоимости перевозок S с помощью модели «спрос-предложение» при условии, что в будущем периоде объем перевозок и стоимость основных фондов соответственно составят:

$$Q = 684,4 \text{ тыс. т} \quad \text{и} \quad \Phi = 3,8 \text{ млн. грн.}$$

Вначале, как и в модели «развития», требуется выбрать вариант модели для расчетов. Пусть это будет линейная модель, имеющая для данного случая такой вид:

$$S = a_0 + a_1 \cdot \Phi + a_2 \cdot Q, \quad (4.7)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты модели.

Значения коэффициентов находятся решением системы нормальных уравнений следующим образом:

$$\begin{cases} a_0 \cdot n + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n S_i \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i^2 + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot Q_i = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \Phi_i, \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Phi_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 = \sum_{i=1}^n S_i \cdot Q_i \end{cases} \quad (4.8)$$

Расчеты проводятся в табличном виде, расчетные показатели приведены в таблице 4.2 и в данном случае система уравнений записывается так:

$$\begin{cases} 6 \cdot a_0 + 20,7 \cdot a_1 + 3939 \cdot a_2 = 57,8 \\ 20,7 \cdot a_0 + 71,7 \cdot a_1 + 13575,8 \cdot a_2 = 199,57 \\ 3930 \cdot a_0 + 13575,8 \cdot a_1 + 2575532 \cdot a_2 = 37868,8 \end{cases} .$$

Решением этой системы будут значения $-0,627$ для a_0 , $-1,182$ для a_1 и $0,022$ для a_2 . Окончательный вид модели:

$$S = -0,627 - 1,182 \cdot \Phi + 0,022 \cdot Q. \quad (4.9)$$

Теперь можно рассчитать прогнозное значение объёма перевозок для бу-

дущего периода:

$$S = -0,627 - 1,182 \cdot 3,8 + 0,022 \cdot 684,4 = 9,86 \text{ коп/т.}$$

Модели «спрос-предложение» могут быть использованы не только для прогноза состояния внешней среды, но и для анализа влияния факторных признаков на результирующий. Самым простым вариантом анализа является определение направления изменения результирующего признака при изменении факторного по знаку соответствующего коэффициента. Более сложный анализ возможен с использованием методов математической статистики

Однако, особый вид модели «спрос-предложение» – модель эластичности позволяет делать более глубокие выводы о характере взаимосвязи между факторными признаками и результатом.

Модель эластичности имеет следующий вид:

$$Y = C \prod_{i=1}^n x_i^{\varepsilon_i}, \quad (4.10)$$

где C – константа, аналог свободного члена в линейном уравнении регрессии; n – количество факторов, воздействующих на результирующий признак Y ; ε_i – коэффициент эластичности i -го факторного признака.

Модель «эластичности» приводится к линейному виду модели «спрос-предложение» с помощью логарифмирования:

$$\ln(Y) = \ln(C) + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot x_i. \quad (4.11)$$

Значения коэффициентов получают с помощью метода наименьших квадратов. При мультипликативном характере связей между результирующим

и факторными признаками, модель эластичности лучше описывает эмпирические данные, чем линейный вариант модели «спрос-предложение». Но основное применение она нашла благодаря свойствам коэффициентов эластичности, значение которых позволяет определить не только направление, но и характер влияния фактора на результирующий признак.

Если $\varepsilon_i < 1$, то изменение i -го фактора демпфирует (смягчает) изменение результирующего признака.

Если $\varepsilon_i = 1$, то значение i -го фактора прямо переносится на значение результирующего признака.

Если $\varepsilon_i > 1$, изменение i -го фактора усиливает изменение результирующего признака.

Модели прогностического направления можно использовать при выполнении разных этапов исследования транспортных систем, однако, при повышении требований к точности расчетов эти модели должны уступать место моделям принятия решений.

Модели прогностического направления могут использоваться для определения структуры внешней среды при решении любых задач перспективного планирования с транспортными объектами. Однако специфика конкретных объектов исследования делает возможным применение и других, более совершенных, методов исследования структуры внешней среды.

4.1 Грузовые перевозки.

Для решения задач перспективного планирования транспортных объектов, которые специализируются на перевозке грузов, в основном используются такие характеристики внешней среды, как объём перевозок или транспортная работа.

При нестабильной клиентуре или больших размерах рассматриваемого транспортного объекта чаще применяется транспортная работа. Могут исполь-

зоваться и другие измерители потребностей в перевозках, например авточасы.

Прогнозирование этих показателей чаще всего выполняется с помощью моделей прогностического направления, описанных в начале раздела. Но при рассмотрении грузовых перевозок существует возможность применения более совершенного аппарата описания структуры внешней среды.

Исследования грузовых транспортных систем во многом основаны на том, что значительная часть деятельности грузового транспорта направлена на обслуживание различных предприятий, играющих ту или иную роль в системе производства и распределения товаров и услуг. То есть внешней средой для грузового транспорта чаще всего является система производства.

Структура системы производства весьма инертна, если выделять в ней достаточно крупные элементы. Стабильность элементов системы производства и устойчивость связей между ними позволяет использовать их характеристики для определения условий работы транспортных систем при перспективном планировании.

На этих предпосылках основано применение *статической линейной балансовой модели межотраслевых связей* (СЛБМ) для характеристики внешней среды. Она разработана для решения вопросов макроэкономического планирования в масштабах отдельного региона или страны.

Эта модель является ярким примером использования первого варианта системного анализа, в тех случаях, когда она применяется для планирования работы отдельного элемента общеэкономической системы. Если в качестве объекта исследования выступает вся экономическая система страны или региона, то СЛБМ является инструментом второго варианта системного анализа, но уже не транспортных, а макроэкономических систем.

Частный случай СЛБМ – двухсекторная модель применима для прогнозирования объёмов работы отдельного производственного объекта, в том числе и транспортной системы. В этом случае СЛБМ является инструментом определения структуры внешней среды, то есть объёма работы транспортной систе-

мы. Ограничений на такое использование СЛБМ достаточно много. Основным из них, с точки зрения системного анализа, является постоянство структуры элементов экономической системы, ведь исследование чаще всего как раз и направлено на изменение структуры одного элемента – транспортной подсистемы. Поэтому использование СЛБМ ограничено, в основном, перспективным планированием. Однако понять все ограничения можно, только рассмотрев общий случай – многосекторный вариант СЛБМ.

Модель состоит из n производственных секторов и одного сектора конечного потребления. Под производственным сектором в модели понимаются различные предприятия, объединенные в производственные комплексы. Обычно это отдельные отрасли производства, но может быть использовано и более детальное представление, при условии соблюдения корректности системы допущений.

Если использовать системную терминологию, то производственный сектор – это элемент экономической системы. В качестве внешней среды для экономической системы здесь выступает общество, которое с одной стороны расходует трудовые и природные ресурсы на производство товаров и услуг, с другой стороны – потребляет продукты производства.

Количество секторов в модели зависит от цели исследования, требуемой точности решения и корректности допущений относительно постоянства коэффициентов прямых затрат. Структура статической линейной балансовой модели приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Структура статической линейной балансовой модели*

Номер сектора, поставки	Номер сектора, потребление					Конечное потребление, Y	Валовый выпуск, Z
	l	...	J	...	n		
l	x_{ll}		x_{lj}		x_{ln}	y_l	z_l
...							
i	x_{il}		x_{ij}		x_{in}	y_i	z_i
...							
N	x_{nl}		x_{nj}		x_{nn}	Y_n	z_n

* в таблице 4.3 приняты следующие обозначения:

x_{ij} – поток товаров или услуг из сектора i в сектор j (межсекторный поток); x_{ii} – собственное потребление сектора i , для первого сектора $x_{11} \dots$;

y_i – поставки i -го сектора в сектор конечного потребления;

z_i – валовый выпуск i сектора.

Каждый производственный сектор является с одной стороны производящим (поставляющим) и потребляющим.

В общем случае i -й сектор производит z_i единиц продукции, которая направляется в остальные производственные секторы и сектор конечного потребления. Эта продукция представлена в таблице 4.3 строкой соответствующего сектора.

Для производства продукции каждый сектор потребляет продукцию других секторов (производственное потребление) – в таблице 4.3 оно представлено столбцами.

Конечное потребление – это потребление, направленное не на дальнейшее производство, а используемое людьми для удовлетворения своих потребностей. Выделение непроизводственного потребления в отдельный сектор определяется необходимостью задания условий функционирования экономической системы.

Все элементы СЛБМ представляются матрицами.

Матрица межсекторных потоков X :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

Векторы конечного потребления Y и валового выпуска Z :

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_i \\ \dots \\ z_n \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

Конкретное содержание модель получает после заполнения соответствующих матриц статистическими данными. Базовая зависимость модели определяет значение валового выпуска i -го сектора:

$$z_i = y_i + \sum_{j=1}^n x_{ij}. \quad (4.14)$$

По этой зависимости видно, что для полного заполнения трех матриц достаточно знания значений только двух из них. Это должна быть матрица межсекторных потоков X и один из векторов Y или Z . Общее количество исходных данных в модели N_δ может быть определено по зависимости (4.15).

$$N_\delta = n \cdot (n + 1). \quad (4.15)$$

Величины потоков могут задаваться как в натуральных измерителях выпускаемой продукции (тонны, тонно-километры, кубометры и так далее), так и в стоимостных измерителях. В общем плане это не имеет разницы для модели. Если межсекторный поток измеряется стоимостными единицами, то он представляет собой стоимость поставок из сектора i в сектор j . Валовый выпуск сектора в этом случае будет представлять собой доход соответствующего сектора.

Все расчеты в модели основаны на допущении о том, что величина затрат на производство единицы продукции в каждом секторе постоянна. *Постоянная*

в модели величина удельных затрат продукции сектора i на производство единицы продукции в секторе j называется **коэффициентом прямых затрат** и определяется по зависимости:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{z_j}, \quad (4.16)$$

где a_{ij} – коэффициент прямых затрат между секторами i и j ; z_j – валовый выпуск потребляющего сектора j .

Например, если сектор i представляет собой совокупность предприятий нефтеперерабатывающей промышленности и за год поставляет в сектор j , который выполняет грузовые перевозки, 100 тыс. тонн топлива, то при объеме транспортной работы сектора j за тот же период равном 4 млрд. тонно-километров коэффициент прямых затрат будет равен

$$a_{ij} = \frac{10^5}{4 \cdot 10^9} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ т/ткм.}$$

Значения всех коэффициентов прямых затрат сводятся в матрицу A :

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} \dots a_{1j} \dots a_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ a_{i1} \dots a_{ij} \dots a_{in} \\ \dots \dots \dots \\ a_{n1} \dots a_{nj} \dots a_{nn} \end{vmatrix}. \quad (4.17)$$

Матрица A характеризует структуру экономики, то есть взаимосвязи между элементами. Она считается постоянной на период планирования. Матрица коэффициентов прямых затрат не отрицательна, то есть все её элементы

больше либо равны нулю.

$$\forall a_{ij} \geq 0. \quad (4.18)$$

Если значения всех потоков имеют стоимостные измерители, то значения коэффициентов прямых затрат не должны превышать единицы, в противном случае затраты на производство продукции будут превышать доход от её реализации.

Из (4.16) можно определить значение межсекторного потока через коэффициенты прямых затрат:

$$x_{ij} = a_{ij} \cdot z_j. \quad (4.19)$$

С учетом (4.19) уравнение (4.14) приобретает вид (4.20).

$$z_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot z_j + y_i. \quad (4.20)$$

Если такие уравнения записать для всех секторов, то будет получена система n уравнений, которая связывает между собой значения поставок производственных секторов в сектор конечного потребления и валовый выпуск производственных секторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{1j} \cdot z_j + y_1 = z_1 \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot z_j + y_i = z_i \quad . \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{j=1}^n a_{nj} \cdot z_j + y_n = z_n \end{array} \right. \quad (4.21)$$

В матричном виде система (4.23) имеет следующий вид:

$$A \cdot Z + Y = Z. \quad (4.22)$$

После преобразования можно получить матричное уравнение, в котором объём конечного потребления определяется через коэффициенты прямых затрат и вектор валового выпуска:

$$Y = Z \cdot |E - A|, \quad (4.23)$$

где E – единичная матрица.

Элементы единичной матрицы определяются согласно (4.24).

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{при } i = j \\ 0; & \text{при } i \neq j \end{cases}. \quad (4.24)$$

Но уравнение (4.23) не позволяет осуществлять планирование в полном объёме, поскольку основной целью планирования является определение значений валового выпуска секторов. А в (4.23) значения объёма конечного потребления определяются как остаток от производственных нужд при известной структуре экономики. В нём, с точки зрения системного подхода, параметры внешней среды определяются на основе параметров системы, что также подтверждает неудобство его использования для целей планирования. Поэтому необходимо таким образом преобразовать (4.23), чтобы в нём значения валового выпуска определялись на основе известного объёма конечного потребления.

$$Z = |E - A|^{-1} \cdot Y. \quad (4.25)$$

Уравнение (4.25) является основным инструментом планирования в рамках статической линейной балансовой модели межотраслевых связей.

Можно ввести обозначение:

$$B = |E - A|^{-1}. \quad (4.26)$$

Тогда уравнение (4.25) записывается в виде (4.27).

$$Z = B \cdot Y. \quad (4.27)$$

где B – матрица коэффициентов полных затрат.

$$B = \begin{vmatrix} b_{11} \dots b_{1j} \dots b_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ b_{i1} \dots b_{ij} \dots b_{in} \\ \dots \dots \dots \\ b_{n1} \dots b_{nj} \dots b_{nn} \end{vmatrix}. \quad (4.28)$$

В линейном варианте это уравнение представляет собой систему n уравнений, каждое из которых имеет вид (4.29):

$$z_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot y_j. \quad (4.29)$$

Значения **коэффициентов полных затрат** определяют объём продукции сектора i , необходимый для поставки единицы продукции сектора j в сектор конечного потребления.

Если продолжить приведенный выше пример, то для перевозки одной тонны на один километр в целом потребуется иное количество топлива, чем $2,5 \cdot 10^{-5}$ т/ткм, так как топливо расходуется и в других секторах, например секторе, в котором выпускается подвижной состав для перевозок. Кроме того, су-

ществуют перевозки для обеспечения собственных потребностей транспортно-го сектора и далеко не все перевозки грузов осуществляются непосредственно для удовлетворения потребностей людей. Если учесть все затраты топлива, которые в конечном итоге потребуются для выполнения одного тонно-километра в секторе конечного потребления при заданной структуре производства, то получится величина большая, чем коэффициент прямых затрат.

С помощью (4.29) можно рассчитать плановое значение валового выпуска интересующего исследователя сектора. Затем возможно уточнение результатов расчетов с помощью (4.20). По этой зависимости могут быть рассчитаны плановые значения межсекторных потоков на основании плановых значений валового выпуска. Схема планирования объема работы секторов по СЛБМ приведена на рис. 4.2.

Порядок расчета по СЛБМ.

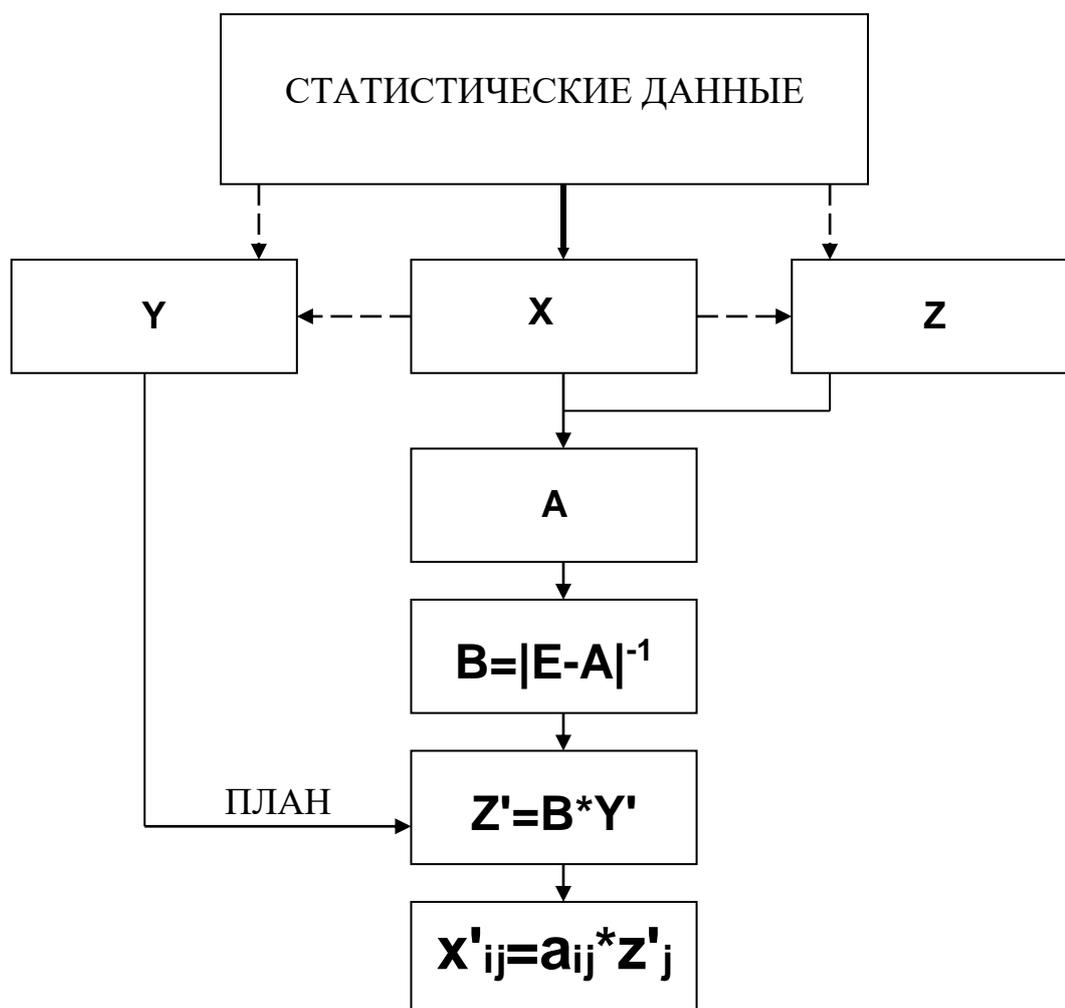


Рисунок 4.2

Использование СЛБМ для целей планирования ограничено рядом факторов. В основном эти факторы отражаются на количестве секторов в модели. Математический аппарат, используемый в модели, не предъявляет никаких ограничений на размерность СЛБМ за исключением ресурсных, определяемых программным обеспечением.

Однако существуют и смысловые ограничения, самое главное из которых обусловлено основным допущением СЛБМ – постоянством коэффициентов прямых затрат. Для обеспечения корректности такого допущения в общем случае в модели не должно быть конкурирующих секторов, то есть разных секторов, выпускающих однородную или взаимозаменяемую продукцию. Наличие таких секторов означает, что секторы, являющиеся потребителями продукции конкурирующих секторов, могут относительно легко изменять своих поставщиков. Это приведет к изменению значений межсекторных потоков и, как следствие, к нестабильности коэффициентов прямых затрат. Поэтому секторы в СЛБМ должны быть достаточно крупными, что обуславливает снижение разрешающих способностей модели.

Кроме того, применение статической линейной балансовой модели ограничивается доступностью исходной информации. Согласно (4.15) количество исходных данных, необходимых для планирования с помощью СЛБМ, пропорционально квадрату размерности модели. Двукратное увеличение количества секторов приводит к почти четырехкратному росту количества необходимых исходных данных. Поэтому детализованный вариант модели может не давать желаемых результатов, из-за отсутствия соответствующей статистики, даже если выполнено предыдущее условие.

Следует также более подробно остановиться на значениях коэффициентов прямых затрат. Так как их величина считается постоянной, то согласно (4.20) зависимость между межсекторным потоком и валовым выпуском потребляющего сектора имеет линейный характер, прямая 1 на рис. 4.3.

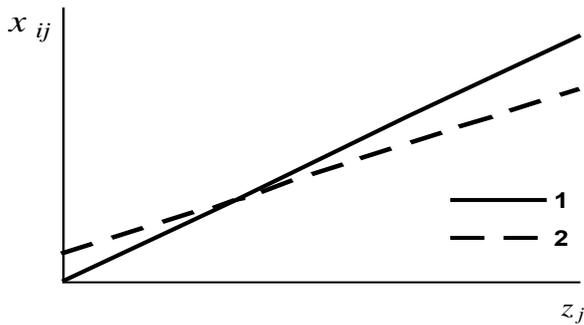


Рисунок 4.3

Однако может существовать и независимый расход, то есть какой-то объём продукции сектора i , который потребляется сектором j при нулевом валовом выпуске. И тогда величина межсекторного потока, при том же фактическом значении, будет определяться по зависимости (4.30):

$$x_{ij} = c_{ij} + a_{ij} \cdot z_j, \quad (4.30)$$

где c_{ij} – потребление продукции сектора i в секторе j при нулевом валовом выпуске сектора j (независимый расход).

Эта зависимость представлена линией 2 на рис. 4.3.

Независимый расход может принимать только неотрицательные значения

$$c_{ij} \geq 0. \quad (4.31)$$

Исходя из (4.30) величина коэффициента прямых затрат определится как

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - c_{ij}}{z_j}. \quad (4.32)$$

С учетом (4.31) наличие независимого расхода ведет к сокращению значения коэффициента прямых затрат. Поэтому увеличение валового выпуска какого-то сектора будет приводить к меньшему росту межсекторных потоков, чем при стандартном варианте (4.16).

Обычно считается, что нет необходимости учитывать независимый рас-

ход, если его величина относительно невелика, то есть выполняется условие:

$$c_{ij} \leq (0,05 \sim 0,10) \cdot x_{ij}. \quad (4.33)$$

Еще одним источником погрешностей расчетов по СЛБМ является нелинейный характер зависимости между межсекторным потоком и валовым выпуском потребляющего сектора. Обычно увеличение объёма производства приводит к сокращению удельных затрат на производство единицы продукции. Такая зависимость обусловлена более широкими возможностями использования прогрессивных технологий в производстве продукции и маневрирования средствами производства, производственными запасами и так далее. Тогда зависимость между межсекторным потоком и валовым выпуском потребляющего сектора будет носить характер замедленного роста, линия 1 на рис. 4.4.

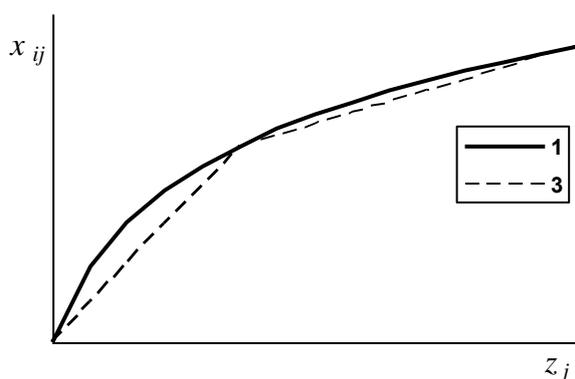


Рисунок 4.4.

Возможен и ускоренный рост затрат при увеличении валового выпуска, если для этого требуется ввод дополнительных производственных мощностей. Но в обоих случаях между межсекторным потоком и валовым выпуском потребляющего сектора носит нелинейный характер. В этом случае для проведения расчетов по СЛБМ требуется линейная ап-

проксимация кривой, линия 3 на рис. 4.4.

При больших размерностях модели возникает еще один источник погрешностей планирования, обусловленный сложностью обращения больших матриц. Неточности обращения самым существенным образом сказываются на плановых значениях валового выпуска секторов.

Добиться повышения точности расчетов в этом случае можно с помощью простой операции, которая заключается в отказе от учета невысоких значений

межсекторных потоков. Тогда существенно увеличивается количество нулевых элементов в матрице прямых затрат, что значительно упрощает процедуру обращения матрицы $|E-A|$ повышает его точность. Формально это записывается как предварительное преобразование матриц межсекторных потоков и конечного потребления:

$$\begin{aligned} x_{ij}^* &= \begin{cases} x_{ij}; x_{ij} > 0,01 \cdot z_j \\ 0; x_{ij} \leq 0,01 \cdot z_j \end{cases}, \\ y_i^* &= \begin{cases} y_i; x_{ij} > 0,01 \cdot z_j \\ y_i + x_{ij}; x_{ij} \leq 0,01 \cdot z_j \end{cases}, \end{aligned} \quad (4.34)$$

Согласно (4.34) невысокие значения межсекторных потоков приравниваются нулю в матрице X и включаются общей суммой в объём поставок соответствующего сектора в сектор конечного потребления. Таким образом, за счет потери точности расчетов для второстепенных потоков повышается точность расчетов для основных межсекторных потоков.

В СЛБМ, как и в других вариантах системных исследований, структура элементов (секторов) считается постоянной. В то же время внутри секторов могут происходить активные процессы, направленные на совершенствование организации его работы, что будет приводить к изменению структуры сектора, которая характеризуется набором коэффициентов прямых затрат.

Так, мероприятия по совершенствованию организации перевозок, обычно позволяют сократить пробег подвижного состава, что означает сокращение расхода топлива и других эксплуатационных затрат при тех же, что и прежде объёмах транспортной работы.

С точки зрения СЛБМ это означает сокращение межсекторных потоков, при том же валовом выпуске сектора, что приводит к соответствующему сокращению коэффициентов прямых затрат. Схожие или другие процессы приводят в общем случае к случайному характеру коэффициентов a_{ij} , вследствие чего, точность расчета существенно снижается с удалением временного гори-

зонты прогнозирования.

Самый простой выход из этой ситуации заключается в укрупнении секторов для отдаленных прогнозов, так как стабильность коэффициентов прямых затрат повышается при увеличении количества предприятий в каждом секторе. Кроме того, при проведении расчетов по СЛБМ рекомендуется периодически проводить корректировку коэффициентов, для учета изменений в структуре экономики.

Основное применение при рассмотрении транспортных объектов может найти частный случай СЛБМ – **двухсекторная модель**. В этой модели из всех субъектов экономической деятельности рассматриваемого региона или страны выделяются два значительно различающихся сектора, рисунок 4.5.



Рисунок 4.5

Первый из них представляет объект системного исследования («Транспорт»), второй – совокупность остальных предприятий экономики региона или государства («Производство»). Естественно, что эти элементы имеют сильно отличающиеся размеры, так как прикладные исследования обычно адресуются относительно небольшому, по сравнению со всей экономикой, объекту.

Влияние объекта исследования на сектор «Производство» очень невелико из-за разницы в масштабах, поэтому целью расчетов по двухсекторной модели

всегда является расчет валового выпуска объекта исследования. Это также позволяет преодолеть проблему постоянства структуры элементов экономической системы на стадии определения параметров внешней среды.

Характеристики сектора «Производство» весьма стабильны из-за солидности его размеров. Но применение СЛБМ для определения объёмов валового выпуска сектора «Транспорт» должно основываться на корректности допущения о стабильности связей между ним и сектором «Производство». Сомнения в его корректности могут возникать при выборе относительно небольшого объекта, который будет иметь конкурентов в секторе «Производство». В этом случае объект исследования должен иметь сложившиеся связи со своей клиентурой, не подверженные значительным колебаниям из-за изменения конъюнктуры рынка.

Пусть в двухсекторной модели под сектором 1 понимается сектор «Транспорт», под сектором 2 – «Производство».

Исходные данные для расчетов приведены в таблице 4.4. Все показатели здесь имеют стоимостные измерители.

Таблица 4.4 – Исходные данные для расчета валового выпуска сектора «Транспорт»

Показатель	Обозначение	Значение
Собственное потребление сектора «Транспорт»	x_{11}	134
Объём поставок сектора «Транспорт» в сектор «Производство»	x_{12}	9123
Объём поставок сектора «Транспорт» в сектор конечного потребления	y_1	10367
Объём поставок сектора «Производство» в сектор «Транспорт»	x_{21}	6579
Собственное потребление сектора «Производство»	x_{22}	78930
Объём поставок сектора «Производство» в сектор конечного потребления	y_2	93457

В этом варианте в качестве исходных данных заданы значения межсек-

торных потоков и объёмы поставок обоих секторов в сектор конечного потребления. Поэтому вначале, по зависимости (4.15), определяются объёмы валового выпуска секторов:

$$z_1 = 10367 + 134 + 9123 = 19624.$$

$$z_2 = 93457 + 6579 + 78930 = 178966.$$

По зависимости (4.17) рассчитываются коэффициенты прямых затрат, которые сводятся в матрицу:

$$A = \begin{vmatrix} 0,06828; & 0,05098 \\ 0,33525; & 0,44103 \end{vmatrix}.$$

Затем, по зависимости (4.35), рассчитывается промежуточная матрица D :

$$D = |E - A|. \quad (4.35)$$

$$D = \begin{vmatrix} 0,99317; & -0,05098 \\ -0,33525; & 0,55897 \end{vmatrix}.$$

Путем обращения матрицы D получается матрица коэффициентов полных затрат:

$$B = \begin{vmatrix} 1,03886; & 0,9474 \\ 0,62308; & 1,84584 \end{vmatrix}.$$

На основании (4.29) можно получить модель для планирования объёма производства сектора «Транспорт».

$$z_1 = 1,03886 \cdot y_1 + 0,9474 \cdot y_2.$$

Как видно из полученной модели, для расчета объема работ транспортной системы необходимо знать объемы поставок секторов в сектор конечного потребления. Этот вариант определения характеристик внешней среды относится к моделям принятия решений.

При характеристике внешней среды для решения задач текущего планирования работы грузовых транспортных систем также необходимо учитывать особенности клиентуры. Так как это в большинстве случаев крупные объекты, то их список относительно невелик и сбор исходной информации основан на индивидуальном изучении и прогнозировании характеристик каждого клиента. Если же исследуемый объект в основном обслуживает мелких разовых клиентов, то для определения характеристик внешней среды здесь чаще применяются прогностические модели.

4.2 Пассажирские перевозки.

Основные особенности расчета параметров внешней среды при решении задач в сфере пассажирских перевозок определяются спецификой обслуживаемой клиентуры. Практически все клиенты – это пассажиры, которые индивидуально выбирают направление передвижения и способ его реализации. Исключение составляет обслуживание потребностей предприятий в перевозке работников или групповых заявок на перевозку. Однако эти виды транспортной работы занимают очень небольшой удельный вес в общем объеме перевозок пассажиров и задачи их организации решаются, в основном, на уровне оперативного планирования.

Большое количество пассажиров обуславливает разнообразие направлений перевозки, индивидуально обслужить которые не представляется возможным из-за ресурсных ограничений. В этом случае имеются в виду не только ограничения по количеству подвижного состава, но и ограничения по пропускной способности транспортных сетей. В связи с этим и способ организации работы по их обслуживанию существенным образом отличается от организации

перевозок грузов.

В организации пассажирских перевозок можно выделить два основных способа удовлетворения потребностей в передвижениях – индивидуальные и маршрутные перевозки.

Индивидуальные перевозки выполняются для одного человека или небольших групп пассажиров, имеющих схожие потребности в передвижении. Реализуются эти перевозки автомобилями-такси, личным или служебным легковым автотранспортом. Несмотря на достаточно значительные объёмы, для исследования этих перевозок в настоящее время может быть применен только первый вариант системного анализа, и как следствие, только перспективное планирование. Методы определения исходной информации в этом случае аналогичны тем, что применяются при исследовании маршрутных перевозок.

Основная масса пассажиров в нашей стране обслуживается маршрутным транспортом. В этом случае подвижной состав движется по заранее оговоренным маршрутам, которые составляют маршрутную сеть региона

В маршрутных перевозках самое большое удельное содержание имеет объём перевозок пассажиров в городах. Для городских перевозок также характерна относительная компактность объекта. Эти факторы с одной стороны определяют высокую степень актуальности решения задач в сфере организации перевозок пассажиров в городах, с другой стороны – обеспечивают расширенные возможности для их исследования.

Поэтому основное развитие в настоящее время получили методы организации перевозок пассажиров в городах и в дальнейшем все особенности изучения структуры внешней среды рассматриваются на примере городских перевозок. При изучении пригородных и междугородных перевозок могут применяться какие-то из описанных ниже методов, но делать это следует с большой осторожностью, так как в этом случае многие предпосылки, заложенные в этих методах, могут не выполняться.

4.2.1 Перспективное планирование

В рамках перспективного планирования работы пассажирских транспортных систем в качестве основного параметра внешней среды выступает количество передвижений, объём перевозок пассажиров или транспортная работа. Для прогнозирования объёма перевозок могут быть использованы модели прогностического направления, описанные в начале раздела. Но прогнозирование объёмов работы пассажирских транспортных систем имеет ряд особенностей, которые снижают его эффективность.

При исследовании грузовых перевозок объём перевозок или транспортная работа достаточно объективно отражают потребности экономики и населения в перевозках, что обусловлено преобладанием индивидуального обслуживания заявок на перевозку.

В пассажирских транспортных системах маршрутная сеть не в силах обеспечить беспересадочным сообщением всех пассажиров, что обуславливает наличие пересадок при передвижениях. Они вызывают дополнительные сложности при прогнозировании параметров внешней среды, поскольку точное количество пересадок установить весьма сложно. Так как количество пересадок во многом определяется маршрутной сетью, то объём перевозок здесь характеризует не общие потребности населения в перевозках, а только их отражение в маршрутной сети, существующей на период сбора информации.

При перспективном транспортном планировании допущение о постоянстве маршрутной сети на прогнозируемый период выглядит неубедительным. Следовательно, результаты прогнозирования объёмов перевозок не могут обеспечить объективность информации для планирования.

Еще одним фактором, вызывающим существенную неопределенность в прогнозировании, является порядок сбора выручки на маршрутах, для которого характерно наличие льготных категорий пассажиров и системы проездных билетов. Для того чтобы установить объём перевозок для пассажиров, которые пользуются льготами или постоянными билетами, необходимо проведение

специальных обследований. Отчетные данные предприятий, выполняющих перевозки пассажиров не могут дать ответ на этот вопрос.

Поэтому здесь в качестве основной характеристики внешней среды, отражающей потребности населения в перевозках, принимается не объём перевозок, а количество передвижений.

Под передвижением понимается реализация цели изменения места расположения, то есть путь следования пассажира от пункта отправления до пункта назначения.

Но количество передвижений не может быть оценено через отчетную информацию транспортных предприятий, поэтому для его определения в основном используется зависимость (4.36).

$$N_n = N_{жс} \cdot П, \quad (4.36)$$

где N_n – количество передвижений в городе за рассматриваемый период, чаще всего год; $N_{жс}$ – прогнозное значение численности населения в городе; $П$ – подвижность населения.

Подвижность – среднее количество передвижений, приходящихся на одного жителя города в определенный промежуток времени.

Зависимость (4.36) отражает только общий подход к прогнозированию количества передвижений.

Численность населения города для прогнозируемого периода определяется с высокой степенью точности. Точность обеспечивается с одной стороны высокой стабильностью характеристик больших совокупностей, с другой стороны – достаточным уровнем изученности этого показателя, поскольку он используется не только в транспортном, но и большинстве других видов планирования.

Однако подвижность населения изменяется в весьма широких пределах. Она зависит от величины города, его планировки, обеспеченности города

транспортом, уровня жизни населения и других факторов. Значения подвижности населения определяются на основании специальных обследований в различных городах и последующей обработки результатов.

Для повышения точности прогнозирования общая подвижность населения структурируется. В рамках общей подвижности выделяется транспортная подвижность. Отношение между ними является одной из общепринятых характеристик пассажирских транспортных систем и называется коэффициентом использования транспорта K_m :

$$K_m = \frac{P_m}{P_{общ}}, \quad (4.37)$$

где P_m – транспортная подвижность; $P_{общ}$ – общая подвижность.

Подстановка той или иной подвижности в зависимость (4.36) приводит к получению количества передвижений соответствующего вида.

Для выделенного круга задач, то есть вопросов массовых пассажирских перевозок в городах, выделяются маршрутная и сетевая подвижность.

Сетевая подвижность – среднее количество передвижений, которые реализованы на массовом городском транспорте, приходящиеся на одного жителя в год.

Маршрутная подвижность – количество маршрутных поездок, которые реализованы на массовом городском транспорте, приходящиеся на одного жителя в год.

Маршрутная поездка – путь следования пассажира от места посадки в транспортное средство городского маршрута, до высадки из него.

Отношение между ними называется коэффициентом пересадочности $K_{пер}$:

$$K_{пер} = \frac{P_m}{P_c}, \quad (4.38)$$

где P_m – маршрутная подвижность; P_c – сетевая подвижность.

Подстановка маршрутной подвижности в (4.36) приводит к определению количества маршрутных поездок или, иначе, к определению объёма перевозок пассажиров.

Подстановка сетевой подвижности в результате дает значение количества передвижений на массовом пассажирском транспорте – показатель, в наибольшей степени характеризующий потребности населения в перевозках.

Но такой уровень структуризации подвижности не всегда считается достаточным и для повышения точности результатов прогнозирования осуществляется выделение более однородных совокупностей элементов.

Такое выделение может осуществляться как для подвижности населения, так и для самого населения. В частности, в подвижности могут быть выделены несколько составляющих в зависимости от целей передвижения: трудовая, деловая, культурно-бытовая подвижность.

Население обычно делится на три относительно однородных, с точки зрения транспортной подвижности, группы: самодеятельное, несамодеятельное и учащиеся. К первой группе относятся люди, занятые работой, ко второй – дети и пенсионеры, к третьей – учащиеся средних специальных и высших учебных заведений.

Тогда зависимость (4.36) приобретает более сложный вид:

$$N_n = \sum_i^{n_n} \sum_j^{n_n} P_{cij}, \quad (4.39)$$

где n_n – количество однородных групп населения; n_n – количество видов подвижности населения; P_{cij} – значение подвижности i -го вида для j -ой группы населения, передвижений/год.

Могут быть выделены другие виды подвижности и другие группы населения. Однако следует отметить, что значение подвижности населения может

быть определено только на основе анкетного обследования, которое обычно бывает выборочным из-за своей трудоемкости. Увеличение количества групп для этих показателей приводит к росту необходимого объёма выборки или использования метода квот для её формирования. И то и другое еще больше осложняет определение значений подвижности.

Необходимо также отметить, что данные о подвижности населения различных городов, приводимых в литературных источниках, относятся к достаточно отдаленным периодам времени, поскольку в последние годы подобные исследования не проводились. Поэтому перспективное планирование работы пассажирского транспорта сейчас не может претендовать на высокую степень точности результатов.

Кроме количества передвижений, в качестве исходной информации при перспективном планировании, часто используется и транспортная работа. Для её определения необходимо знать еще один показатель – среднюю дальность передвижения пассажиров l_{cp} . Исследования этого параметра в разных городах показали высокую степень зависимости l_{cp} от площади города. Поэтому наиболее общая модель для определения средней дальности передвижения выглядит следующим образом.

$$l_{cp} = 1,3 + b \cdot \sqrt{F}, \quad (4.40)$$

где F – площадь города, км²; b – коэффициент, определяющий наиболее вероятное ($b=0,3$), минимальное ($b=0,13$) и максимальное ($b=0,72$) значение средней дальности передвижения.

Зависимость средней дальности передвижения от численности населения городов с плотностью населения 7,5 тыс. чел/км², приведена на рис 4.6

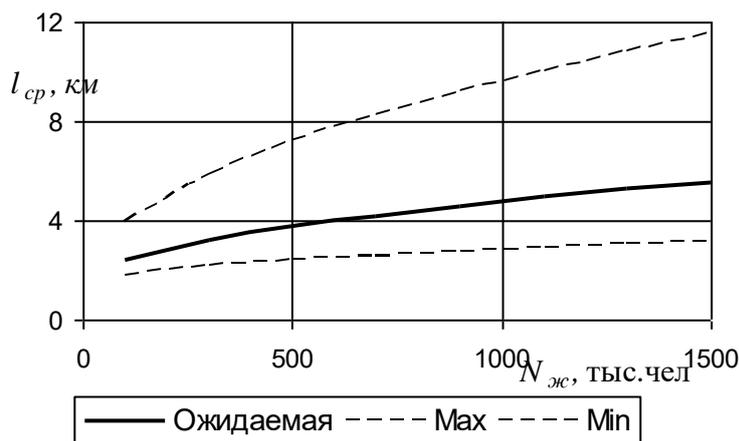


Рисунок 4.6

Транспортная работа для города P_2 на планируемый период определяется по зависимости:

$$P_2 = N_{жс} \cdot P_c \cdot l_{ср}. \quad (4.41)$$

Для уточнения значения средней дальности передвижения

может использоваться структуризация городов по типам застройки.

Во многих случаях транспортная работа является наиболее ценным в информационном плане показателем для перспективного планирования. Однако довольно большой разброс её значений вносит дополнительные неточности в прогноз. Определение значения средней дальности передвижения также основано на проведении специальных анкетных обследований.

4.2.2 Текущее планирование.

Наиболее часто решаемой задачей текущего планирования пассажирских транспортных систем является выбор для каждого периода времени варианта маршрутной сети. Существуют и более детальные вопросы, решаемые в рамках текущего планирования. Но даже для решения задачи маршрутизации недостаточно знания только валовых характеристик транспортной работы, которые могут использоваться в перспективном планировании. Для составления рационального варианта маршрутной сети требуется весьма детальная информация, которая должна быть представлена в виде матрицы сетевых корреспонденций.

Величина сетевой корреспонденции определяет количество пассажиров, желающих совершить передвижение между парой районов за определенный промежуток времени.

В отличие от грузовых перевозок количество клиентов транспортной системы здесь очень велико и каждый из них имеет разные потребности в пере-

движениях. Поэтому применение индивидуального подхода к клиентам при определении структуры внешней среды в данном случае весьма затруднено и используется только на уровне оперативного планирования.

Определение структуры внешней среды при решении задач текущего планирования пассажирских транспортных систем основано на законе больших чисел, содержание которого в широком смысле состоит в том, что при большом числе случайных явлений их средний результат практически перестает быть случайным, и предсказывается с большей определенностью.

Сам спрос на передвижения на текущем уровне планирования представляется в виде матрицы корреспонденций – квадратной матрицы, в каждой ячейке которой отражается количество поездок, совершаемых между районом отправления i (номер строки матрицы) и районом прибытия j (номер столбца матрицы) за рассматриваемый период.

Так как места начала и окончания поездок как-то распределены по всей территории исследуемого объекта, рассматривать каждое такое место отдельно, на уровне зданий, не представляется возможным. Поэтому всю рассматриваемую территорию предварительно делят на однородные, с транспортной точки зрения, транспортные районы, центры которых в модели выступают в качестве источников зарождения и поглощения поездок.

Процесс определения матрицы корреспонденции осложняется рядом факторов, обусловленных свойствами объекта исследования:

- 1. Отсутствие математического описания, определяющего основные причинно-следственные связи в процессе выбора пассажиром пары «жилье-работа».*
- 2. Стохастичность процессов формирования пассажиропотоков, обусловленная наличием большого количества второстепенных факторов, влияющих на точность прогноза.*
- 3. Нестационарность объекта во времени из-за изменений в планировочной структуре города и миграции населения.*

4. *Невоспроизводимость экспериментов, проявляющаяся в различной реакции объекта на одни и те же управляющие воздействия в различные моменты времени.*

5. *Активность объекта, обусловленная наличием в системе пассажирского транспорта людей с их индивидуальными целями и мотивами поведения.*

6. *Сложность сбора исходной информации о намерениях потенциальных пассажиров, которая необходима для использования моделей прогностического направления.*

Сложность задачи определила достаточно большое разнообразие методов определения матрицы корреспонденций, классификация которых приведена на рис. 4.7.

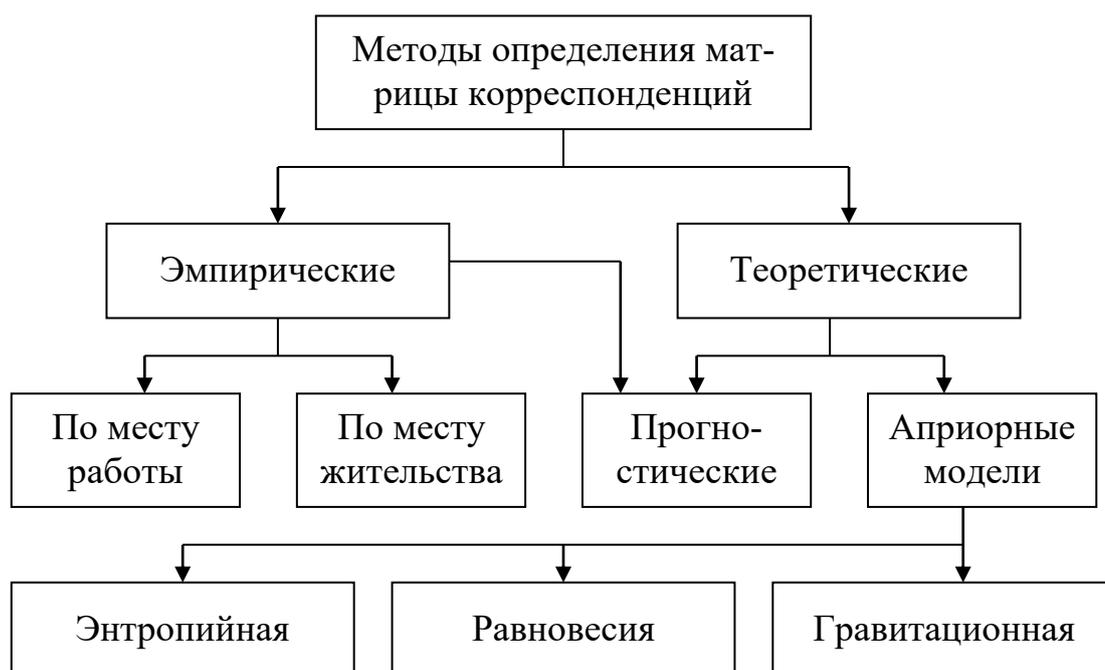


Рисунок 4.7

Наиболее надежными считаются эмпирические методы, основанные на проведении анкетных обследований.

Один из вариантов такого обследования предполагает заполнение индивидуальными респондентами анкет-вопросников, в которых они должны оха-

рактизовать направление и интенсивность своих передвижений, а также способ их реализации. Такие обследования всегда проводятся выборочным методом и не гарантируют точности полученной информации, как и все методы обследования намерений.

Большее распространение получил метод обследования трудовых передвижений. В его рамках анкеты заполняются на основании учетной информации о работниках, имеющейся у предприятия. Направление трудовых поездок определяется по адресу предприятия и адресу работников. В анкету заносится численность работников, проживающих на территории каждого почтового отделения города.

Этот метод весьма трудоемок, но позволяет получить достаточно объективные данные о трудовых корреспонденциях. Основным его недостатком, помимо высокой трудоемкости, является узкий охват корреспонденций по целям, так как он не дает никакой информации о культурно-бытовых передвижениях.

С развитием современных средств коммуникации появились новые источники информации о фактических передвижениях пассажиров, основанные на перемещениях мобильных телефонов. Эта информация имеется непосредственно у операторов мобильной связи, или может быть получена через приложения, используемые владельцем телефона. Такой способ, равно как и использование электронных карт оплаты стоимости проезда, представляет собой весьма перспективный вариант получения информации о потребностях населения в передвижениях и активно развивается в настоящее время.

Переход от результатов обследования к прогнозным значениям матрицы корреспонденций чаще всего осуществляется принятием допущения о постоянстве значений корреспонденций на прогнозируемый период (метод прогнозирования по последнему значению).

Полученная с помощью обследований информация также может быть использована для формирования матрицы корреспонденций с помощью **прогностических моделей**.

Самый простой вариант таких расчетов выглядит следующим образом. Имеется набор характеристик транспортных районов и связей между ними, полученный в результате обследования, а также вариант матрицы корреспонденций, таблицы 4.5 – 4.7.

Таблица 4.5 – Характеристика транспортных районов

№ транспортно-района	Показатель	
	Количество отправлений	Количество прибытий
<i>1</i>	HO_1	HP_1
<i>2</i>	HO_2	HP_2
...
<i>n</i>	HO_n	HP_n

Список характеристик транспортных районов может быть значительно шире и включать балльную оценку качественных характеристик.

В данном примере в качестве характеристик связей между районами приняты расстояния между ними. Но этот список может быть существенно расширен за счет включения в него других показателей, отражающих индивидуальные затраты пассажиров на передвижение.

Таблица 4.6 – Характеристика связей между районами (матрица расстояний)

Номера районов		Прибытия			
		<i>1</i>	<i>2</i>	...	<i>n</i>
Отправления	<i>1</i>	l_{11}	l_{21}	...	l_{n1}
	<i>2</i>	l_{12}	l_{22}	...	l_{n2}

	<i>n</i>	l_{1n}	l_{2n}	...	l_{nn}

Значения внутрирайонных расстояний l_{ii} в таблице 4.6 могут быть нулевыми. На основании этих данных составляется таблица 4.8, которая представляет собой набор исходных данных для составления модели «спрос-предложение». В ней каждое значение корреспонденции рассматривается как отдельный опыт, результаты которого определяются характеристиками транс-

портных районов и связей между ними.

Таблица 4.7 – Матрица корреспонденций

Номера районов		Прибытия			
		1	2	...	<i>n</i>
Отправления	1	h_{11}	h_{21}	...	h_{n1}
	2	h_{12}	h_{22}	...	h_{n2}

	<i>n</i>	h_{1n}	h_{2n}	...	h_{nn}

Таблица 4.8 – Данные для составления модели «спрос-предложение»

Значение корреспонденции h_{ij}	Общее количество отправок из района i , HO_i	Количество прибытий в район j , HP_j	Расстояние, l_{ij}
h_{11}	HO_1	HP_1	l_{11}
h_{12}	HO_1	HP_2	l_{12}
...
h_{1n}	HO_1	HP_n	l_{1n}
h_{21}	HO_2	HP_1	l_{21}
h_{22}	HO_2	HP_2	l_{22}
...
h_{nn}	HO_n	HP_n	l_{nn}

По этим данным составляется модель, которая для данного случая может иметь следующий вид.

$$h_{ij} = a_0 + a_1 \cdot HO_i + a_2 \cdot HP_j, \quad (4.42)$$

Подстановка прогнозных значений независимых признаков в (4.42) позволит рассчитать значения корреспонденций, относящихся к прогнозируемому периоду. Для реализации такого метода не обязательно иметь все значения матрицы корреспонденций, поэтому он может быть использован для расчета недостающих в матрице значений после проведения выборочного анкетного обследования. Однако оснований считать такой подход надёжным, он сам не

предоставляет, что, впрочем, относится и к остальным теоретическим методам моделирования спроса на пассажирские перевозки.

Особый класс методов определения матрицы корреспонденций составляют **априорные модели**, основанные на гипотезах относительно закономерностей формирования корреспонденций.

Равновесная модель основана на допущении о полной зависимости поведения индивидуума в транспортной системе города от поведения других участников транспортного процесса. С учетом этого был сделан вывод о существовании равновесного состояния в системе пассажирского транспорта и сформулирована постановка задачи определения матрицы корреспонденций.

Задачу прогнозирования спроса на транспортные услуги следует понимать как проблему поиска равновесного состояния пассажирской транспортной системы, которое является результатом коллективного поведения пассажиров в условиях заданных и ограниченных транспортных возможностей.

Равновесным называется состояние, в котором ни один из участников движения не может уменьшить свои индивидуальные затраты на передвижение за счет изменения пары «жилье-работа», пути следования или способа передвижения.

Для этих условий может быть записана система уравнений, позволяющая минимизировать суммарные транспортные затраты на передвижение. Равновесная модель не получила широкого распространения.

Энтропийная модель основана на допущении об аналогии процессов, происходящих внутри транспортных систем с термодинамическими процессами. Иными словами здесь используется допущение, прямо противоположное предыдущему – о полностью случайном поведении пассажиров в транспортной системе. Тогда величины корреспонденций определяются по принципу максимизации энтропии, согласно которому система с наибольшей вероятностью принимает максимально устойчивое состояние с минимумом внутренней энергии (максимумом энтропии).

В применении к задаче формирования матрицы корреспонденций этот принцип ведет к поиску решения уравнения:

$$\max S = \max\left(-\sum_i^n \sum_j^n h_{ij} \cdot \ln(h_{ij})\right), \quad (4.43)$$

где S – энтропия системы; n – количество транспортных районов.

При практических расчетах гипотеза о полностью случайном поведении пассажиров заменяется гипотезой о наличии априорной информации о предпочтениях пассажиров при выборе пары районов i и j . Тогда расчеты по энтропийной модели сводятся к поиску максимума уравнения:

$$\sum_i^n \sum_j^n h_{ij} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_{ij}}{h_{ij}}\right) \rightarrow \max, \quad (4.44)$$

где λ_{ij} – «идеальные» корреспонденции, соответствующие априорным предпочтениям населения.

Максимальное значение для (4.44) отыскивается при выполнении смысловых ограничений по ёмкостям транспортных районов по отправлению и прибытию.

$$\sum_j^n h_{ij} = HO_i; \sum_i^n h_{ij} = HP_i; \sum_i^n HO_i = \sum_j^n HP_j. \quad (4.45)$$

Основное достоинство энтропийной модели – простота её реализации на ЭВМ, которая привела к достаточно широкому её использованию. Недостатком является невысокая точность расчетов, которая, однако, характерна для всех априорных моделей.

Самое большое распространение из числа априорных моделей получила

гравитационная модель, основанная на допущении о сходстве взаимодействия между транспортными районами города с законом всемирного тяготения. В качестве массы в пассажирской системе выступают ёмкости транспортных районов по отправлению и прибытию. Общий вид зависимости для определения значений корреспонденций:

$$h_{ij} = f(NO_i; HP_i; c_{ij}), \quad (4.46)$$

где c_{ij} – функция индивидуальных издержек пассажиров при передвижении из района i в j .

Функция индивидуальных издержек пассажиров обычно принимается обратной либо дальности либо времени передвижения.

$$c_{ij} = l_{ij}^{-1}; c_{ij} = t_{ij}^{-1}, \quad (4.47)$$

где t_{ij} – время передвижения между районами i и j .

В реальных расчетах общий вид модели (4.46) чаще всего заменяется зависимостью (4.48), которая позволяет получить приемлемое решение, отражающие общие связи между параметрами в модели.

$$h_{ij} = NO_i \frac{HP_j \cdot c_{ij} \cdot k_j}{\sum_m HP_m \cdot c_{im} \cdot k_m}, \quad (4.48)$$

где k_{ij} – калибровочный коэффициент, обеспечивающий выполнение условий (4.45).

Вычисление матрицы корреспонденций обычно сводится к двухэтапной процедуре, пример которой приведен ниже. Для расчета матрицы необходимо иметь значения ёмкостей по отправлению и прибытию и задать коэффициенты

тяготения между районами. Однако обычно коэффициенты тяготения определяются на основе зависимостей (4.47), поэтому в исходную информацию включаются данные о расстояниях или времени передвижения между районами.

Пример расчета матрицы корреспонденций гравитационным методом.

Исходные данные:

Количество транспортных районов в исследуемом городе $n = 5$.

Ёмкость районов по отправлению и прибытию приведена в таблице 4.9, матрица кратчайших расстояний между районами – в таблице 4.10.

Таблица 4.9 – Характеристика транспортных районов

№ транспортного района	Количество отправлений, HO , чел	Количество прибытий, HP , чел
1	100	500
2	200	400
3	300	300
4	400	200
5	500	100

Таблица 4.10 – Матрица кратчайших расстояний L , км

Номера районов		Прибытия				
		1	2	3	4	5
Отправления	1	0	6	12	14	8
	2	14	0	7	8	11
	3	12	8	0	16	12
	4	14	8	13	0	14
	5	12,5	11	12	14	0

Порядок расчетов.

1. По зависимости (4.47) определяются значения функций тяготения c_{ij} .

Так как значения расстояний по главной диагонали матрицы L равны нулю, то значения коэффициентов тяготения для этого случая принимаются отдельно и зависимость (4.47) для данного примера приобретает следующий вид.

$$c_{ij} = \begin{cases} 0,2; & \text{при } i = j \\ l_{ij}^{-1}; & \text{при } i \neq j \end{cases} \quad (4.49)$$

Константа в первой части системы (4.49) представляет собой коэффициент тяготения для внутрирайонных корреспонденций и, в общем случае, может приниматься свободно.

Матрица коэффициентов тяготения C , рассчитанная по (4.49) приведена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Матрица коэффициентов тяготения C

Номера районов		Прибытия				
		1	2	3	4	5
Отправления	1	0,2	0,167	0,083	0,071	0,125
	2	0,071	0,2	0,143	0,125	0,091
	3	0,083	0,125	0,2	0,063	0,083
	4	0,071	0,125	0,077	0,2	0,071
	5	0,125	0,091	0,083	0,071	0,2

2. Рассчитывается промежуточная матрица D

Для расчета значений корреспонденций по зависимости (4.48) необходимо знание знаменателя дроби, для расчета которого удобно ввести промежуточную матрицу D , элементы которой определяются по зависимости (4.50).

$$d_{ij} = HP_j \cdot c_{ij} \cdot k_j. \quad (4.50)$$

Также вводится обозначение для суммы элементов матрицы D по i -ой строке $d_{\Sigma i}$.

$$d_{\Sigma i} = \sum_{m=1}^n d_{im}. \quad (4.51)$$

После указанных обозначений зависимость (4.48) можно записать в более

простой форме.

$$h_{ij} = HO_i \cdot \frac{d_{ij}}{d_{\Sigma}}. \quad (4.52)$$

На первом этапе расчетов значения калибровочных коэффициентов принимаются равными единице.

$$\forall k_i = 1. \quad (4.53)$$

Рассчитывается промежуточная матрица коэффициентов (4.50) и значения сумм в ней (4.51). Например.

$$\begin{aligned} d_{12} &= HP_2 \cdot d_{12} = 400 \cdot 0,167 = 66,7 \\ d_{21} &= HP_1 \cdot d_{21} = 500 \cdot 0,071 = 35,7 \\ d_{\Sigma 1} &= 100 + 66,7 + 25 + 14,3 + 12,5 = 218,5 \end{aligned}$$

Результаты остальных расчетов приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Промежуточная матрица D

Номера районов		Прибытия					d_{Σ}
		1	2	3	4	5	
Отправления	1	100	66,7	25	14,3	12,5	218,5
	2	35,7	80	42,9	25	9,1	192,7
	3	41,7	50	60	12,5	8,3	172,5
	4	35,7	50	23,1	40	7,1	155,9
	5	40	36,4	25	14,3	20	135,7

3. Определяется первый вариант матрицы корреспонденций H , на основании данных таблицы 4.12 по зависимости (4.52).

$$\begin{aligned} h_{11} &= HO_i \cdot \frac{d_{11}}{d_{\Sigma 1}} = 100 \cdot \frac{100}{218,5} = 46 \\ h_{12} &= HO_i \cdot \frac{d_{12}}{d_{\Sigma 1}} = 100 \cdot \frac{66,7}{218,5} = 31 \end{aligned}$$

Результаты остальных расчетов, а также суммы элементов матрицы корреспонденций по строкам и столбцам приведены в таблице 4.13. Суммы элементов матрицы рассчитываются для проверки выполнения условий (4.45).

Таблица 4.13 – Первый вариант матрицы корреспонденций H

Номера районов		Прибытия					HO'
		1	2	3	4	5	
Отправления	1	46	31	11	7	6	101
	2	37	83	45	26	9	200
	3	73	87	104	22	14	300
	4	92	128	59	103	18	400
	5	147	134	92	53	74	500
HP'		395	463	311	211	121	-

Результаты расчетов показывают, что ограничение по количеству прибытий в транспортные районы для матрицы корреспонденций выполнено. Это всегда обеспечивается способом расчета значений корреспонденций по зависимости (4.52).

В то же время, другая часть ограничения (4.45), касающаяся объёма прибытий не выполняется, так как расчетные значения ёмкостей транспортных районов по прибытию HP' не совпадают с исходными ёмкостями HP .

4. Рассчитываются значения корректировочных коэффициентов k_j по зависимости (4.54). Это необходимо для устранения погрешностей расчета.

$$k_j = \frac{HP_j}{HP'_j}. \quad (4.54)$$

Результаты расчета корректировочных коэффициентов приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Значения корректировочных коэффициентов

№ транспортного района, i	1	2	3	4	5
Корректировочный коэффициент, k_i	1,266	0,86	0,965	0,948	0,826

4. Необходимо повторить расчеты с учетом корректировочных коэффициентов, начиная со второго этапа. Но, так как уже имеется первый вариант промежуточной матрицы, значения новой промежуточной матрицы D' , удобнее рассчитывать на его основе по зависимости (4.55).

5.

$$d'_{ij} = d_{ij} \cdot k_j. \quad (4.55)$$

Тут же рассчитываются новые значения сумм для D' . Например.

$$d'_{12} = d_{12} \cdot k_2 = 66,7 \cdot 0,86 = 56,7$$

$$d'_{21} = d_{21} \cdot k_1 = 35,7 \cdot 1,266 = 45,2$$

$$d'_{\Sigma} = 126,6 + 57,6 + 24,1 + 13,6 + 10,3 = 232,2$$

Результаты остальных расчетов приведены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Окончательный вариант промежуточной матрицы D'

Номера районов		Прибытия					d'_{Σ}
		1	2	3	4	5	
Отправления	1	126,6	57,6	24,1	13,6	10,3	232,2
	2	45,2	69,1	41,4	23,7	7,5	186,9
	3	52,8	43,2	57,9	11,8	6,9	172,6
	4	45,2	43,2	22,3	37,9	5,9	154,5
	5	50,6	31,4	24,1	13,6	16,5	136,2

5. Окончательный вариант матрицы корреспонденций рассчитывается по зависимости (4.52), с использованием новых значений промежуточной мат-

рицы *D*. Результаты расчетов приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Окончательный вариант матрицы корреспонденций *H'*

Номера районов		Прибытия					<i>НО'</i>
		1	2	3	4	5	
Отправления	1	54	25	10	6	4	99
	2	48	74	44	25	8	199
	3	92	75	101	21	12	301
	4	117	112	58	98	15	400
	5	186	115	88	50	61	500
<i>НР'</i>		497	401	301	200	100	

Для этого варианта матрицы корреспонденций ограничения (4.45) выполняются с приемлемой точностью как для отправок из транспортных районов, так и для прибытий в них.

Приведенный пример свидетельствует о простоте алгоритмизации расчета матрицы корреспонденций по гравитационной модели и легкости его реализации на ЭВМ.

Но эта модель, как и другие из числа априорных не дает гарантий высокой точности расчетной матрицы. Основной причиной является тот факт, что в качестве фактора, обуславливающего значения корреспонденций принимается только затраты на передвижения между районами. В то же время на выбор пары «жилье-работа» безусловно, оказывают влияние и другие факторы, например стоимость жилья и наличие подходящего места работы. Исследования показывают, что в действительности транспортные факторы оказывают очень слабое влияние выбор людьми места работы при наличии собственного жилья. Нет никаких оснований предполагать, что и при аренде жилья, стоимость поездок станет ключевым фактором в выборе пары «жильё – работа».

Несмотря на это, основным подходом к определению исходной информации для решения задач текущего планирования пассажирских транспортных систем в настоящее время всё-таки являются априорные модели расчета матрицы корреспонденций и, в первую очередь гравитационная модель. Такая си-

туация обусловлена отсутствием общепринятых альтернатив этим методам и требует своего решения с целью повышения точности моделей спроса.

Здесь стоит отметить, что в настоящее время в мире выполняется достаточно большое количество работ по перспективному и текущему планированию работы городских, региональных и государственных транспортных систем. Это стало возможным с появлением программных продуктов, предназначенных для транспортного моделирования территориальных объектов, которые стали основным инструментом такого планирования.

Подобных программ существует достаточно много и может сложиться впечатление, что транспортным специалистам предоставлен полный и исчерпывающий выбор инструментов для транспортного планирования. Но, ни один из существующих программных продуктов, к сожалению, не гарантирует абсолютную точность прогноза и не предоставляет указаний к выбору наиболее подходящих средств моделирования из числа имеющихся в его арсенале. Этот арсенал состоит из программно реализованных, известных методов моделирования, количество и качество реализации которых определяет, насколько высок уровень программного продукта.

Наибольшее распространение в мире получили такие программные продукты, как AIMSUN, CUBE, EMME, SATURN, TransCAD, TRANSIMS и VISUM. Особенности каждого программного продукта здесь не приводятся, можно только отметить, что все они, в принципе, предназначены для решения одних и тех же задач – правильно распределить транспортные потоки по транспортной сети и рассчитать количественные характеристики поездок в ней.

Общими для них также являются и подходы к моделированию спроса на передвижения. Все они реализуют общепринятую в настоящее время, четырёх-этапную процедуру моделирования спроса, состоящую из *создания и распределения спроса, выбора системы транспорта и формирования транспортных (или пассажирских) потоков на сети.*

Под созданием спроса понимается определение объёмов отправок и

прибытий для транспортных районов, то есть заполнение табл. 4.9 из приведенного выше материала. Распределением спроса называется собственно процедура формирования матрицы корреспонденций. Два последних этапа относятся к моделированию выбора участниками транспортного процесса способов реализации потребности в передвижениях – вида транспорта и маршрута.

Для получения матрицы корреспонденций в этих программных продуктах чаще всего используется та же гравитационная модель, но при этом в них серьёзное внимание уделяется определению функции сопротивления, которая в приведенном выше примере описывается уравнением (4.49). В существующих методиках транспортного моделирования параметры этой функции принимаются, исходя из результатов обследования фактического спроса.

Однако это не гарантирует точность расчёта матрицы корреспонденций, что обусловлена сложностями этого процесса, описанными выше. Основная проблема моделирования спроса возникает как раз на этапе формирования матрицы. Ёмкости транспортных районов, которые являются суммами строк и столбцов матрицы, в большинстве случаев можно определить с достаточной точностью. Однако специфика самой матрицы, как объекта моделирования, заключается в том, что одним и тем же суммам может соответствовать очень большое количество вариантов заполнения её ячеек. И ни одна теоретическая модель не в состоянии дать точное описание количественному распределению направлений поездок в силу случайности этого процесса с транспортной точки зрения. Единственная информация, доступная транспортным инженерам – о дальности или продолжительности поездок, является только одним из факторов, формирующих спрос. При этом она никак не связана с источниками возникновения потребности в передвижениях, а только частично отражает негативную сторону передвижения. Достигнутый на сегодня уровень транспортного планирования требует существенного повышения точности моделей спроса на основе не только новых информационных технологий, но и новых подходов к отражению объективно существующих связей окружающего мира.

ТЕМА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

подавляющее большинство задач текущего транспортного планирования перевозок решается с участием транспортной сети либо в качестве элемента рассматриваемой системы, либо в качестве элемента внешней среды. Эта значимость транспортной сети подчеркнута в списках элементов транспортной системы при решении задач, как в области организации перевозок, так в сфере организации дорожного движения.

Самым простым примером модели транспортной сети может служить обычный атлас автомобильных дорог. Простота модели означает и её ограниченные возможности. Пользуясь атласом можно проложить маршрут движения между двумя точками или рассчитать расстояние между ними. Вот, пожалуй, и все.

Но для решения задач создания или организации работы даже относительно простых транспортных систем таких возможностей явно недостаточно. Для получения приемлемого решения чаще всего требуется просмотр значительного количества состояний транспортной системы, причем каждому состоянию присущ свой вариант трассировки путей следования транспорта. Выполнить такие расчеты без применения ЭВМ практически невозможно. Поэтому основной задачей моделирования транспортных сетей считается создание моделей, пригодных для проведения расчетов с ними на ЭВМ.

К настоящему времени разработано достаточно большое количество вариантов моделирования транспортной сети, отвечающих этим требованиям. Их классификация приведена на рисунке 5.1.

Следует учитывать, что при решении задач исследования транспортных систем, помимо описания путей передвижения рассматриваемого вида транспорта, обычно требуются дополнительные характеристики, такие как разрешенная скорость или количество полос движения, например, и в модели транспортной сети должна быть предусмотрена возможность их включения.

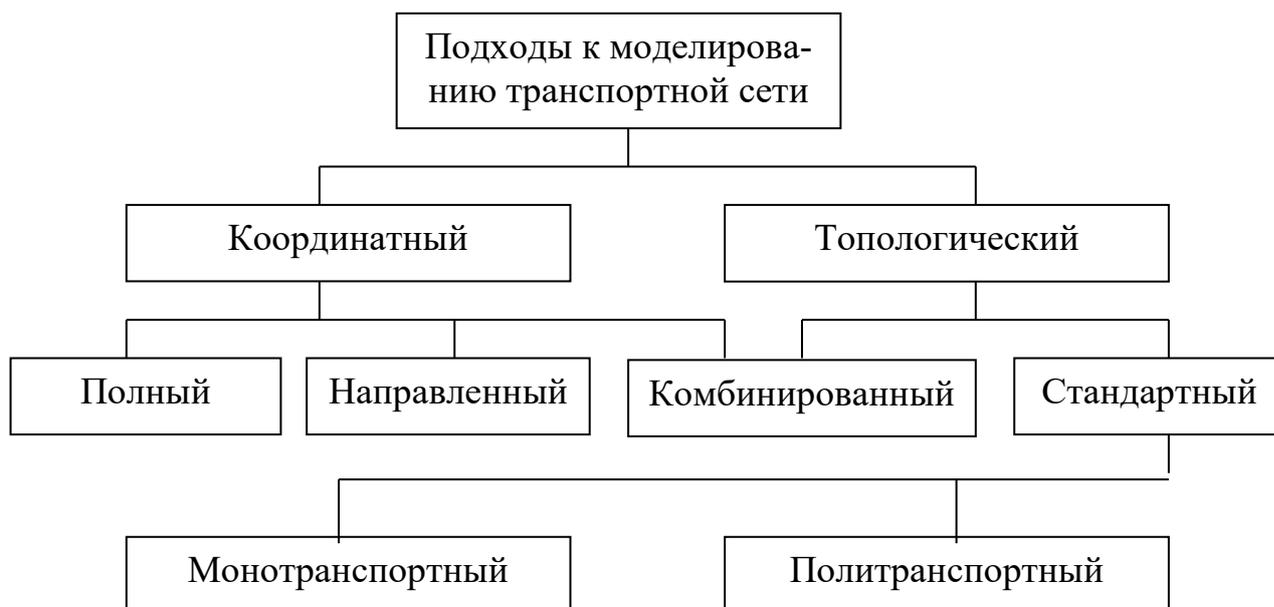


Рисунок 5.1 – Подходы к моделированию транспортной сети

Достаточное разнообразие методов моделирования транспортной сети вместе с её простотой, как объекта моделирования позволяет создавать весьма подробные модели, обеспечивающие проектировщика полной информацией о возможностях организации перевозок или движения транспорта на сети. Развитие вычислительной техники и программных средств моделирования позволили создать большие базы данных о существующих в мире транспортных сетях, которые в готовом виде можно использовать как основу для создания моделей конкретных транспортных объектов.

Однако для глубокого понимания особенностей и возможностей каждого варианта моделирования знакомство с основами моделирования транспортных сетей всё же необходимо.

5.1 Координатный метод моделирования транспортных сетей

Координатное моделирование представляет собой создание цифрового аналога карты, как модели транспортной сети.

Полный вариант координатного метода, является самым простым. В нем моделируемый объект представляется в прямоугольной системе координат, как

это показано на рисунке 5.2.

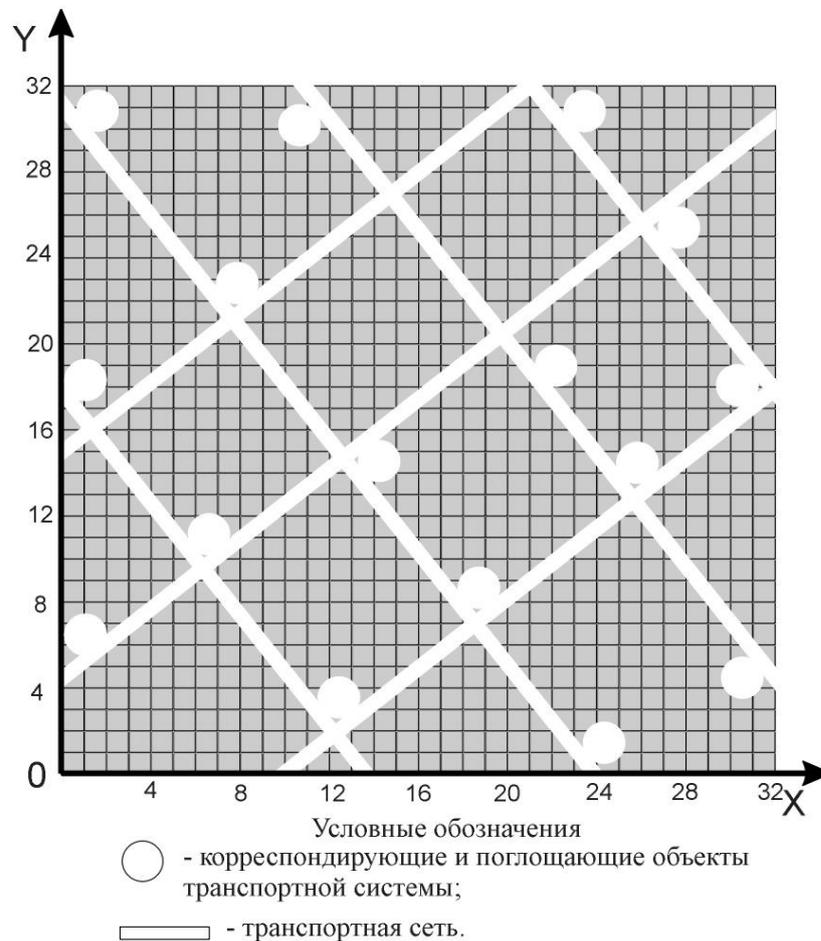


Рисунок 5.2

Примеры таких моделей приведены в таблицах 5.1 и 5.2. Для обеих матриц в пустых клетках подразумевается ноль. В матрице транспортной сети единица означает возможность проезда по соответствующему участку местности, ноль – отсутствие транспортных коммуникаций. В матрице с ёмкостями объектов положительными значениями отражены объёмы отправки, отрицательными – объёмы поглощения груза.

Приведенная в таблицах информация уже является пригодной для проведения расчетов на ЭВМ, то есть основная цель моделирования достигнута. Достаточно легко, например, организовать вычислительные процедуры по определению кратчайших расстояний и решению транспортной задачи.

Таблица 5.1 – Матрица транспортной сети

		Координата X																																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32						
К о р д и н а т а У	1										1			1										1															
	2											1	1											1	1														
	3											1	1	1									1	1															
	4										1	1			1	1							1	1															
	5	1									1						1						1											1	1				
	6		1								1	1						1		1	1												1	1					
	7			1	1					1	1								1	1												1	1						
	8				1				1	1								1	1	1	1										1	1							
	9					1	1	1										1					1	1							1								
	10						1	1									1	1						1	1					1	1								
	11					1	1		1								1	1							1	1		1	1										
	12					1				1	1						1									1	1	1											
	13				1	1					1	1				1	1										1	1											
	14			1	1									1	1	1										1	1		1										
	15	1		1										1	1										1	1					1	1							
	16		1	1										1	1	1								1	1							1	1						
	17		1	1	1								1	1			1	1						1	1										1				
	18	1			1	1						1	1					1						1													1		
	19						1					1								1		1	1													1	1		
	20							1			1	1										1	1												1	1			
	21								1	1											1	1	1	1										1	1				
	22									1	1	1							1	1					1										1	1			
	23								1								1	1							1						1	1							
	24						1	1						1			1	1								1	1	1	1										
	25					1	1								1	1	1										1	1											
	26				1	1									1	1												1	1	1									
	27				1										1		1										1	1				1							
	28			1	1										1	1			1							1							1	1					
	29		1	1											1	1					1	1				1	1							1	1				
	30		1												1							1	1		1	1										1	1		
	31	1												1	1									1	1	1												1	
	32											1	1												1														

Этот метод моделирования является очень универсальным. С его помощью можно описать сколь угодно большое количество характеристик транспортной сети, что достигается вводом соответствующих матриц. Но эта универсальность имеет и обратную сторону, методы расчетов являются не только очень простыми в программной реализации, но и очень неэффективными. Для расчета кратчайших расстояний требуется многократный просмотр матрицы транспортной сети и сократить количество расчетов не представляется возможным.

сети, возможны более компактные способы представления. Это в полной мере относится к ёмкостным характеристикам транспортных объектов. Они могут описываться простыми линейными массивами, просто к числу их содержательных характеристик добавляются координаты объекта.

Но этот способ представления не подходит к самому главному – моделированию транспортных магистралей.

Большой объём информации препятствует также повышению точности модели. Основным способом повышения точности является сокращение размеров ячейки в координатной сетке. Это приводит к увеличению количества ячеек и, соответственно, к увеличению размеров матриц. Двукратное сокращение линейных размеров ячейки приводит к четырехкратному увеличению их количества и к такому же росту требований к памяти ЭВМ. Продолжительность расчетов в этом случае возрастает многократно из-за способа их реализации.

Указанные недостатки были устранены в геоинформационных системах, с появлением в начале 90-х годов прошлого столетия шейп-файлов. Их структура, разработанная частным американским институтом исследования систем окружающей среды, оказалась настолько удачной, что практически стала стандартом геоинформационных систем и используется для обмена данными между разными программными продуктами, в том числе и упомянутыми в предыдущем разделе пакетами транспортного моделирования. Ни один уважающий себя разработчик такой программы не позволит себе обойтись без опции импорта шейп-файла.

Шейп-файл – это векторный формат хранения географических данных, преимуществом которого является удачный выбор геометрических объектов, которые в нём отображаются. Основными из них являются точка, полилиния – объект, состоящий из нескольких линий (ломаных), которые могут соприкасаться и пересекаться, и полигон – территория, которая может состоять из нескольких частей с пустотами.

Отказ от описания каждой точки на территории моделируемого объекта

привёл к кардинальному сокращению размеров соответствующих баз данных и сделал описание объектов направленным, а не сплошным, что позволило избавиться от недостатков полного координатного метода без потери точности моделирования объектов на территории.

Элементарным объектом в шейп-файле является точка, служащая основой для описания всех остальных объектов. Сама точка описывается двумя или тремя (в случае учёта высоты расположения объекта над уровнем моря) координатами, заданными в одной из существующих координатных систем Земли.

Каждый из более сложных объектов описывается соответствующим набором точек. При этом предполагается, что соседние точки полилиний или границ полигонов соединяются по прямой линии. Поэтому для описания кривых используются полилинии, представляющие приближённый к траекториям кривых набор прямых отрезков.

Непрерывность прямых отрезков позволяет без труда вычислять точки их пересечения, которые описывают соответствующие перекрёстки транспортных путей. Однако для задания дополнительных параметров такого пересечения, например продолжительности светофорного цикла, в шейп-файле нужно создавать отдельный объект.

Это обусловлено более общим характером геоинформационных систем, в которых используются шейп-файлы, по сравнению с транспортными моделями, а практика извлечения данных из таких файлов для транспортных расчётов является только частным случаем их применения.

Тем не менее, шейп-файлы широко используются в геоинформационных системах для решения отдельных транспортных задач, основной из которых, является поиск альтернативных путей следования между парой точек на карте. И опыт подобного их использования нельзя не признать успешным, все бытовые навигационные системы используют шейп-файлы.

Однако, для создания специальных транспортных моделей, тех возможностей, которые они предоставляют, далеко не всегда бывает достаточно. Это

привело к широкому использованию другого подхода к моделированию транспортных сетей – топологическому.

5.2 Топологические метод моделирования транспортных сетей

Топологический метод представляет собой один из наиболее формализованных методов представления исследуемых сетей (не обязательно транспортных), в виде многоуровневых систем. Исследуемый объект представляется как совокупность двух элементов – наборов вершин и звеньев, в каждый из которых, в свою очередь, входит по несколько элементов.

*Транспортная сеть представляется как **граф**, который состоит из N вершин и A ребер (звеньев). $G = [N, A]$.*

***Вершинами** представляются объекты, между которыми осуществляется перемещение рассматриваемого объекта перевозок, **звеньями** – участки транспортной сети, по которым осуществляется это перемещение.*

Примерами вершин графа могут служить перекрестки, крупные транспортные узлы, вокзалы, населенные пункты, пункты погрузки-разгрузки, пункты пересадок пассажиров, остановки городского пассажирского транспорта и так далее. Вершина представляет собой точку на графе (топологической схеме) транспортной сети.

Звеньями графа описываются коммуникации различных видов транспорта, соединяющих вершины. Например, участки автомобильных дорог, железные дороги, естественные пути передвижения и др. Каждое звено соединяет между собой две смежные вершины и представляет собой отрезок на графе транспортной сети.

Конкретное содержание вершин и звеньев в модели определяется свойствами объекта и нюансами решаемой задачи. Но особенностью всех топологических моделей транспортных сетей является описание участков улично-дорожной сети с помощью звеньев, обязательно соединяющих между собой две вершины. В такой модели вершины являются объектами, однозначно свя-

занными со звеньями, но имеющими своё собственное предназначение и свой набор характеристик. Звенья в модели не могут быть определены без вершин, а вершины не имеют смысла, если ими не начинается или не заканчивается хотя бы одно звено.

В транспортных моделях вершины в основном используются для описания перекрёстков, на которых происходят кардинальные изменения условий движения по пересекающимся участкам транспортной сети. Однако вершины нужно использовать и там, где на участке сети изменяется количество (ширина) полос, дорожное покрытие или максимально разрешённая скорость движения. При построении детальной модели ими, например, можно описывать места прохождения пешеходных переходов через улицу или места установки устройств принудительного снижения скорости. Список объектов, которые могут быть описаны с помощью вершин, можно продолжать и дальше, но правильнее сформулировать их предназначение таким образом: *вершинами в транспортной модели описываются все точки на транспортной сети, в которых изменяются условия движения по участкам.*

Из того, что все места изменения условий движения по участкам описываются вершинами, следует, что звенья в транспортной модели описывают исключительно участки, имеющие одинаковые характеристики по всей их длине. Это утверждение, несмотря на свою категоричность, не должно вызывать сомнений в своей справедливости, так как предлагаемый разработчиками программного обеспечения по транспортному моделированию перечень характеристик звеньев в модели, предполагает задание ровно одного значения для каждого из них.

Такая степень формализации абсолютно необходима для создания действующей транспортной модели и вопрос состоит только в предлагаемых разработчиками возможностях в плане детализации, при описании реальной транспортной сети. Но, вне зависимости от неё, в любой транспортной модели все звенья будут однородными по перечню своих характеристик, что полно-

стью обеспечивается топологическим подходом к её моделированию.

Размерность графа определяется количеством вершин в нем. При заданном количестве вершин, количество звеньев для разных объектов обычно колеблется незначительно. В большинстве случаев нумерация вершин не носит принципиального характера и может быть свободной.

Топологическая схема транспортной сети, изображенной на рисунке 5.2, приведена на рисунке 5.3.

Над каждым звеном указана его длина в миллиметрах. В приведенном примере длина звеньев в прямом и обратном направлении одинакова, однако так бывает не всегда.

Топологическая схема транспортной сети является промежуточным этапом моделирования, а конечной целью является математическая модель транспортной сети. Для её формирования необходимо представить топологическую сеть в виде набора упорядоченных массивов, аналогично тому, как это сделано в координатном методе.

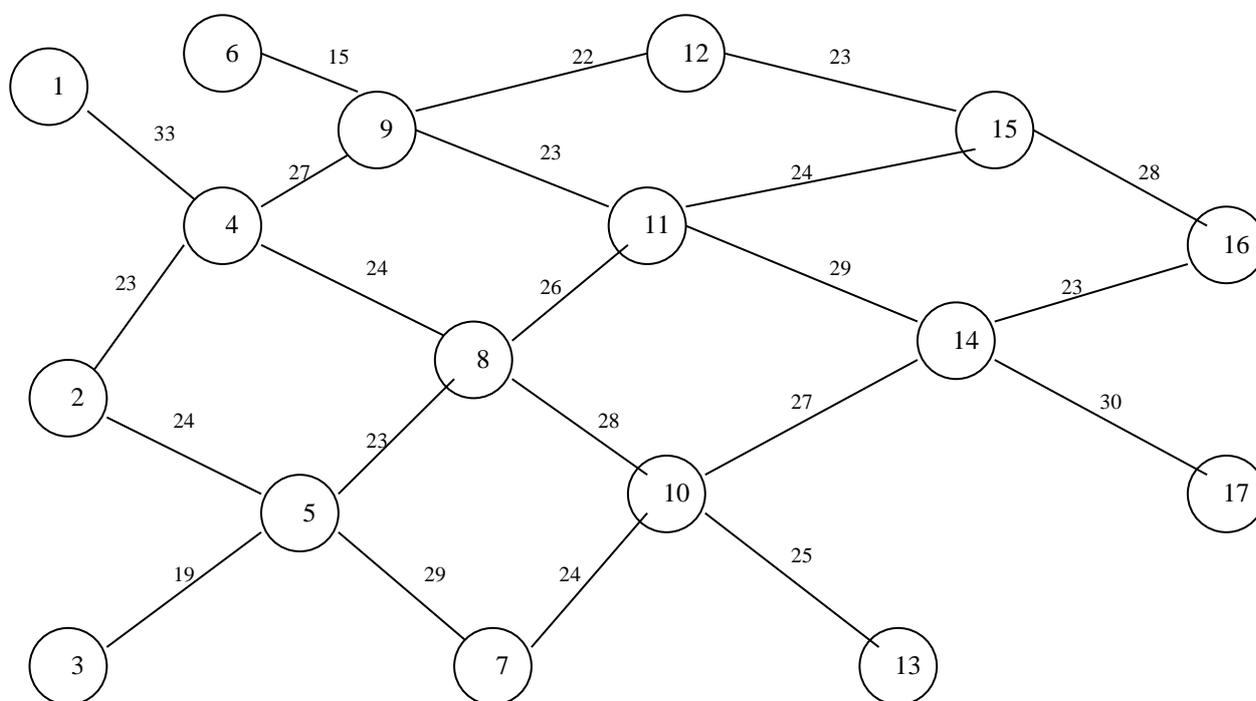


Рисунок 5.3 – Топологическая схема транспортной сети

Описанием транспортной сети при топологическом методе моделирования называется упорядоченное перечисление звеньев транспортной сети с указанием их характеристик.

С точки зрения используемого программного обеспечения порядок описания транспортной сети не важен. Но следует учитывать, что в реальных задачах количество рассматриваемых объектов может значительно превышать размерность приведенного на рисунке 5.2 графа. Соответственно этому массив с описанием транспортной сети будет иметь значительные размерности. В таких случаях заполнение этого массива является весьма трудоемким этапом моделирования, во время выполнения которого высока вероятность возникновения ошибок. В то же время самый эффективный способ избежать ошибок – это визуальная проверка соответствия модели реальному объекту. Однако этот способ эффективен на стадии формирования топологической схемы, но не может применяться на стадии её математического описания.

Поэтому на этапе математического описания топологической схемы так важен порядок описания транспортной сети. Он имеет двойное назначение: с одной стороны он призван облегчить ввод информации о транспортной сети для снижения вероятности возникновения ошибок описания, с другой стороны – полученный массив упорядочивается для упрощения поиска и устранения возможных ошибок описания сети.

В наибольшей степени этому назначению отвечает **порядок описания транспортной сети**, в котором за основу приняты номера начала и окончания звеньев. В соответствии с этим топологическая схема описывается следующим образом:

1. *За стартовое значение номера начала звена принимается район с минимальным текущим номером (№1 в начале описания).*
2. *Просматриваются все звенья, выходящие из текущего района, и определяются пункты окончания звеньев.*
3. *Отобранные звенья упорядочиваются по порядку возрастания номе-*

ров их окончания и заносятся в массив исходной информации.

4. Принимается следующий по порядку пункт начала звена и действия повторяются, начиная с пункта 2.

Приведенный порядок соответствует случаю, когда длины звеньев в прямом и обратном направлениях могут отличаться друг от друга.

Описание топологической схемы, которая изображена на рисунке 5.3, приведено в таблице 5.3.

Дополнительная информация, необходимая для решения задачи также представляется в виде линейных массивов, которые приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.3 – Математическое описание транспортной сети

Начало звена	Окончание звена	Длина звена	Начало звена	Окончание звена	Длина звена
1	4	33	9	12	22
2	4	23	10	7	24
2	5	24	10	8	28
3	5	19	10	13	25
4	1	33	10	14	27
4	2	23	11	8	26
4	8	24	11	9	23
4	9	27	11	14	29
5	2	24	11	15	24
5	3	19	12	9	22
5	7	29	12	15	23
5	8	23	13	10	25
6	9	15	14	10	27
7	5	29	14	11	29
7	10	24	14	16	23
8	4	24	14	17	30
8	5	23	15	11	24
8	10	28	15	12	23
8	11	26	15	16	28
9	4	27	16	14	23
9	6	15	16	15	28
9	11	23	17	14	30

Таблица 5.4 – Ёмкости объектов по генерации и поглощению грузов

Объём, т	Номер района								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Генерации	0	0	20	0	0	0	0	0	30
Потребления	5	20	0	15	10	20	15	20	0
Объём, т	Номер района								Всего
	10	11	12	13	14	15	16	17	
Генерации	0	30	0	0	10	10	50	0	150
Потребления	10	0	10	15	0	0	0	10	150

Целью большинства расчетов, проводимых с транспортными сетями, является получение характеристик связей между вершинами, то есть получение более сложных и информативных моделей транспортной сети для дальнейшего использования. С точки зрения способов представления информации это выглядит как превращение линейных массивов с характеристиками вершин и звеньев в начале расчетов в квадратные массивы с характеристиками связей между ними. И в этом состоит основное преимущество топологического метода моделирования транспортных сетей, по сравнению с шейп-файлами. Последние используются исключительно для получения линейных наборов альтернативных вариантов пути между выбранными парами точек, не между каждой возможной парой, а только одной из них.

В качестве **характеристик звеньев** могут выступать:

- *длина участка транспортной сети;*
- *время проезда по участку;*
- *пропускная способность участка;*
- *количество полос движения;*
- *разрешённая скорость движения;*
- *качественные характеристики участка (например, возможность проезда тем или иным видом транспорта);*
- *многое другое.*

Возможные **характеристики вершин**:

- *объём зарождения и поглощения корреспонденций различного вида;*
- *перерабатывающая способность;*
- *пространственные характеристики вершин;*
- *количественная характеристика цикла светофорного регулирования;*
- *качественные признаки (например, возможность организации конечного остановочного пункта маршрутов);*
- *многое другое.*

В программных продуктах по транспортному моделированию обычно предусматриваются резервные поля в характеристиках вершин и звеньев, для того, чтобы транспортный инженер имел возможность задать в модели любые, необходимые для решения конкретной задачи, данные.

Эта исходная информация после расчетов преобразуется в **характеристики связей**, к числу которых могут относиться:

- *взаимные корреспонденции грузов или пассажиров;*
- *расстояния или время следования между районами;*
- *указатель на кратчайший путь;*
- *характеристики пути следования (например, возможность проезда тем или иным видом транспорта);*
- *другие характеристики связей.*

Обычно характеристики связей являются только промежуточным этапом в поиске оптимального варианта управления объектом. Например, матрица корреспонденций является необходимой исходной информацией для составления рациональных маршрутов перевозки. Но дальнейшие расчеты в большей степени относятся к моделированию транспортных систем в целом и в данном разделе не рассматриваются. Здесь же будут приведены два примера характеристик связей между вершинами, которые имеют непосредственное отношение к транспортной сети, то есть являются вариантом её моделирования.

В таблице 5.5 приведена матрица кратчайших расстояний для объекта в рассматриваемом примере.

Таблица 5.5 – Матрица кратчайших расстояний

Номер	пункта прибытия																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
пункта отправления	1	0	56	99	33	80	75	109	57	60	85	83	82	110	112	105	133	142
	2	56	0	43	23	24	65	53	47	50	75	73	72	100	102	95	123	132
	3	99	43	0	66	19	106	48	42	91	70	68	113	95	97	92	120	127
	4	33	23	66	0	47	42	76	24	27	52	50	49	77	79	72	100	109
	5	80	24	19	47	0	87	29	23	72	51	49	94	76	78	73	101	108
	6	75	65	106	42	87	0	116	64	15	92	38	37	117	67	60	88	97
	7	109	53	48	76	29	116	0	52	101	24	78	123	49	51	102	74	81
	8	57	47	42	24	23	64	52	0	49	28	26	71	53	55	50	78	85
	9	60	50	91	27	72	15	101	49	0	77	23	22	102	52	45	73	82
	10	85	75	70	52	51	92	24	28	77	0	54	99	25	27	78	50	57
	11	83	73	68	50	49	38	78	26	23	54	0	45	79	29	24	52	59
	12	82	72	113	49	94	37	123	71	22	99	45	0	124	74	23	51	104
	13	110	100	95	77	76	117	49	53	102	25	79	124	0	52	103	75	82
	14	112	102	97	79	78	67	51	55	52	27	29	74	52	0	51	23	30
	15	105	95	92	72	73	60	102	50	45	78	24	23	103	51	0	28	81
	16	133	123	120	100	101	88	74	78	73	50	52	51	75	23	28	0	53
	17	142	132	127	109	108	97	81	85	82	57	59	104	82	30	81	53	0

Эта матрица является самым распространенным результатом начальных расчетов с транспортными сетями и весьма информативной моделью транспортной сети, достаточной для решения многих оптимизационных задач.

Но, в отдельных случаях, недостаточно знания расстояний между пунктами, а требуется информация о пути следования между ними. Один из способов моделирования путей передвижения между районами приведен в таблице 5.6. В каждой ячейке матрицы записан пункт, предпоследний перед районом прибытия, на пути из района отправления. Имея информацию о предпоследних пунктах можно отследить кратчайший путь следования между районами. В строке с номером пункта отправления, и в столбце с номером пункта прибытия стоит номер района, который предшествует пункту прибытия на кратчайшем пути. Выписав этот номер, считаем его следующим пунктом прибытия и повторяем операцию до тех пор, пока номер района в ячейке не совпадет с номером пункта отправления.

Таблица 5.6 – Матрица предпоследних пунктов

Номер	пункта прибытия																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
пункта отправления	1	1	4	5	1	8	9	10	4	4	8	9	9	10	11	12	15	14
	2	4	2	5	2	2	9	5	5	4	8	9	9	10	11	12	15	14
	3	4	5	3	8	3	9	5	5	11	8	8	9	10	11	11	15	14
	4	4	4	5	4	8	9	10	4	4	8	9	9	10	11	12	15	14
	5	4	5	5	8	5	9	5	5	11	8	8	9	10	11	11	15	14
	6	4	4	5	9	8	6	10	11	6	8	9	9	10	11	12	15	14
	7	4	5	5	8	7	9	7	10	11	7	8	9	10	10	16	14	14
	8	4	5	5	8	8	9	10	8	11	8	8	9	10	11	11	15	14
	9	4	4	5	9	8	9	10	11	9	8	9	9	10	11	12	15	14
	10	4	5	5	8	8	9	10	10	11	10	8	9	10	10	16	14	14
	11	4	4	5	9	8	9	10	11	11	8	11	9	10	11	11	15	14
	12	4	4	5	9	8	9	10	11	12	8	9	12	10	16	12	15	14
	13	4	5	5	8	8	9	10	10	11	13	8	9	13	10	16	14	14
	14	4	4	5	9	8	9	10	11	11	14	14	15	10	14	16	14	14
	15	4	4	5	9	8	9	10	11	12	14	15	15	10	16	15	15	14
	16	4	4	5	9	8	9	10	11	12	14	15	15	10	16	16	16	14
	17	4	4	5	9	8	9	10	11	11	14	14	15	10	17	16	14	17

Например, чтобы определить последовательность прохождения районов на пути из района №2 в район №17, необходимо во второй строке матрицы предпоследних пунктов найти элемент в семнадцатом столбце, это будет район №14. Затем нужно найти элемент, стоящий в той же строке и четырнадцатом столбце – №11. Эти действия повторяются до тех пор, пока не будет найден №2 в очередной ячейке. Это означает, что весь кратчайший путь отслежен. Результатом поиска в этом примере будет путь: 2 – 4 – 9 – 11 – 14 – 17. Это один из самых простых примеров математического моделирования транспортных сетей, который не дает возможности описать два или более варианта пути следования, если они имеют одну длину. Для получения более точных и информативных моделей требуются и более сложные способы моделирования.

В используемом примере длины всех звеньев в прямом и обратном направлении одинаковы. В общем случае это не всегда бывает так, что обусловлено наличием улиц с односторонним движением, различных типов транс-

портных развязок, ограничений по организации движения для отдельных видов транспорта и другими причинами. Приведенный выше порядок описания транспортной сети и приведенные в таблице 5.3 результаты его применения предусматривают такую возможность, длины звеньев могут отличаться по направлениям.

Однако, как отмечалось выше, при описании транспортных сетей серьезной проблемой является значительная трудоемкость этого процесса и, как следствие, высокая вероятность возникновения ошибок описания. И, в отдельных случаях, целесообразно отказаться от возможности характеризовать длину каждого звена в обоих направлениях, для сокращения объема вводимой информации.

Для этого делается допущение о том, что длина всех моделируемых участков транспортной сети одинакова по направлениям. Такому допущению соответствует симметричный граф.

Симметричным называется граф транспортной сети, характеристики звеньев которого одинаковы в прямом и обратном направлениях.

Использование симметричного графа позволяет вдвое сократить объем описания транспортной сети, существенно снизить вероятность возникновения ошибок описания и облегчить их поиск и устранение.

Симметричные графы используются в моделях объектов, имеющих большую размерность и не требующих высокой точности расчета расстояний.

Порядок описания симметричного графа отличается от общего только содержанием третьего пункта. Здесь он имеет следующий вид: – отобранные звенья упорядочиваются по порядку возрастания номеров их окончания, в массив исходной информации заносятся те звенья, номер окончания которых больше номера начала.

Описание топологической схемы, которая изображена на рисунке 5.3, в виде симметричного графа приведено в таблице 5.7.

Таблица 5.7– Математическое описание симметричного графа транспортной сети

Начало звена	Окончание звена	Длина звена	Начало звена	Окончание звена	Длина звена
1	4	33	8	11	26
2	4	23	9	11	23
2	5	24	9	12	22
3	5	19	10	13	25
4	8	24	10	14	27
4	9	27	11	14	29
5	7	29	11	15	24
5	8	23	12	15	23
6	9	15	14	16	23
7	10	24	14	17	30
8	10	28	15	16	28

По сравнению с координатным методом моделирования, топологические схемы имеют весомые преимущества, обусловленные их специализацией. В отличие от координатного подхода, который может использоваться для представления самых разнообразных объектов, графы в основном созданы для моделирования именно таких объектов как транспортные сети.

Но у топологического подхода существует и недостаток, приобретающий весьма серьезный характер при моделировании транспортной сети для решения задач в сфере организации дорожного движения. Он заключается в отсутствии пространственной ориентации графа. Для иллюстрации этой особенности можно вернуться к рисунку 5.3 и перерисовать его несколько иначе, как это показано на рисунке 5.4.

Математическое описание новой топологической схемы будет полностью соответствовать описанию, приведенному в таблицах 5.3 и 5.7, что свидетельствует о большой свободе при представлении транспортной сети в виде топологической схемы. Но это также свидетельствует о том, что на этом этапе теряется пространственная ориентация графа. Глядя на него нельзя, например, с точностью сказать, левый или правый поворот необходимо выполнить в 4-ом

пункте на пути из 1-го района в 9-ый, и вообще есть ли там поворот.

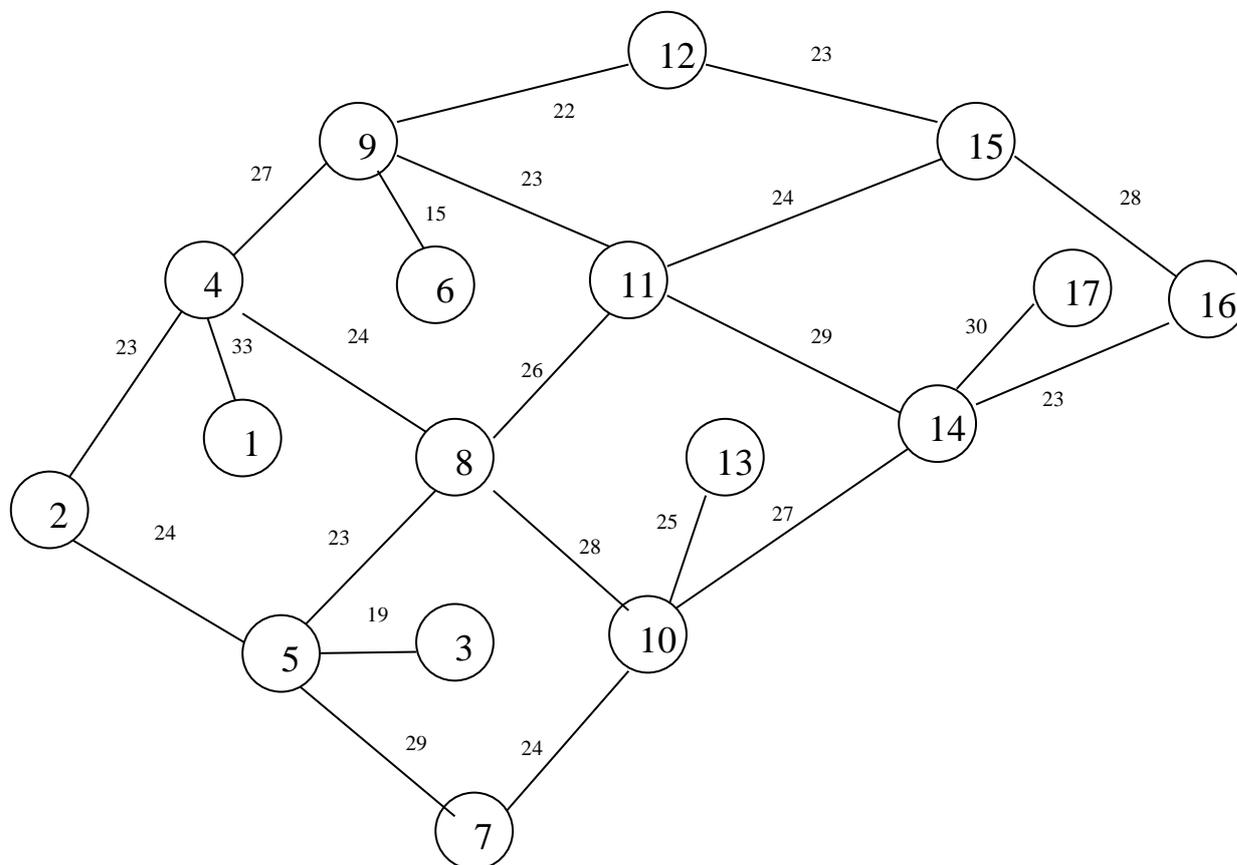


Рисунок 5.4 – Топологическая схема транспортной сети

Конечно, можно вернуться к модели более низкого уровня – карте и выяснить вопрос на ней. Но эти действия может выполнить человек, а математическая модель сети, которая передается для расчетов в ЭВМ, программному обеспечению сделать этого не позволяет. Если же рассматриваются задачи в сфере организации дорожного движения, то знание направления движения совершенно необходимо, так как на указании возможных направлений движения основана значительная часть средств управления движением.

Для устранения этого недостатка при проведении соответствующих расчетов используется **комбинированный координатно-топологический метод** при котором в число характеристик вершин графа включаются их координаты (см. рисунок 5.1).

Ввод координат позволяет легко рассчитать угол поворота дороги в

транспортной сети при пересечении вершины и определиться с направлением движения. Этот способ также позволяет упростить процесс описания графа транспортной сети, так как при решении задач в сфере организации дорожного движения вершинами графа служат перекрестки, а большинство участков являются прямыми, соединяющими соседние перекрестки. Тогда для расчета их длины можно использовать зависимость (5.2). Следует отметить, что все современные программные продукты по транспортному моделированию используют именно комбинированный координатно-топологический метод.

В классификации методов моделирования транспортной сети, приведенной на рисунке 5.1, также выделены два разных подхода к формированию топологических схем – **монотранспортный** и **политранспортный**.

Большинство задач в сфере организации перевозок решается для одного вида транспорта, и стандартный вариант топологического метода предназначен для моделирования монотранспортной сети. Однако существуют задачи в сфере организации пассажирских перевозок и дорожного движения, при которых необходимо выделять несколько видов транспортных средств, для которых будут отличаться возможности проезда по разным участкам транспортной сети. В этой ситуации применяются два варианта моделирования.

В первом случае создается столько монотранспортных графов, сколько видов транспортных средств рассматривается в задаче. Однако этот метод не очень эффективен в данном случае, так как объективно единая транспортная сеть представляется несколькими графами и в модели сложно отследить взаимодействие между различными видами транспортных средств.

Во втором случае применяются политранспортные графы, которые отличаются от монотранспортных расширенным списком характеристик звеньев. В них включена характеристика возможности проезда тем или иным видом транспорта.

Некоторое усложнение в составлении модели транспортной сети приводит в соответствие моделируемый объект и модель, а также приносит значи-

тельное расширение возможностей модели. С учетом дополнительной информации можно рассчитать матрицы расстояний и варианты пути следования для каждого вида транспорта без нарушения взаимодействия между ними, так как теперь это единый граф, имеющий одно множество вершин и звеньев.

Используемый в данной главе для иллюстрации методов моделирования пример транспортной сети является очень простым и не может отразить основных сложностей моделирования. Он служит хорошим примером только для задач в сфере организации междугородных перевозок грузов или пассажиров. А сложности возникают при решении задач в городах и связаны с особенностями объектов, которые представляются в виде вершин графа транспортной сети.

Из всего класса рассматриваемых задач выделяются два крайних, с точки зрения топологического метода моделирования, случая. Первый возникает при решении задач в сфере организации грузовых перевозок. Второй – при решении задач в сфере пассажирских перевозок и организации дорожного движения.

В сфере организации грузовых перевозок вершинами графа представляются грузоотправляющие и грузопоглощающие объекты. К ним относятся станции, заводы, склады, магазины и так далее. Характерным для них является относительно небольшая площадь. В этом случае для любого количества объектов, описываемых вершинами в графе транспортной сети можно записать неравенство (5.3):

$$\sum_i^{n_g} S_i \ll S_g, \quad (5.1)$$

где n_g – количество вершин в графе транспортной сети; S_i – площадь объекта, представляемого i -ой вершиной графа транспортной сети; S_g – площадь города, для которого составляется модель транспортной сети.

Для данного случая характерны проблемы с точным представлением

транспортной сети. Дело в том, что сама транспортная сеть в основном описывается перекрестками транспортных магистралей, но поскольку расположение объектов определяется далеко не целями моделирования, то размещение объектов на перекрестке является частным случаем. Пример такого объекта приведен на рисунке 5.5.

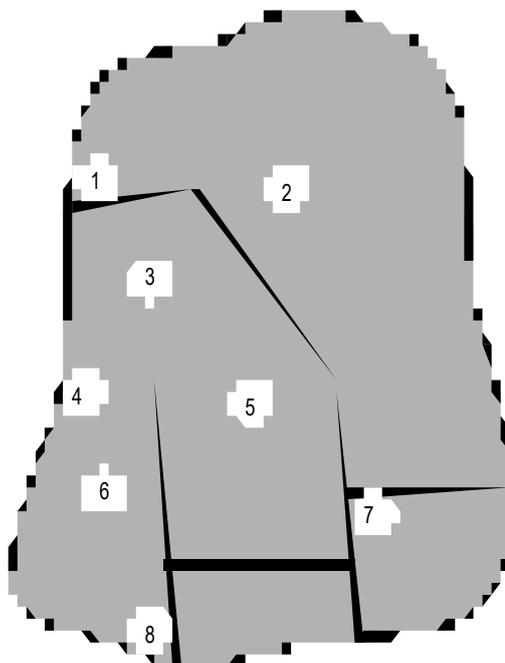


Рисунок 5.5 – Пример размещения объектов при грузовых перевозках

Хотя, возможно, получился бы и другой вариант, поскольку здесь пришлось принимать решения в условиях неоднозначности. При этом варианте не все участки транспортной сети описаны графом, что влечет за собой существенное снижение точности расчетов. И еще один недостаток такого моделирования – потеря наглядности топологической схемы, что серьезно сказывается на возможностях визуального контроля качества моделирования.

Помочь в описании транспортной сети, для этих случаев, призваны узлы транспортной сети или иначе, транспортные узлы. При обычном варианте описания получился бы вариант топологической схемы, который приведен на ри-

сунке 5.6 а.

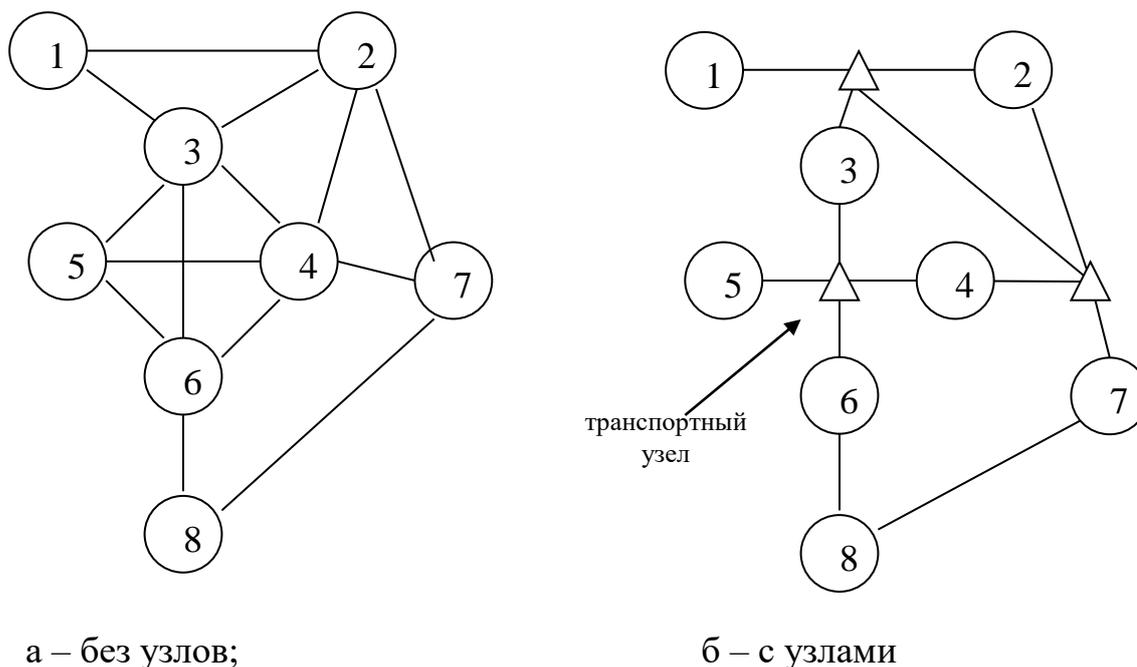


Рисунок 5.6 – Варианты моделирования транспортной сети

Транспортный узел – это элемент описания транспортных сетей, который служит исключительно для описания пересечения магистралей и не имеет ёмкостных характеристик.

Вариант описания фрагмента транспортной сети с использованием транспортных узлов приведен на рисунке 5.6 б.

Этот вариант является, несомненно, более точным по сравнению с предыдущим и менее трудоемким. Единственным ограничением на использование транспортных узлов являются ресурсные возможности программного обеспечения, для которого составляется модель транспортной сети. Суммарное количество вершин и узлов в графе транспортной сети не должно превышать максимально допустимую размерность графа. Современные программы по транспортному моделированию в качестве вершин графа рассматривают только узлы транспортной сети. Все объекты в них, генерирующие и поглощающие передвижения грузов или пассажиров, выделяются в отдельные объекты – транспортные районы, так как это в любом случае делается в пассажирских моделях.

Это обусловлено тем, что **в сфере пассажирских перевозок и организации дорожного движения** при моделировании возникает проблема другого рода, отличная от грузовых перевозок. В этих случаях, по крайней мере часть объекта перевозок составляют пассажиры, а в качестве пассажирообразующих и пассажиропоглощающих объектов может выступать практически вся территория города и неравенство (5.3) для этого случая принимает следующий вид:

$$\sum_i^{n_g} S_i \approx S_z, \quad (5.2)$$

И, соответственно, практически вся территория города должна быть разбита на транспортные районы и корректно представлена в топологической схеме. Необходимо вспомнить, что транспортные районы представляются точкой (вершиной) на графе транспортной сети. Добиться полного соответствия между объектом и моделью в данных условиях невозможно и основной вопрос здесь – достижение максимально возможной точности моделирования.

В случае грузовых перевозок дискретный характер моделируемых объектов позволял говорить о возможности создания сколь угодно точной математической модели.

Если бы моделирование транспортной сети являлось самостоятельной задачей, а не промежуточным этапом в решении задач транспортного планирования, то ответ на вопрос о максимальной степени соответствия модели и объекта был бы очень прост – чем больше вершин в графе транспортной сети, тем лучше. Предел размерности графа – разрешающие способности программного обеспечения.

Но конечной целью моделирования является получение максимально точных или достоверных результатов выбора оптимального состояния системы.

С учетом этого, выбор оптимальной размерности графа транспортной се-

ти должен осуществляться на основании трех основных требований.

Топологическая схема должна обеспечивать:

1. *Корректность представления реальных объектов вершиной графа транспортной сети.*
2. *Возможность получения объективной информации о транспортных районах.*
3. *Стабильность характеристик транспортных районов при изменении структуры объектов.*

Для выполнения первого требования количество транспортных районов должно стремиться к максимуму.

Второе требование связано с необходимостью проведения исследований для определения характеристик вершин графа. При больших размерах транспортных районов их характеристики подчиняются закону больших чисел. С сокращением размеров транспортных районов, то есть увеличением их количества, действие закона больших чисел ослабляется и для получения объективной информации о вершинах требуется проведение большего количества исследований.

Например, при сокращении размеров транспортного района и, соответственно, количества жителей в нем, может потребоваться переход от средней величины, как характеристики ёмкости района по отправлению, к закону распределения из-за значительных колебаний количества выезжающих пассажиров в период проведения обследования.

Кроме того, действует и еще одна, более простая линейная зависимость, чем больше транспортных районов, тем больше необходимо исследований для определения их характеристик. Можно заключить, что для выполнения второго требования количество транспортных районов должно стремиться к минимуму.

Третье требование определяет необходимость использования такой модели, исходные данные которой не изменяются вследствие решения задачи. Кибернетические свойства объекта исследования должны быть сведены к ми-

нимому. В системных терминах это звучит как обеспечение достаточно четкой границы системы, при которой характеристики внешней среды не зависят от состояния системы.

Например, ёмкости остановочных пунктов по отправлению и прибытию могут измениться вследствие решения задачи маршрутизации из-за перехода пассажиров на новые варианты путей передвижения. Но чем больше остановочных пунктов будет входить в транспортный район, тем меньше его ёмкости будут подвержены изменениям, так как новый для пассажира остановочный пункт не может располагаться очень далеко от прежнего.

Таким образом, третье требование также определяет обратную связь между количеством районов и стабильностью их характеристик – чем меньше районов, тем лучше.

Связь между этими требованиями иллюстрируется графиком, рисунок 5.7

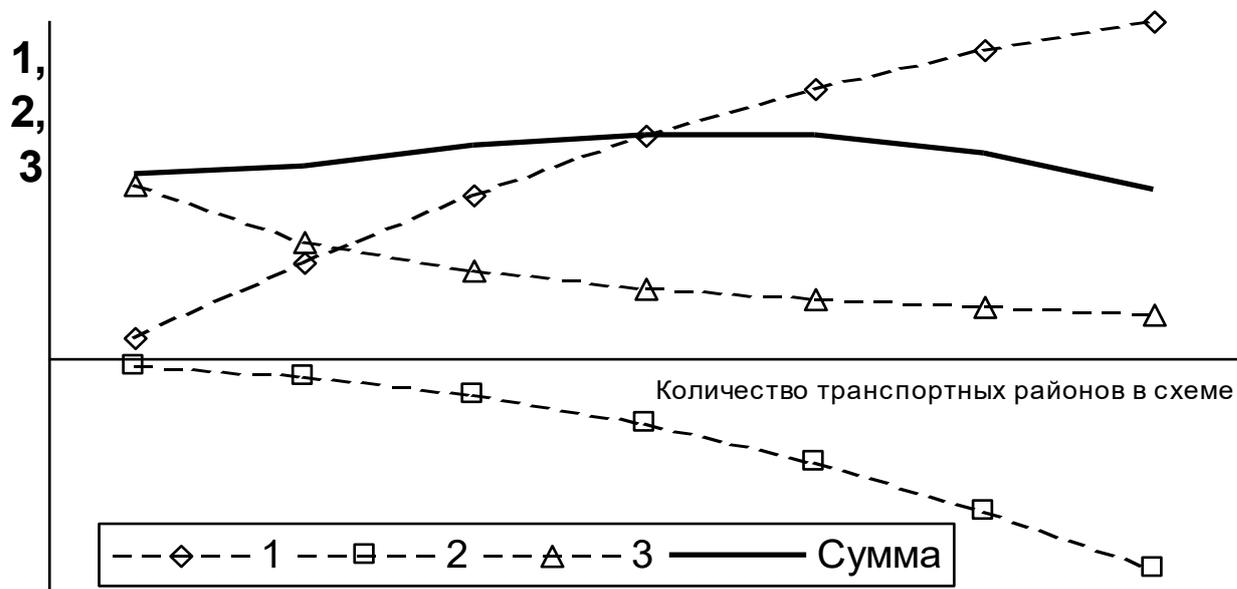


Рисунок 5.7 – Выбор оптимального размера графа транспортной сети

Пунктирными линиями на графике изображена степень выполнения требования с соответствующим номером, сплошной линией – суммарная степень удовлетворения всем требованиям, максимальное значение которой и опреде-

ляет оптимальную размерность графа транспортной сети.

Для получения конкретных размеров графа в соответствии с описанными требованиями, необходимо провести дополнительные исследования, чтобы определить точный вид зависимостей, изображенных на графике.

В настоящее время вопрос определения оптимальных размеров графа и конфигурации транспортных районов решается на уровне указания целей моделирования и её конкретизации в правилах транспортного микрорайонирования. Эти указания разработаны для моделирования транспортных сетей при решении задач в сфере организации городских пассажирских перевозок.

Цель моделирования формулируется следующим образом: *назначение границ и центров транспортных районов должно выполняться так, чтобы все передвижения внутри транспортного района осуществлялись бы пешком, а все передвижения между транспортными районами сводились бы к передвижениям между их центрами.*

Здесь, помимо удовлетворения вышеуказанным требованиям, происходит выделение объекта исследования – транспортные передвижения пассажиров. Наиболее распространенным признаком деления территории города на транспортные районы являются территории почтовых отделений связи.

Однако далеко не всегда границы отделений связей отвечают цели моделирования и необходима её дальнейшая конкретизация в правилах микрорайонирования.

Правила микрорайонирования города:

- 1. Максимальная площадь транспортного района 2,5км², максимальное расстояние и время подхода пассажира к остановке 800 м или 10 мин.*
- 2. Реки, железнодорожные пути, овраги и другие преграды, а также границы административных районов города служат естественными границами транспортного района, и не должны находиться внутри него.*
- 3. Границы транспортных районов не должны делить дома, парки, заводские территории.*

4. Крупные пассажиропоглощающие объекты (предприятия, вокзалы всех видов транспорта, крупные пересадочные пункты ГПТ, станции метро, рынки) с прилегающими к ним территориями выделяются в отдельные транспортные районы.

5. Граница транспортного района не может проходить по крупным магистралям с маршрутом ГПТ и должна пересекать её под прямым углом.

6. Связь между двумя соседними транспортными районами должна осуществляться по одной транспортной магистрали, исключение составляют две параллельные улицы со встречным односторонним движением.

7. Границы транспортных районов не должны находиться вблизи остановочного пункта с большим пассажирообменом.

8. Все тупиковые участки транспортной сети с прилегающими к ним территориями выделяются в отдельные транспортные районы.

9. На территории транспортного района не должно находиться более одного пересечения транспортных магистралей.

10. Если движение ГПТ осуществляется по двум параллельным улицам с разной пропускной способностью, то в некоторых случаях целесообразно улицу с меньшей пропускной способностью охватить территорией транспортного района и не рассматривать её в качестве отдельной транспортной магистрали.

11. В транспортных районах с тупиковым участком транспортной сети за центр принимается конец тупикового участка.

12. В транспортных районах с узлом пересечения транспортных линий за центр принимается точка этого пересечения.

13. Центры транспортных районов должны по возможности располагаться равноудаленно от границ между транспортными районами, не только по расстоянию, но и по времени подхода, удобству и так далее.

14. За центр транспортного района принимается одна из входящих в него остановок ГПТ, как правило, с наибольшим пассажирообменом, при наличии

станции метро она является центром транспортного района.

Эти правила не могут считаться исчерпывающими указаниями к микрорайонированию, поскольку они не дают ответа на все вопросы микрорайонирования и, в ряде случаев, противоречат друг другу. При возникновении неопределенности или спорной ситуации следует возвращаться к цели моделирования транспортной сети и разрешать эти ситуации, ориентируясь на нее.

Для задач в сфере организации дорожного движения подобные указания к настоящему времени также ещё не разработаны, и здесь обычно используются те же правила, что и для пассажирских перевозок, хотя вопросов к ним здесь возникает ещё больше.

ТЕМА 6. ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМНЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ

Одной из разновидностей системного анализа является макроподход, в котором исследуемый объект рассматривается как нечто целое, без изучения его внутренней структуры, рис. 1.11. Тогда поведение объекта определяется его связями с другими объектами такого же уровня, вместе с которыми он составляет систему более высокого уровня.

Этот вариант изучения является весьма продуктивным для решения многих вопросов стратегического планирования, и он требует привлечения больших объёмов информации об окружении исследуемого объекта, получить которые не всегда представляется возможным.

В то же время существует возможность выработки управляющих воздействий, направленных на повышение эффективности функционирования объекта, с помощью макроподхода, но без изучения связей с окружающими объектами. Такие решения могут быть выработаны на основании анализа системных свойств объекта.

В источниках приводятся различные списки показателей системных свойств объектов, их количество в отдельных источниках может превышать два десятка. Но наиболее общими, против которых не возражает никто из авторов, могут считаться три показателя: **эффективность, устойчивость и надёжность объекта.**

*В системном исследовании под **эффективностью** объекта понимается показатель, характеризующий качество его работы.*

Показатель эффективности является основным, поскольку отражает цель создания и функционирования объекта. Он определяется по зависимости (3.1). Особенности расчета этого показателя были подробно рассмотрены в третьем разделе.

*Под **устойчивостью** понимается способность объекта компенсировать действие внешних помех и обеспечивать возврат в состояние равновесия.*

Приведенное понятие устойчивости является в некотором смысле условным. Для того чтобы утверждать, что система устойчива, необходимо оговорить:

- вид помех;
- их интенсивность;
- условия, определяющие состояния равновесия.

Пример – сейсмоустойчивое здание, в названии которого указывается вид помех. Для него обязательно оговаривается сила подземных толчков, против которых оно устойчиво и известно состояние равновесия – здание не разрушается под действием этих толчков.

Условия равновесного состояния относительно легко определяются для технических систем, хотя и здесь они бывают мягче или наоборот жестче.

С транспортными системами дело обстоит сложнее, поскольку еще не выработаны общепринятые нормы равновесного состояния и в каждом случае их приходится определять самостоятельно.

Например, равновесным может быть признано состояние автобусного маршрута, при котором все пассажиры, желавшие воспользоваться его услугами, смогли реализовать свои потребности. Более жесткое условие равновесного состояния может быть обозначено так: равновесным называется состояние работы маршрута, при котором все пассажиры были обслужены первым подошедшим автобусом маршрута (нет отказа в посадке вследствие переполнения автобусов).

Естественно, что при оценке устойчивости автобусного маршрута со вторым условием равновесного состояния он окажется менее устойчивым, так как большее количество внешних помех будет приводить к выводу объекта из состояния равновесия.

Наиболее распространенными видами помех для транспортной системы являются заторы на транспортных магистралях и погодные условия.

Следующим системным свойством является надежность.

Надежность – это свойство объекта сохранять во времени, в установленных пределах, значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных условиях применения.

Как видно из определения, понятие надежности также является условным. Для утверждения о надежности объекта необходимо оговорить:

- список параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции;
- для каждого параметра определить пределы изменения, в рамках которых объект будет считаться работоспособным
- задать условия работы объекта.

Ключевым для понятия надежности является **отказ** – событие, заключающееся в выходе из работоспособного состояния.

По сути, отказ означает выход за установленные пределы значения одного из параметров, характеризующих работоспособность объекта.

Задание условий работы объекта подразумевает определение состояния внешней среды, для которого он предназначен. Объект не обязан сохранять работоспособное состояние при нарушении этих условий, то есть при возникновении внешних помех.

На этом уровне происходит разделение понятий надежности и устойчивости. **Надежность** характеризует внутренние взаимосвязи между элементами системы, **устойчивость** – связь между системой и внешней средой.

В то же время показатели устойчивости и надежности тесно взаимосвязаны. Считается, что ненадежные объекты не могут быть устойчивыми, также как неустойчивые объекты не могут обеспечить надежной работы.

Эта взаимосвязь обусловлена внутренним сходством этих показателей, которое иллюстрируется рисунком 6.1

Прежде всего необходимо вспомнить, что система является моделью и возможны различные варианты представления в виде системы одного и того же объекта.

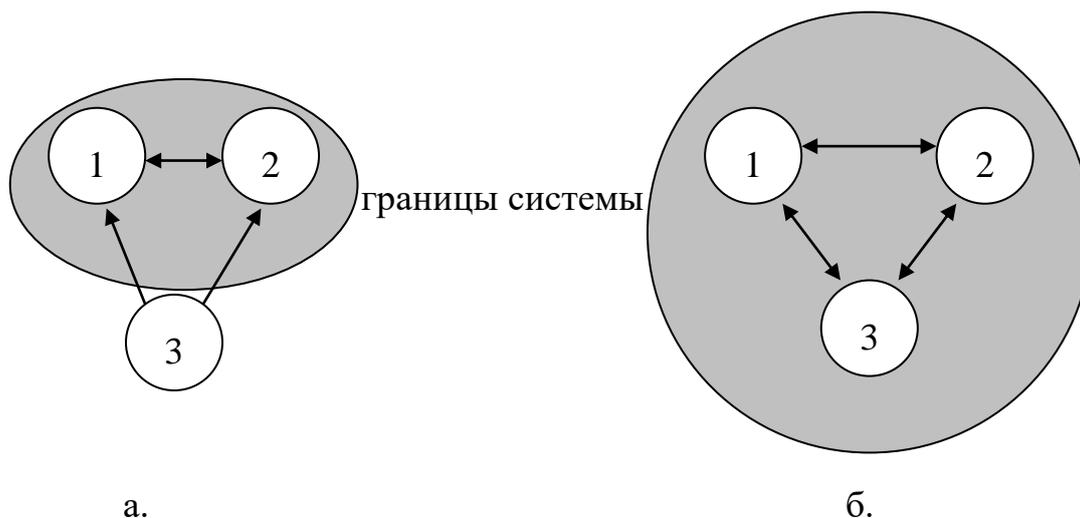


Рисунок 6.1 – Варианты представления объекта в виде системы

На рисунке 6.1а объекты 1 и 2 являются элементами системы, объект 3 – элементом внешней среды. В этом случае надежность системы характеризует свойства элементов 1 и 2 взаимодействие между ними. Устойчивость характеризует поведение системы в ответ на изменение состояния объекта 3.

На рисунке 6.1б граница системы расширена, все три объекта являются её элементами. Теперь надежность характеризует свойства трех элементов и взаимодействие между ними.

Таким образом, можно сделать вывод, что принципиальной разницы между понятиями устойчивости и надежности нет, и их содержание определяется только вариантом рассмотрения объекта.

Все показатели системных свойств объектов могут быть использованы для выработки управляющих воздействий, направленных на повышение эффективности, устойчивости или надежности объектов при их сравнении с эталонными значениями или аналогичными показателями других объектов.

Способы расчета, а также средства обеспечения устойчивости и надежности транспортных систем рассмотрены ниже.

6.1 Устойчивость транспортных систем

Основным средством обеспечения устойчивости являются резервы систем. Они также служат и для обеспечения надежности. В общем случае из всех **резервов** выделяются три основных вида:

- 1. Резервы сырья, материалов и готовой продукции.*
- 2. Резервы производственных мощностей.*
- 3. Финансовые резервы.*

Два первых вида резервов являются натуральными. Для транспортных систем, занимающихся организацией перевозок, резервы первого рода имеют специфический вид, так как продукцией транспорта являются услуги по перемещению объекта перевозок. Под резервами сырья и материалов здесь понимаются запасы эксплуатационных материалов, а под резервами готовой продукции – излишки провозных возможностей работающего транспорта. Запасы объектов перевозок на транспортных складах также могут рассматриваться как резервы первого рода.

Резервы производственных мощностей в перевозочных системах – это резервный подвижной состав рассматриваемого объекта.

Для систем организации дорожного движения основным видом натуральных резервов являются резервы пропускной способности транспортных магистралей и комплексов технических средств управления дорожным движением.

Натуральные резервы являются эффективным средством обеспечения устойчивости, то есть сохранения равновесного состояния, при определенных колебаниях внешней среды. Их недостатком является узкий спектр внешних воздействий, которым они могут противодействовать. Для каждого из этих резервов можно подобрать соответствующее внешнее воздействие.

Например, избыток провозных возможностей городских маршрутов компенсирует резкий всплеск пассажиропотоков, вызванный проведением каких-

либо массовых мероприятий. Но состояние внешней среды характеризуется более широким списком параметров, чем величина пассажиропотоков, и компенсировать изменение большинства из них необходимо другими видами резервов.

Содержание большого количества разнообразных натуральных резервов невыгодно с точки зрения эффективности системы и вместо них используются финансовые резервы, для которых характерна высокая универсальность.

Финансовые резервы могут быть использованы в большинстве случаев, когда необходимо преодолеть внешние помехи, однако им также присущ весьма серьёзный недостаток. В отличие от натуральных резервов, которые могут быть введены в действие сразу после возникновения помех, при использовании финансовых резервов обычно требуется определенный промежуток времени. Он необходим для их превращения в тот вид натуральных резервов, который может быть непосредственно использован для компенсации помех.

Несмотря на это, основным способом обеспечения устойчивости транспортных систем является наличие у них именно финансовых резервов.

Универсальность финансовых резервов дает основания перейти к более мягкой трактовке понятия устойчивости. С её учетом можно допустить, что наличие финансовых резервов позволяет компенсировать любой вид внешних помех. Возможность создания финансовых резервов определяется объёмом прибыли, которую получает объект. Финансовые резервы могут быть накоплены за счет прибыли, полученной в течение определенного промежутка времени.

Большие накопления отрицательно сказываются на эффективности объекта, если они не приносят прибыль. Поэтому обычно свободные средства используются для реальных или финансовых вложений и связывать объём финансовых резервов с продолжительностью получения прибыли было бы не совсем верно.

Для того чтобы записать условие устойчивости, можно выдвинуть иное

предположение, что объём свободных средств (финансовых резервов), составляет некую постоянную часть текущей прибыли. Тогда положительное значение прибыли означает наличие финансовых резервов и можно записать условие экономической устойчивости:

$$Y = D - Z > 0, \quad (6.1)$$

где Y – показатель экономической устойчивости объекта; D – доход объекта в единицу времени; Z – затраты объекта на производство продукции в единицу времени;

Интенсивность помех связана с объёмом финансовых резервов, так как больший объём резервов позволяет преодолеть помехи большей интенсивности. Тогда значение экономического показателя устойчивости напрямую отражает степень устойчивости объекта.

Для этого показателя можно построить область экономической устойчивости, если принять простые гипотезы о значении доходов и затрат объекта. Графически она представлена на рисунке 6.2.

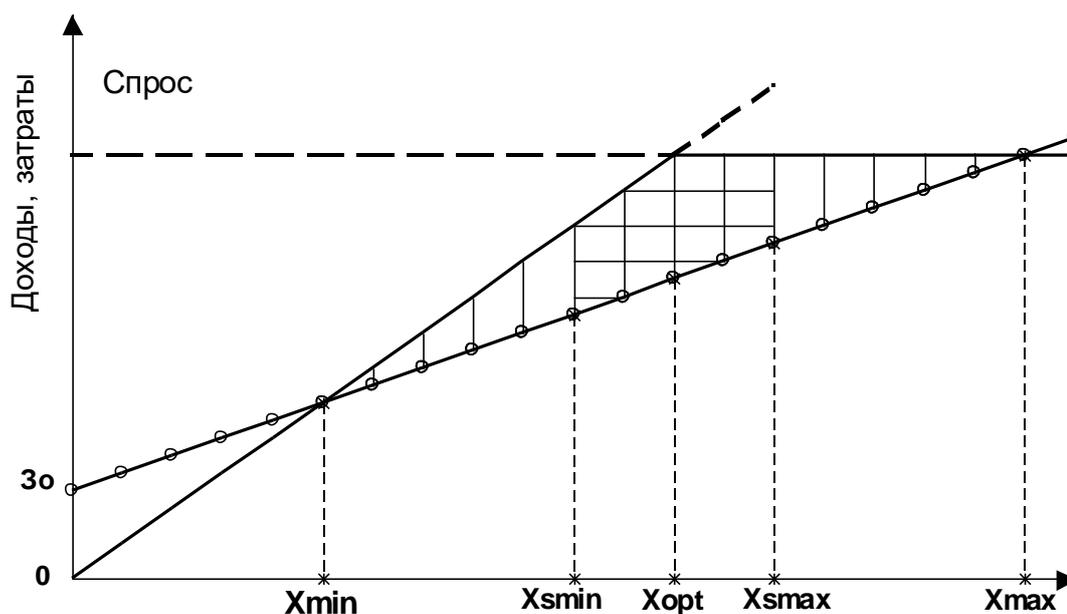


Рисунок 6.2 – Область экономической устойчивости

Для рассматриваемого примера затраты на производство продукции Z изменяются по линейной зависимости:

$$Z = Z_0 + z \cdot X, \quad (6.2)$$

где Z_0 – постоянный затраты, которые не зависят от объёма производства продукции; z – удельные переменные затраты на единицу продукции; X – валовый выпуск продукции.

Доходы от реализации продукции определяются как произведение тарифа на объём производства. Но, так как они не могут превышать спроса, по достижению его значения доходы равняются спросу.

$$D = \min(T \cdot X; D_{\max}), \quad (6.3)$$

где T – тариф за единицу продукции; D_{\max} – спрос на продукцию (максимальный доход).

Область экономической устойчивости соответствует выделенной вертикальной штриховкой части графика, в которой выполняется условие устойчивости (6.1).

Начинается она за точкой X_{\min} , то есть нижней границей области устойчивости, заканчивается точкой X_{\max} , верхней границей области устойчивости. В этих точках доходы равны расходам и в них система еще (уже) неустойчива, так как неравенство (6.1) в них не выполняется.

Но любое превышение доходов над расходами, с учетом принятых условий означает наличие у системы финансовых резервов, то есть её устойчивость.

Максимальная устойчивость системы соответствует максимальной разнице между доходами и расходами. Поэтому с точки зрения устойчивости оптимальным является объём производства, при котором он соответствует спро-

су, то есть точка пересечения линий дохода и спроса.

Этот график может быть использован для управления объектом, если ввести понятие **сигнальной области устойчивости**, *достижение границ которой означает необходимость выработки управляющих воздействий*.

Граничное значение сигнальной области устойчивости Y_s определяется по зависимости:

$$Y_s = \Delta_s \cdot Y_{\text{opt}} = \Delta_s \cdot (D_{\text{max}} - 3(X_{\text{opt}})), \quad (6.4)$$

где Δ_s – величина, зависящая от структуры рассматриваемого объекта; Y_{opt} – оптимальное (максимальное) значение показателя устойчивости.

Сигнальная область устойчивости выделена на графике 6.2 горизонтальной штриховкой. В её пределах отклонение показателя устойчивости от максимального значения считается допустимым.

Границы области устойчивости можно также определить через значения валового выпуска, что и показано на рисунке 6.2. $X_{s\text{min}}$ и $X_{s\text{max}}$ – это нижняя и верхняя граница сигнальной области устойчивости, им соответствует одно граничное значение показателя устойчивости Y_s .

Для этого случая возможна выработка как минимум двух, самых простых управляющих воздействий – увеличение объёма производства при достижении $X_{s\text{min}}$ и сокращение объёма производства при достижении $X_{s\text{max}}$. Возможна выработка и других воздействий, но для них требуется более детальное моделирование показателя устойчивости.

6.2 Надежность транспортных систем

Кроме резервов трех видов, используемых при обеспечении устойчивости, для обеспечения надежности дополнительно используется параллельная работа различных элементов системы. По сути, параллельная работа элементов

является специфическим видом резервирования, который обладает несомненными достоинствами, поскольку разные по своему содержанию элементы используют для своей работы различные ресурсы. Это означает, что отказ какого-либо элемента не обязательно будет приводить к отказу всех параллельно действующих элементов.

Иллюстрация этого свойства приведена на рисунке 6.3.

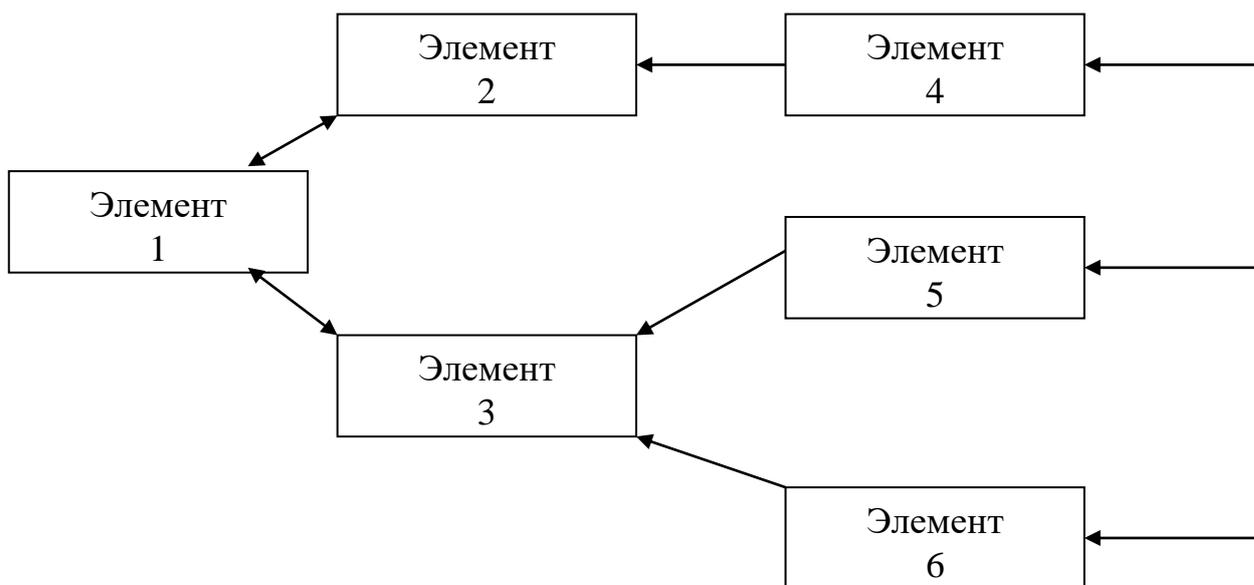


Рисунок 6.3

Для приведенного на рисунке объекта, выход из строя одного из элементов с номерами 2 – 6 не будет приводить к полной остановке элемента 1, работа которого определяет результаты работы всей системы.

Ярким примером обеспечения надежности технического объекта с помощью параллельной работы элементов являются тормозные системы современных автомобилей, которые имеют как минимум две тормозных системы.

В системах организации дорожного движения параллельную работу выполняют дублирующие участки транспортной сети, которые в обычном режиме используются не полностью.

В системах организации перевозок надежность обеспечивается параллельной работой различных видов транспорта. Но здесь существуют опреде-

ленные проблемы, вызванные наличием собственных интересов у элементов, обеспечивающих параллельную работу в системе. Их целью является не обеспечение надежности транспортной системы, а реализация собственных экономических интересов. Поэтому, при рассмотрении вопросов обеспечения надежности политранспортных систем, необходимо учитывать эти интересы.

Наиболее распространенным методом обеспечения надежности систем по организации перевозок являются резервы второго рода, то есть резервирование подвижного состава, который используется для работы вместо вышедшей из строя техники.

Для **характеристики надежности** объектов разработано достаточно большое количество натуральных показателей:

- *интенсивность отказов системных элементов, ед./ч;*
- *средняя частота отказов;*
- *средняя продолжительность отказа;*
- *средняя продолжительность безотказной работы системы;*
- *статистическое распределение промежутков времени между отказами.*

Они разработаны для технических систем, с жесткими связями между элементами и прямой зависимостью работоспособности системы в целом, от способности отдельных элементов выполнять присущие им функции. Отказ одного элемента обычно означает выход из строя всей системы в целом. Возможны и другие последствия отказа элемента, например, если предусмотрена параллельная работа отдельных элементов. Но все эти исходы весьма очевидны и характеристика надежности системы, с помощью перечисленных выше показателей является достаточно полной.

Полнота характеристики объектов определяется вариантами использования показателей системных свойств. С этой точки зрения натуральные показатели надежности являются достаточными для выработки управляющих воздействий при сравнении надежности технических систем.

Для выработки управляющих воздействий относительно транспортных систем натуральных показателей надежности недостаточно, что обусловлено большим разнообразием связей между их элементами. Это можно проиллюстрировать на примере сравнения автобусного и трамвайного маршрутов.

Конструктивные особенности подвижного состава определяют более высокую надежность трамваев по сравнению с автобусами, по критерию частоты отказов.

Однако надежность автобусного маршрута по тому же критерию выше, чем трамвайного, если под отказом для маршрута понимается остановка всех транспортных средств на нем. Такая разница обусловлена характером связей между элементами маршрутов – транспортными средствами. Выход из строя одного трамвая приводит к постепенной остановке всех транспортных средств на маршруте.

Необходимость выбора параметров, по которым характеризуется надежность объекта и определение для каждого из них допустимых пределов изменения, в которых система будет считаться работоспособной, с учетом разнообразия структур транспортных систем, делает использование натуральных показателей надежности практически невозможным для выработки управляющих воздействий в транспортных системах.

Поэтому *основным показателем надежности транспортных систем является экономический показатель* $\mathcal{E}_{над}$. Он основан на зависимости критерия эффективности системы от её надежности и рассчитывается по зависимости:

$$\mathcal{E}_{над} = \mathcal{E}' - \mathcal{E}, \quad (6.5)$$

где \mathcal{E}' – значение показателя эффективности системы при абсолютно надежной работе всех её элементов; \mathcal{E} – значение показателя эффективности системы при «обычном» уровне надежности элементов системы.

Экономический показатель является весьма представительным, поскольку

ку значение критерия эффективности системы отражает цель её существования и функционирования. Он значительно упрощает сравнение надежности различных систем, с целью выработки управляющих воздействий, однако не позволяет уйти от всех неопределенностей этого процесса. Вызвано это неоднозначностью понятия эффективности системы при абсолютно надежной работе всех её элементов. Здесь все зависит от списка элементов, то есть от способа представления объекта в виде системы.

Это можно проиллюстрировать на примере автобусного маршрута. Если его представить в виде совокупности рейсов, выполняемых за определенный период времени, то эффективность маршрута при абсолютно надежной работе всех элементов будет равняться прибыли маршрута при выполнении всех запланированных рейсов. Если тот же маршрут представить в виде совокупности автобусов, работающих на нем, то значение того же показателя будет значительно выше, чем в предыдущем случае. Вызвано это тем, что абсолютная надежность автобусов подразумевает их постоянную готовность к работе и, соответственно, отсутствие затрат на содержание резервного подвижного состава. Таким образом, для сравнения надежности транспортных систем, необходимо вначале определить однородные требования по надежности элементов, а это не всегда возможно из-за различий в их структуре.

Поэтому основным способом выработки управляющих воздействий на основе экономического показателя надежности является его сравнение с показателем эффективности системы при абсолютно надежной работе всех её элементов. Если значение $\mathcal{E}_{над}$ мало, по сравнению с \mathcal{E}' , то надежность системы достаточно высока и нет необходимости вкладывать средства в её повышение. Если же $\mathcal{E}_{над}$ составляет значительную часть от \mathcal{E}' , то повышение надежности системы может привести к существенному росту её эффективности и вложение средств в повышение надежности может оказаться выгодным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акофф Р.Л. Планирование в больших экономических системах. / Пер. с англ. Г.Б. Рубальского. Под ред. И.А. Ушакова.–М.: «Сов. Радио», 1972 – 223 с.
2. Акофф, Рассел Л. и Эмери, Фред И. О целеустремленных системах. – М.: "Советское радио", 1974.
3. Баяндин Э.П. Критерий эффективности научно-технических разработок. М.: "Экономика", 1973.
4. Блауберг И.В., Садовский В.Н., Юдин Э.Г. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности. – М.: "Наука", 1969.
5. Булычева Н.В., Федоров В.П. Расчет пассажиропотоков и оптимизация параметров маршрутных схем. – В кн.: Математические методы в управлении городскими транспортными системами. Институт социально – экономических проблем. -Л. : Наука, 1979, с. 65-90.
6. Васильева Е.М., Лившиц В.Н. Системный анализ эффективности НТП в отраслях производственной инфраструктуры// Системные исследования: Методические проблемы. Ежегодник. – М.: Наука, 1983.
7. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико статистические понятия и формулы в экономическом анализе. – М.: Транспорт, 1986. – 120 441 с.
8. ГОСТ 27.002-83 Надежность в технике. Термины и определения. Москва, 1983. – 30 с.
9. Грановский Б.И. Моделирование пассажирских потоков в транспортных системах : Автомобильный и городской транспорт (Итоги науки и техники), т. 11. – М.: ВИНТИ, 1986, с. 67 – 105.
10. Грушко И.М., Сиденко В.М. Основы научных исследований. – Харьков, Вища школа, 1983. – 224 с.
11. Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением / Под ред. М.А. Блинкина: Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
12. Исследования по общей теории систем / Под ред. В.Н. Садовского, Э.Б.

Юдина. – М.: Прогресс, 1969. – 520 с.

13.Л. фон Берталанфи. История и статус общей теории систем // Системные исследования: Методические проблемы. Ежегодник. – М.: Наука, 1979. – с. 29-54.

14.Месарович М. Общая теория систем: математические основы. М.: "Мир", 1973- 344 с.

15.Методы оптимизации в экономико-математическом моделировании / По общей редакцией Е.Г. Гольштейн. АН СССР, Центральный экономико-математический институт. – М.: "Наука", 1991 444 с.

16.Пассажирские автомобильные перевозки./ Под ред. Н.Б. Островского –М.: Транспорт, 1986. – 120 с.

17.Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989.

18.Пономаренко О.І., Пономаренко В.О. Системні методи в економіці, менеджменті та бізнесі: Навч. посібник. – К.: Либідь, 1995. – 240 с.

19.Портнов Г.Я. Исследование зависимостей между системными параметрами с помощью ЭВМ. / "Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник.", М.: "Наука", 1971.

20.Рихтер К.Ю. Транспортная эконометрия. – М.: Транспорт, 1983. – 317 с.

21.Самойлов Д.С. Городской транспорт. М.: Стройиздат, 1983. – 384 с.

22.Свічинська О.В. Удосконалення моделей вибору шляху пересування пасажирів в маршрутних системах міст : дис. ... к-та техн. наук : 05.22.160 / Харківський національний автомобільно-дорожний університет. Харків, 2015. 195 с.

23.Семенов А.И. Предпринимательская логистика. – СПб.: Политехника, 1997. – 349 с.

24.Ушаков Д.Н. Толковый словарь современного русского языка. М.: Аделант, 2013. – 800 с.

25.Философский словарь / Под ред. И.Т.Фролова – 5-е изд. – М.: Политиздат,

1987. – 590 с.

26. Wardrop J.G., "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research." Proc. Inst. Civ. Engrs, Part II 1, № 2, (1952), p. 325-362.

27. Lorenz E.N. Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas? American Association for the Advancement of Sciences; 139th meeting. 5 P. То же [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://eaps4.mit.edu/research/Lorenz/Butterfly_1972.pdf, свободный. – Название с экрана.

28. Rashid T. Make Your Own Neural Network. CreateSpace, 2016. – 222 p.

29. Webster, F.V., Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No. 39, Department of Scientific and Industrial Research, London, 1958, – 45 P.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Тема 1. Элементы общей теории систем.....	6
1.1. Место понятия системы при исследовании транспортных объектов..	6
1.2 Элементы классификации систем.....	24
1.3 Системный анализ транспортных систем	40
Тема 2. Порядок исследования транспортных систем	71
2.1 Порядок исследования транспортных систем	71
2.2 Списки элементов транспортных систем.....	90
Тема 3. Методы формирования критерия эффективности транспортных систем	97
3.1. Многокомпонентные критерии эффективности	100
3.2 Последовательный выбор критерия эффективности	108
3.3 Обоснование критерия эффективности для маршрутных систем городского пассажирского транспорта.....	126
Тема 4. Определение структуры внешней среды	140
4.1 Грузовые перевозки.....	151
4.2 Пассажирские перевозки.	168
Тема 5. Моделирование транспортных сетей.....	192
5.1 Координатный метод моделирования транспортных сетей	193
5.2 Топологические метод моделирования транспортных сетей	199
Тема 6. Показатели системных свойств объектов.....	221
6.1 Устойчивость транспортных систем	225
6.2 Надежность транспортных систем	229
Литература	234
Содержание	237