

## Глава 3

# Модель и моделирование

### § 11

## Модель и моделирование

- Многообразие моделей
- Классификация моделей по целям создания

Одно из ключевых понятий современной науки — это понятие модели.



**Моделью** называют упрощенное подобие некоторого объекта, воспроизводящее существенные с точки зрения цели моделирования свойства исходного объекта. Исходные объекты моделирования могут быть самой разной природы — это предметы или явления материального мира, проекты, представления людей. В качестве объекта моделирования может восприниматься и сложная система.



**Моделирование** — это деятельность по созданию и использованию моделей.

Более точное определение принадлежит А. А. Ляпунову: «Моделирование — это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная искусственная или естественная система (модель):

- 1) находящаяся в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом;
- 2) способная замещать его в определенных отношениях;
- 3) дающая при ее исследовании, в конечном счете, информацию о самом моделируемом объекте».

Моделирование востребовано во многих отраслях профессиональной и научной деятельности человека и считается одним из методов научного познания.

Использованные в определении слова «объект», «свойство», «система» должны быть вам знакомы из курса информатики основной школы, но тем не менее далее они еще раз получают достаточно строгие определения.



**Ляпунов Алексей Андреевич** (1911–1973, Россия) — выдающийся советский математик, один из основоположников кибернетики, член-корреспондент АН СССР. Специалист в области теории функций вещественного переменного и математических вопросов кибернетики. Основные труды относятся к теории множеств, теоретическим вопросам программирования, общим вопросам кибернетики, машинному переводу и математической лингвистике, кибернетическим вопросам биологии, философским и методологическим проблемам науки. Широко пропагандировал применение математических методов в различных областях естествознания — математической статистике, теории стрельбы, топографии, геофизике, биологии и других.

Из приведенного определения модели вытекает несколько важных следствий.

Во-первых, любая модель — это упрощение исходного объекта. Рассматривая только интересующие нас характеристики, мы неизбежно теряем те, которые существенными не считаем. Приведем примеры.

1. При описании некоторого объекта в виде текста на естественном языке трудно описать сложную форму. Как правило, используется прием подобия, заранее предполагается вариативность представления.
2. Модель внешнего вида реального судна не будет воспроизводить его внутреннего устройства.
3. Математическая модель рельефа морского дна никак не описывает обитателей самого дна.

Такое упрощение делается умышленно. Во-первых, моделируемые объекты, как правило, слишком сложны, чтобы можно было в полном объеме их представлять или исследовать<sup>1</sup>.

Во-вторых, модель имеет искусственный характер. Даже если ее компоненты имеют естественное происхождение<sup>2</sup>, то

<sup>1</sup> Хотя иллюзия полного понимания объекта вполне может возникать.

<sup>2</sup> Например, модель горы может быть сделана из глины.

моделью объект становится только в том случае, когда произвольно (т. е. намеренно) соотносится человеком с другим объектом. Иначе мы не можем сказать, что именно упрощено и по каким критериям наша созданная модель является подобием исходного объекта.

В-третьих, определение ясно говорит, что модель всегда создается с определенной целью. Именно в соответствии с целью мы определяем, какие особенности будем отражать, а какие — игнорировать. Цель будет определять все характеристики модели.

Модели чрезвычайно многообразны. Можно выделить некоторые устойчивые группы, просто чтобы дать некоторое представление о них.

1. *Материальные модели.* Такие модели применяют для изучения и описания предметов реального мира. Чаще всего это модели, передающие форму предмета и позволяющие изучить его свойства. Например, авиамодель — уменьшенная материальная модель или поведение летательного аппарата в некоторой среде (аэродинамическая модель самолета).
2. *Математические модели (формальные)* описывают исходный объект комплексом абстрактных соотношений, чаще всего набором уравнений, т. е. при их описании используют формализованные средства. Например, законы Ньютона — это математическая модель взаимодействия физических тел в пространстве, имеющая ограничения в применении.
3. *Описательные модели* представляют объект в виде некоторого описания. Нетрудно заметить, что формулировка очень похожа на определение математических моделей, но для описания можно использовать неформализованные средства (например, текст). Текст на естественном языке — это описательная модель человеческого представления о чем-либо. Исходное представление вполне может не иметь точного подобия в реальном мире. Пример: литературное произведение.
4. *Графические модели.* В этих моделях структура, поведение и другие параметры объектов отражаются в виде рисунка, схемы и т. п. Например, схема проезда — графическая модель возможной траектории движения до нужного объекта.



Важно понимать, что эти группы не являются замкнутыми, т. е. конкретная модель вполне может обладать признаками нескольких групп. Все представленные группы моделей, кроме материальных, можно назвать **информационными моделями**. В общем виде под *информационной моделью* будем понимать описание объекта моделирования на каком-либо формализованном языке с тем, чтобы в дальнейшем исследовать полученную модель с использованием компьютера. Иногда используют термин «компьютерная модель», поскольку в информатике основной инструмент исследования моделей — компьютер. Для информатики важно, каким образом модель описана, в зависимости от этого выбирают способы исследования модели.

Деятельность по моделированию является основной для информатики, поскольку в информатике как научной области изучаются общие методы и средства создания и использования *информационных моделей*.

Если опираться на определение информации, принятое нами изначально, то становится ясно, что действия с информацией — это деятельность по созданию и использованию самых разных моделей. И исходными данными, и результатом работы или использования любой модели является информация. Именно поэтому понятие «информационная модель» быстро и прочно вошло в обиход.

Чаще всего при моделировании мы не придумываем принципиально новый подход, а используем существующие универсальные наработки. Для нас важно иметь в своем распоряжении достаточное количество готовых решений, способов их применения, оценки и совершенствования. От этого напрямую зависит, насколько успешно и эффективно мы будем действовать при моделировании.

Создание моделей позволяет:

- 1) описывать характеристики реальных объектов, их взаимосвязь. Описав эти характеристики, мы, в частности, получаем возможность их кому-либо передать;
- 2) исследовать поведение объекта как поведение его характеристик, исключив несущественные факторы;
- 3) предсказать поведение моделируемого объекта, причем предсказать его и для *возможных* вариантов развития событий.

В целом ряде случаев модель — единственная возможность провести исследование и изучение объектов без нанесения существ-

венного вреда или неприемлемых затрат. Например, устойчивость здания явно безопаснее проверять на математической модели, без попыток его построить.

Построение математической модели здания или механизма позволяет заранее узнать поведение исходного объекта в критических условиях, например состояние здания атомной электростанции после того, как в нее врежется самолет. Или, что более реалистично, поведение высотного здания в условиях сильного ветра. Очевидно, что проверять такие вещи на практике нерационально.

Существует большое количество различных классификаций моделей, с которыми вам еще предстоит познакомиться в процессе обучения в вузе, в данной главе мы остановимся только на одной из них.

По целям создания модели можно разделить на два вида.

1. **Описательные модели.** Это представление наших знаний о действительности и как можно более точное ее описание. Такие модели называют моделями «As Is» («Как есть»).

Примеры таких моделей: *отчет* о деятельности организации или *план* города.

2. **Нормативные, т. е. предписывающие модели.** Эти модели строятся для описания еще не существующих объектов и становятся основой для их создания. Такие модели можно назвать «как должно быть».

В частности, примеры таких моделей: *алгоритм*, который можно назвать моделью будущих действий; *база знаний* как описание правил действий для различных ситуаций; *запрос к базе данных* как описание желательного набора данных.

При построении описательной модели всегда реализуется одна общая схема.

1. **Наблюдение за объектом.** По своей сути наблюдение — процесс получения необходимого описания, выделения характеристик и их конкретных значений. Перед началом наблюдения нам, таким образом, необходимо знать, что именно подлежит выделению и фиксации.
2. **Формализация (кодирование) наблюдений.** Полученные в результате наблюдений характеристики необходимо перевести в другую форму, пригодную для хранения и последующей обработки. Такой формой могут быть слова, числа, специальные символы для описания.

3. *Фиксация результатов формализации (кодирования)*. Закодированные наблюдения необходимо сохранить. Полный сохраненный комплекс закодированных наблюдений и будет *информационной (описательной) моделью* исходного объекта.

Рассмотрим эту схему на примере построения описательной модели учебной деятельности класса, а в дальнейшем (в главе 3 учебника для 11 класса) мы рассмотрим реализацию этой модели в виде информационной системы.

Перед началом процесса моделирования необходимо определить его *цель* в виде итоговых требований к создаваемой модели. Цель моделирования повлияет на все этапы работы, она будет основой выбора методов и параметров наблюдений, способов формализации (кодирования) и фиксации результатов.

В нашем случае цель — создание модели, которая позволит фиксировать результаты учебного процесса, анализировать их и принимать решения о дальнейших действиях. «Бумажным» вариантом такой модели будет классный журнал.

В нашей модели мы будем использовать такие понятия, как ученик, учитель, предмет, отметка. Мы предполагаем, что учебный процесс организован в виде стандартных уроков, результаты оцениваются на занятиях отметкой, т. е. качественным выражением успешности. Отметка выставляется учителем ученику.

На каждом из этапов построения модели по самым разным причинам мы можем терять часть получаемой информации. Помимо объективных причин, учтенных в самой модели<sup>1</sup>, ошибки могут возникать из-за избирательности восприятия или из-за конструирования. Избирательность восприятия — свойство человеческой психики отбирать только желательные факты и находить причины отбрасывать факты «неудобные». Конструирование — подмена недостающих фактов домыслами.

Чтобы избежать таких искажений, мы, во-первых, разделим права доступа к информации: ученик сможет смотреть отметки, но только свои, а учитель смотреть и менять, но только по своему предмету. Во-вторых, в статистических отчетах мы сопоставим данные.

Ошибки, точнее особенности, могут быть внесены и на этапе формализации (кодирования), что опять-таки повлияет на погреш-

<sup>1</sup> Например, при любом измерении реальных параметров учитывается погрешность, внесенная инструментом измерения.

ность, и на этапе фиксации, например, если не предусмотрены достаточные мощности информационной системы и часть данных будет теряться.

В нашей системе мы, во-первых, учтем возможную нагрузку, во-вторых, предусмотрим средства контроля ввода данных: нельзя будет ввести отметку в еще не наступившую дату или не в той системе оценок.

Каждый из этапов требует предварительного планирования, выбора методов, учета влияния этих методов на итоговую модель. Изучение имеющихся методов, средств и правил измерений необходимо не только для построения моделей, но и для их понимания.

Конечно, в рассмотренном нами примере многое уже известно и реализовано в виде программ. Во-первых, известны правила описания процесса (оценивания, отработки, сообщения об успехах), во-вторых, создана большая часть программных средств.

В случае планирования, например, научного эксперимента эта задача далеко не так проста. Придется учитывать и объем данных, и особенности датчиков, и способ фиксации результатов, и многое другое.

**Построение нормативной модели**, т. е. модели предписывающей, имеет свои особенности. Выстраивая эту модель, необходимо учесть ее будущее воплощение. Прежде всего, необходимо учитывать возможности исполнителей и той среды, в которой модель предполагается реализовывать.

Как и любая другая, предписывающая модель — это идеализированный образ, в чем-то упрощающий реальную ситуацию. Такая модель — это образ желаемого будущего, к которому во время исполнения необходимо приблизиться насколько возможно.

Классический пример нормативной модели — нотная запись мелодии. Она полностью отражает образ идеального, желаемого воспроизведения мелодии. Реальное исполнение всегда будет немного отличаться от этого образа, так как исполнитель не сможет абсолютно точно соблюдать длительности и каждый музыкальный инструмент имеет свои особенности. Но эта модель точно описывает, что и как именно должно быть получено.

Все такие модели (и компьютерные программы в том числе) опираются на возможности исполнителя, т. е. того, кто в состоянии эту модель воплотить в реальность. В приведенном примере исполнитель — это музыкант, обладающий навыками игры на музыкальном инструменте и знанием нотной грамоты.

Вводя определение информации, мы не один раз упомянули, что информация — это содержательное отражение действительности. Построенные модели всегда отражают некоторые особенности исходных объектов. Таким образом, *моделирование всегда связано с некоторыми информационными процессами*. Именно информация, т. е. содержание отображения действительности, — конечная цель моделирования.

От умения строить модели, а также от умения анализировать и использовать результаты моделирования во многом зависит эффективность профессиональной деятельности человека.

### Вопросы и задания



1. Приведите примеры моделей, которые можно отнести к нескольким группам одновременно.
2. В любой правовой системе («Гарант» или «Консультант») выберите несколько отраслевых приказов, проанализируйте их содержание и выделите те характеристики, которые позволяют нам отнести эти документы к нормативным моделям.
3. Какие характеристики автомобиля не рассматриваются при решении задачи на движение?
4. Приведите пример процесса для моделирования, в котором представление физического объекта как материальной точки является недостаточным.
5. Могут ли в качестве исходного объекта моделирования использоваться не существующие в реальности объекты, например идеальный газ?



## § 12 Системы

- *О системах и системном подходе*
- *О системном анализе и синтезе*
- *Способы описания моделей систем*
- *Общесистемные закономерности*
- *Объекты и их описания*
- *Связи*

На подготовку любой модели существенно повлияет то, каким образом мы будем воспринимать исходный, реальный объект. Это

общее представление, сформированное в результате нашего опыта, имеющихся знаний и предположений, — основа постановки цели, формулирования желательных требований и оценки результата.

Отсутствие такого единого представления приведет к тому, что нам либо вообще не удастся создать убедительную модель, либо ее польза будет сомнительной<sup>1</sup>.

Один из наиболее универсальных и активно используемых в моделировании подходов получил название «*системного подхода*». В его основе лежит представление о реальном мире как о комплексах взаимодействующих объектов. В зависимости от наших целей мы можем выделить в изучаемом комплексе некоторые интересующие нас объекты, определить их связи и создать его модель.

Для этого необходимо, с одной стороны, выделить «границы» комплекса, а с другой — определить его внутреннее устройство и его взаимодействие с внешним миром, т. е. со всеми остальными объектами, которые мы в создаваемой модели будем рассматривать как условия.

Человеку трудно воспринимать и исследовать объекты как что-то неделимое, да еще и непрерывно развивающееся. Поэтому для создания моделей необходимо определить совокупность *отдельных* частей, которые можно исследовать *дискретно*. При этом, конечно, необходимо сохранить понимание того, что все-таки отдельные части связаны, а в реальности процессы идут непрерывно и чаще всего параллельно.

Для описания таких взаимосвязанных объектов в некоторой внешней среде вводят термин «система». Точного определения этого термина не существует, а точнее, существует более 40 разных определений. Мы будем понимать под словом *система* *совокупность связанных между собой в единое целое отдельных частей (элементарных, неделимых объектов, процессов, явлений), причем обладающую свойствами, которыми элементы по отдельности не обладают*.

Отдельная, неделимая часть в этом случае называется *элементом системы*. Неделимость элемента системы на самом



<sup>1</sup> Интересный факт: туземцы одного тихоокеанского острова создали так называемый «культ карго». Этот культ воспроизводил действия персонала аэродрома для вызова самолетов с товарами. Выглядело похоже, но самолеты не прилетали.

деле означает, что для данного конкретного случая внутренняя структура элемента не имеет значения и не оказывает влияния на модель в целом.

Тем не менее часто при создании или описании элемента системы нам приходится и его рассматривать как совокупность связанных объектов. В этом случае элемент называется *подсистемой*.

Система также включает в себя *компоненты, осуществляющие взаимодействие между ее элементами, а также между системой и окружающей средой*. Такие компоненты называются *связями*. Фактически связи и есть то, что отличает систему от просто набора отдельных частей. Как и для самого понятия системы, для понятия связи существует много различных определений, для нас достаточно понимания назначения связей и их разновидностей.

При моделировании нам важно представлять, какие связи придется отражать. Обычно различают следующие разновидности.

*По направлению связи:* исходящие, входящие, двусторонние.

*По содержанию:* материальные, энергетические, информационные.

*По порядку:*

- 1) связи первого порядка — связи, определяющее поведение и структуру системы;
- 2) связи второго порядка — дополнительные, увеличивающие синергетический (взаимоусиливающий) эффект, но не необходимые;
- 3) связи третьего порядка — случайные, излишние или противоречивые связи.

*Относительно устойчивая система связей между элементами системы называется **структурой системы***. Понятие устойчивости требует формализации, но нам будет достаточно считать, что устойчивой структура будет, если в течение исследования/использования модели в ней не произойдет изменений, существенных для сохранения подобия модели реальности.

Нужно отметить, что система — это по определению комплекс, *выделяющийся* из окружающей действительности. Все системы в реальном мире обладают некоторыми общими чертами, позволяющими говорить о некоторой совокупности «типовых» систем. Например, выделяют достаточно «крупные» биологические, общественные и технические системы.



В соответствии с положениями системного подхода, выделяя из общей среды собственно систему, мы должны описать ее на некотором формальном языке. После этого изучение реального объекта может быть заменено (по крайней мере, частично) изучением модели. При реализации системного подхода нам важно выделить возможно более «мелкие» элементы системы и связи между ними, описать их на некотором формальном языке и «собрать» из выявленных компонентов модель реального объекта.



Процесс выделения компонентов и связей между ними носит название **системного анализа**, а процесс сбора модели из компонентов — **синтеза**.

В зависимости от того, как система описывается в модели, можно предложить несколько классификаций.

1. **Модель «черного ящика».** В этом случае мы игнорируем внутреннее устройство системы и описываем ее в виде набора входов и набора выходов. Соответствие устанавливается между определенной комбинацией входных и выходных параметров.
2. **Модель состава системы.** При таком подходе мы описываем систему как набор параметров ее элементов, игнорируя связи между ними.
3. **Структурная модель.** В этой модели используется описание не только элементов системы, но и связей между ними. Связи — это не только формальное указание, но и самостоятельный компонент модели, оказывающий влияние на ее поведение.
4. **Динамическая модель.** В этом случае мы не только обращаем внимание на структуру и состав системы, но и учитываем изменение системы и ее параметров во времени. Поскольку целью моделирования в данном случае является изучение не статического состояния, а динамики развития, постольку и модель называется динамической.

Несмотря на то что разнообразие систем очень велико и системный подход является одним из наиболее универсальных, можно отметить несколько закономерностей, характерных для всех видов систем. Выделим следующие **общесистемные закономерности**: эмерджентность, целостность и иерархичность.

**Эмерджентность** (англ. *emergence* — появление) — появление в системе новых качеств, которые у составляющих ее элемен-

тов отсутствовали. Пример: набор деталей самолета, каждый из которых сам по себе летать не может.

**Целостность** — изменение в одном элементе системы вызывает изменения в других ее элементах. Пример: недостаток смазки в движущихся частях автомобиля приведет к снижению срока их службы и замедлению движения.

Как следствие, в системах возникают *побочные эффекты* — внося изменения в часть системы, мы влияем и на те ее части, которые не должны были затрагиваться. Таким образом, в пределах системы нельзя ограничить воздействие одной частью.

В зависимости от наличия и характера связей между элементами система может по-разному реагировать на изменения.

Два крайних варианта поведения:

1. **Аддитивность** — так ведут себя объекты, в которых элементы не связаны между собой. Поведение такого объекта — сумма поведений его частей. Например, цветовая схема, используемая в компьютерах, — сумма трех цветов.
2. **Синергизм** — такой объект ведет себя как единое целое, все элементы которого связаны, и в результате эффект не суммируется, а умножается. Например, два куска радиоактивного материала в соединении дают выделение энергии, превосходящее излучение энергии простого суммирования отдельных кусков. Или объединенное действие двух лекарственных препаратов может быть более сильным, чем сумма действий этих двух лекарств при их раздельном приеме.

Поведение любой реальной системы, конечно, будет находиться где-то между полной аддитивностью и синергизмом. Но это условное положение редко остается постоянным с течением времени. Поэтому для описания изменения данных свойств в системе вводят понятия:

- **факторизации**, т. е. прогрессирующего деления системы на части (элементы или подсистемы);
- **систематизации**, т. е. роста количества и жесткости связей между элементами системы.

Одним из важных свойств систем является их **иерархичность**. Любая система может быть представлена в виде соподчиненных объектов — **иерархии**. В иерархии более высокий уровень объединяет все объекты нижнего уровня и оказывает на них

направляющее воздействие. Например, для архитектора дом со всеми коммуникациями — одна система, а для электротехника системой является общая схема прокладки электрокабелей, а сам дом — это внешняя среда.

Иерархичность — свойство, которое очень часто используется при анализе систем как способ описать порядок взаимодействий в системе или выявить причины того или иного поведения.

В тексте мы постоянно ссылались на понятие «объект», но не давали ему никакого определения, предполагая, что оно рассмотрено в основной школе. Мы понимаем под объектом то, что можем выделить из всего того, что нас окружает. *Объектом может быть материальный предмет, процесс, явление. Объектом вполне может стать и наше представление о чем-либо. Объект имеет имя, позволяющее отделять его от других объектов.*

Для последующего использования в процессе моделирования мы должны иметь формализованное описание объекта реальности, которое и будем называть **объектом**. Таким образом, мы можем описать не только материальные объекты, но и явления<sup>1</sup>, и человеческие представления.

Создавая такие описания, мы, прежде всего, создаем какое-то представление о разных сторонах объекта, описывая их как присутствующие ему **свойства** и действия.

На понятии объекта как структурированного описания базируется один из наиболее мощных и эффективных подходов к моделированию любой сложной системы — **объектно-ориентированный**. Суть его — в представлении модели как набора объектов, т. е. объединений из данных, описывающих что-то (**свойств объекта**), и алгоритмов, описывающих процессы изменения свойств объектов (**методов**).

Конечно, мы стремимся не описывать каждый объект в отдельности, а выделить похожие и создать общее описание — **класс** объектов. В этом описании мы указываем все возможные свойства типового объекта и его методы, т. е. его поведение.

Используя это описание, мы будем создавать конкретные объекты — **экземпляры класса**. Создавая, мы опишем их параметры, т. е. зададим значения свойств.

---

<sup>1</sup> Например, ветер назвать материальным объектом неверно, поскольку вообще-то это просто воздух, в нем даже нет четких границ.

Например, мы можем описать класс «лист», указав, что каждый лист имеет некоторую форму, размер и цвет. Описывая крону дерева, мы создадим множество экземпляров, каждый из которых будет иметь свои значения параметров. Моделируя ситуацию «подул ветер», мы должны будем вызвать метод «ветер» каждого объекта, и каждый из листьев отреагирует на него по-разному.

Этот подход к описанию сложных систем — один из наиболее распространенных. Он очень активно используется в программировании, особенно при написании сложных модульных систем. К его основным достоинствам относятся возможность защиты внутренних данных от неверного изменения, возможность создавать новые классы на основе уже существующих и возможность организации взаимодействия самых разных объектов с помощью обеспечения стандартного интерфейса. Например, в составе операционной системы Windows регистрируются объекты управления комплексом Microsoft Office и можно написать сценарий, взаимодействующий с ними.

Мы будем пользоваться этими возможностями довольно часто, а далее покажем, каким образом этот подход может быть использован в моделировании.

## Вопросы и задания



1. Опишите сферы применения системного подхода.
2. Найдите описание последствий игнорирования системного подхода в науке или на практике.
3. Подготовьте словарь изученных в данном параграфе терминов. Попробуйте изобразить схему взаимосвязи этих понятий.
4. Чем набор задач отличается от системы задач?
5. Изобразите схематично компоненты Солнечной системы. Какие из них и в каких случаях можно рассматривать как самостоятельные системы?
6. Объясните на своих примерах проявление общесистемных закономерностей.
7. Объясните сущность объектно-ориентированного подхода в программировании.

## § 13

### Моделирование

- *Популяционная динамика*
- *Модель Мальтуса*
- *Модель Ферхюльста*
- *Модель Вольтерра–Лотки*

Моделирование применяется в самых разных областях деятельности человека. Попробуем выделить то общее, что свойственно разработке большей части моделей. Мы начнем рассматривать их подготовку и использование на примере моделей, применяемых для прогнозирования поведения объекта или развития процесса.

**Математические модели** — мощнейший инструмент описания и исследования. Эти модели применяются в самых разных науках и дисциплинах, причем они считаются настолько важными, что их наличие — признак серьезности и доказательности научных теорий.

Общий принцип построения математической модели — выделить характеристики и связать их между собой математическим соотношением, позволяющим исследовать полученную модель математическими методами. Исследуя эти соотношения, мы получаем возможность найти необходимые характеристики.

Рассмотрим несколько известных моделей, а на их примере — некоторые их общие свойства и особенности.

Вы не раз использовали такие подходы в физике, а мы рассмотрим несколько моделей, связанных с биологией и экологией.

#### **Простейшая модель — численность популяции**

*Цель* моделирования — прогнозирование численности (или общей массы) живых организмов.

*Основные процессы*, от которых зависит численность, следующие.

1. Рождаемость. Количество рождающихся организмов напрямую зависит от количества уже живущих.
2. Смертность. Сюда входят смертность и от старости, и от голода, и от хищников.

Моделей для предсказания численности животных было создано много. Самая первая — это модель Фибоначчи (размножение кроликов, в которой общая численность — это два текущих поколения). Также модель Мальтуса (неограниченного экспоненциального роста), модель Ферхюльста (рост, ограниченный ресурсами) и, наконец, предложенная в начале XX века модель Вольтерра–Лотки.

Простейшей моделью, описывающей рост популяции, например населения Земли, является **модель Мальтуса**. Эта модель предполагает, что число особей в популяции постоянно растет со скоростью, пропорциональной предыдущей численности. Не привлекая «нешкольные» математические методы, опишем ее так:

$$N(t) = N_0 e^{\alpha(t-t_0)}.$$

Численность популяции ( $N$ ) вычисляется в любой момент времени  $t$  и зависит, во-первых, от начальной численности ( $N_0$  — численность в момент времени  $t_0$ ), а во-вторых, от параметра  $\alpha$  — скорости роста, которая является разницей между рождаемостью и смертностью.

В этой модели мы полностью игнорируем все внешние параметры: и другие виды, и недостаток ресурсов, и колебания смертности в результате болезней. Мы считаем, что все эти параметры либо не важны (т. е. «еда» всегда есть), либо оказывают постоянное влияние, которое уже учтено в параметре прироста.

То есть популяция растет быстро и неограниченно.

При этом стоит заметить, что эта функция сильно зависит и от начального параметра, и от коэффициента прироста. Если эти значения меняются, то функция (т. е. модель) ведет себя совсем по-другому: растет или убывает, быстро или медленно. Больше того, для любого прироста (сколь угодно большого) можно найти малый промежуток времени, за который этот прирост возможен.

Такая модель, в которой малому изменению параметра соответствуют большие изменения функции, т. е. в которой результат жестко задан и никакие изменения не предусматриваются, называется **жесткой математической моделью**.

Поскольку применение «абсолютного» решения возможно очень редко, очень большое значение имеют **мягкие математические модели**, в которых малому изменению в параметрах или функциях, составляющих модель, соответствует малое изменение результата.

В случае с простейшей моделью численности популяции (не учитывающей взаимодействия с другими популяциями) примером мягкой модели может служить **модель Ферхюльста**, в которой рост популяции ограничен. Фактическим ограничителем будет недостаток ресурсов, и проявится он как предельное число особей в популяции, которое может жить на отведенной территории (обозначим это предельное число как  $K$ ). Численность текущего поколения —  $N_i$ , следующего поколения —  $N_{i+1}$ , а формула для вычисления численности следующего поколения будет выглядеть так:

$$N_{i+1} = N_i \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{N_i}{K}\right).$$

Параметр  $\alpha$ , как и в модели Мальтуса, это скорость роста. Очевидно, что, как только численность превысит предельное значение, она начнет падать.

При решении задачи оценки численности нельзя учитывать только сам вид и наличие пищи. Численность вида зависит от многих факторов, в частности от количества хищников. То есть необходимо учесть взаимодействие с другими видами.

Попытки принимать массовые решения без учета взаимодействий в экологических системах неоднократно приводили к плохим последствиям<sup>1</sup>.

Первой известной моделью такого рода стала **модель Вольтерра–Лотки**. Основным отличием этой модели от всех остальных стала идея не просто рассматривать рост численности одного вида, а связать его еще и с численностью тех, кто его ест. Таким образом, от рассмотрения одного объекта — популяции — перешли к рассмотрению системы — двух взаимодействующих видов. Условно эту модель можно назвать «хищник — жертва», при этом и хищники, и жертвы могут быть очень разными: щуки и караси, кролики и лисы, люди и болезни.

Классическая модель Вольтерра–Лотки использует следующие *характеристики системы*:

- численность (или биомассу) особей двух видов, один из которых хищник, а другой — жертва;

<sup>1</sup>

Например, после массового уничтожения воробьев в Китае (считалось, что они воруют зерно) значительная доля урожая была потеряна из-за насекомых-вредителей. Пришлось снова завозить и разводить воробьев.

- скорость роста численности (или увеличения) популяции каждого вида в естественных условиях.

Математическая модель описывает взаимовлияние двух видов так:

$$\begin{cases} x' = ax - cux; \\ y' = -by + dxy. \end{cases}$$

Здесь  $x'$  — скорость изменения количества жертв, а  $y'$  — скорость изменения количества хищников.

Если щук нет совсем, то численность роста карасей определяется только естественным ростом:  $x' = ax$ . Параметр  $a$  в данном случае — коэффициент прироста популяции (разница между рождаемостью и смертностью).

Если хищники есть, то часть жертв будет съедаться. Количество съеденных зависит от количества жертв и количества хищников, с некоторым коэффициентом  $c$ .

Скорость роста популяции хищников без жертв отрицательна:  $y' = -by$ . Они не размножаются без еды.

Если же еда есть, то популяция хищников будет расти, перерабатывая съеденное в новую биомассу, опять-таки с некоторым коэффициентом  $d$ . Этот коэффициент будет меньше, чем  $c$ , поскольку нельзя переработать больше, чем съедено, и эффективность точно меньше 100%.

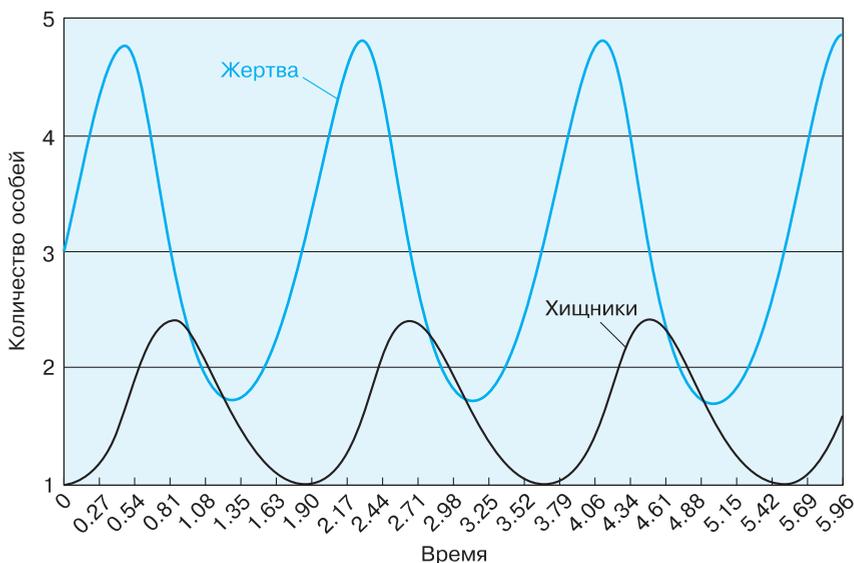
Стоит обратить внимание, что  $x$  (биомасса жертв) и  $y$  (биомасса хищников) — на самом деле функции от времени, т. е. численность в конкретный момент времени будет  $x(t)$  или  $y(t)$ .

Решение этой системы — поиск конкретной пары функций, подходящих под условие, т. е. решение системы дифференциальных уравнений. Поскольку методов решения таких систем у нас нет, мы попробуем показать эти функции в виде графиков, вычислив их значения.

Таким образом, поведение системы будет определяться начальным количеством жертв и хищников и коэффициентами. Например, графики функций для  $x(0) = 3$ ,  $y(0) = 1$ ,  $a = 4$ ,  $b = 2,5$ ,  $c = 3$ ,  $d = 1$  представлены на рис. 3.1.

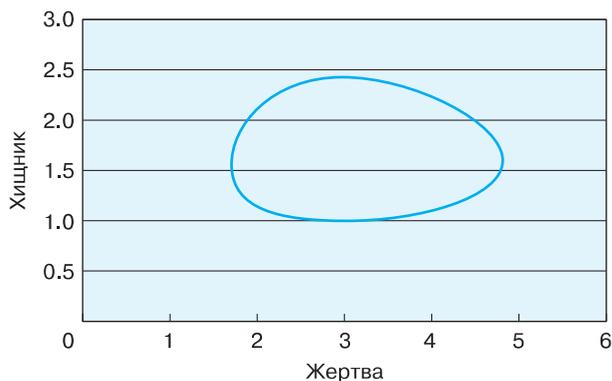
На что стоит обратить внимание:

1. Процесс — циклический. То есть сначала вырастает количество жертв, потом (откормившись) вырастают хищники и начинают слишком много съедать, жертвы кончаются, и хищники



**Рис. 3.1.** Численность «хищников и жертв» с течением времени

начинают вымирать<sup>1</sup>. Поэтому можно показать так называемый фазовый портрет системы, т. е. исключить фактор времени и увидеть, как меняются фазы развития (рис. 3.2).



**Рис. 3.2.** Фазовый портрет модели

<sup>1</sup>

В этой связи очень интересно увидеть закономерности изменения численности людей в зависимости от общих оценок количества бунтов, эпидемий и войн там, где давно проводятся переписи, например в Китае или Британии.

На графике и фазовом портрете видно, что процесс фактически «ходит по кругу» против часовой стрелки.

2. Эта модель может дать качественную оценку процесса, но для реального точного прогнозирования, к сожалению, не подойдет как минимум потому, что ограничение роста численности жертв не предусмотрено, чего в реальности не бывает. Реальные системы подвержены множеству внешних факторов.
3. В этой модели мы не можем увидеть, где и как происходят «вспышки» численности, и никак не учитываем накопление опыта внутри популяций ни жертвами, ни хищниками.
4. Мы не учитываем наличия критических значений параметров, при которых популяция больше не восстановится (а это какое-то количество больше 0, если речь идет о биомассе, или больше 2 — если речь идет о численности двуполых животных).

Предложенная модель — *динамическая*, т. е. она рассматривает процесс, развивающийся во времени. При этом поведение всей системы задано начальным состоянием и на всем промежуток времени больше ни от чего не зависит — на фазовом портрете это хорошо видно. Такие системы называются *динамическими системами*.

Несмотря на все перечисленные ограничения, такая модель уже позволяет дать качественную оценку, а если ее доработать (внести ограничение роста и рассмотреть систему связей основных видов на некоторой территории), то прогнозировать развитие биоценоза<sup>1</sup> можно уже достаточно уверенно.

Таким образом, работа итальянского математика Вито Вольterra заложила основу целой дисциплины — математической экологии.

Очень многое при исследовании таких систем зависит от того, как будет изменяться поведение системы при малых изменениях исходных параметров или появлении новых небольших изменений в структуре. В большинстве случаев система не изменяет своего поведения, т. е. малому изменению параметров соответствует

<sup>1</sup> Биоценоз — совокупность растений, животных и микроорганизмов, населяющих данный участок суши или водоема и характеризующихся определенными отношениями между собой и приспособленностью к условиям окружающей среды (например, биоценоз озера, леса).

малое изменение в поведении системы и никаких изменений формы зависимости нет.

Но возможно, что в системе есть особые значения параметров, меняющие структуру системы. Формально (численно) изменения очень небольшие, но модель по разные стороны от этого значения ведет себя совершенно по-разному. В зависимости от того, какое значение получит параметр, система станет развиваться одним или другим образом.

Такое значение параметра называется *точкой бифуркации*, а такая система — *структурно неустойчивой*. Если система на такое малое изменение в ее структуре не реагирует так резко, то она *структурно устойчива*.

Рассмотренная нами модель Вольтерра–Лотки *структурно неустойчива*. То есть если к описывающим ее уравнениям добавятся небольшие колебания (например, конкуренция карасей за еду, а щук — за карасей), то модель перестанет быть предсказуемой (т. е. перестанет возвращаться к исходному состоянию за предсказуемое время). В зависимости от вида поправок/добавлений система может либо постепенно «развалиться», либо стабилизироваться на какой-то одной паре значений, либо все-таки сойтись к какому-то циклу.

Резкое изменение поведения системы при изменении параметров называется *катастрофой*. Разработка математических методов исследования динамических систем позволяет определить, устойчива ли модель (и вся система в целом) к изменениям параметров и можно ли такие «малые» изменения игнорировать или они впоследствии изменят всю картину происходящего.

Изучением устойчивости динамических систем и практическим применением этой устойчивости занимается область математики, получившая название *теория катастроф*.

Математических моделей существует и создается множество в самых разных областях. Их преимущество — возможность прогнозировать и точно подбирать необходимые значения параметров под заданные итоговые характеристики.

При рассмотрении (и особенно при иллюстрировании) математических моделей мы активно используем вычислительные возможности компьютеров. Тем не менее будем помнить, что эти модели были разработаны и исследованы математическими методами задолго до активного применения вычислительных машин.

К сожалению, методы математического моделирования в чистом виде на реальных задачах применить зачастую трудно. С появлением компьютеров, были разработаны специальные виды моделей, которые без них создавать и применять невозможно. Такие модели получили название *компьютерных моделей*.

Далее мы приведем несколько примеров таких моделей.

### Вопросы и задания

1. Подготовьте сравнительную таблицу моделей популяционной динамики, рассмотренных в параграфе.
2. Подготовьте словарь впервые использованных терминов.



## § 14

### Имитационное моделирование

- *Агентные модели*
- *Дискретно-событийные модели*
- *Системно-динамические модели*

Математические модели описывают характеристики системы аналитическими соотношениями. К сожалению, воспользоваться такой моделью можно только в том случае, когда мы можем полностью описать все существенные отношения в моделируемой системе. Например, трудно написать полную систему уравнений для нескольких десятков взаимодействующих видов и учесть внешние условия. С помощью такой модели часто трудно прогнозировать поведение отдельного конкретного объекта, потому что чаще всего модель строится на статистических соотношениях, характерных для типового объекта.

Другой подход к моделированию, активно использующий возможности компьютеров, — имитировать поведение системы, состоящей из множества простых элементов, моделируя их поведение и взаимодействие и рассматривая результаты для всей системы в целом.

Такие модели называются *имитационными*, т. е. имитирующими поведение системы. Применяя их, мы можем:

- изучить поведение системы, не имея общих аналитических соотношений;
- проследить поведение системы в динамике, т. е. на каждом шаге процесса;
- исследовать поведение системы, в которой возможны случайные вариации поведения объектов.

Существует несколько видов таких моделей.

1. **Дискретно-событийные модели.** Такие модели описывают поведение системы как набор последовательных событий. Например, так можно описать рост пшеницы (процесс состоит из хорошо известных стадий) или работу учреждения (его работа описана инструкциями и регламентами). В такой системе описываются состояния (например, ожидание поступления на склад запасной части) и события, т. е. изменения состояния.
2. **Агентные модели.** Такие модели построены в виде набора взаимодействующих отдельных объектов (агентов), каждый из которых имеет какие-то заданные правила поведения и на основе поступающих сведений принимает решение об их применении. Например, такой агент может описывать поведение особи в стаде или человека в толпе. Поведение всей системы будет складываться как результат взаимодействия агентов, но спрогнозировать его математическим соотношением трудно. Пример: поведение толпы на выходе из здания.
3. **Модели системной динамики.** Этот метод предназначен для исследования поведения сложных систем с большим количеством обратных связей и зависимых параметров, например крупного города, большого производства, демографической ситуации. При таком виде моделирования систему представляют в виде взаимодействующих объектов. Каждый объект на самом деле может быть очень крупной системой, но при моделировании мы считаем его единым целым, пропускающим через себя, формирующим или поглощающим потоки разного рода (финансовые, материальные и другие).

Приведем несколько примеров создания и использования имитационных моделей.

**Агентный подход** — сравнительно новое направление в имитационном моделировании, его положения были сформулированы в 90-х годах XX века. Он применяется в тех случаях, когда поведение исследуемой системы определяется поведением множества независимых объектов, самостоятельно принимающих решения о своих действиях. Такие объекты называются *агентами*.

Моделируя такую систему, мы не пытаемся вывести какие-то математические соотношения, описывающие ее в целом, а моделируем поведение агента (восприятие информации и выработку решения) и среду (пространство, в котором объекты будут находиться).

Создав такое описание (при этом очень удобно использовать объектно-ориентированный подход), мы можем провести серию экспериментов, изучая поведение комплекса в целом.

Пример такой модели — модель движения пешеходов в каких-то условиях.

Предположим, что у нас есть какой-то путь пешеходов (подземный переход, магазин и т. д.). Нас интересует, каким образом повлияет установка витрины (или создание маленького магазинчика на этом проходе) на движение пешеходов?

Определить эти параметры с помощью математической модели очень трудно, но можно описать среду движения, пешехода (и описать его движение) и создать имитационную модель, в которой пронаблюдать за движением пешеходов.

Правила движения пешехода сравнительно просты — пешеход движется с постоянной скоростью (примерно от 0,5 до 1 метра в секунду) к заданной цели. Если он видит препятствие (стену) или медленно движущегося пешехода, он старается его обойти. Время в модели считается в условных единицах, для определенности будем считать их секундами.

Модель движения пешеходов мы создадим с помощью специализированной среды имитационного моделирования<sup>1</sup>, в которой для пешехода уже создан специальный класс — `pedestrian`.

В окне модели (рис. 3.3) видно:

1. Среда перехода. Пешеходы появляются в левой части и проходят направо с обычной скоростью до выхода. После поворота они видят с левой стороны прохода витрину и могут либо свернуть к ней, либо пройти на выход.

<sup>1</sup> Использован пробный вариант среды имитационного моделирования AnyLogic v.6.5 University (<http://www.xjtek.ru>).

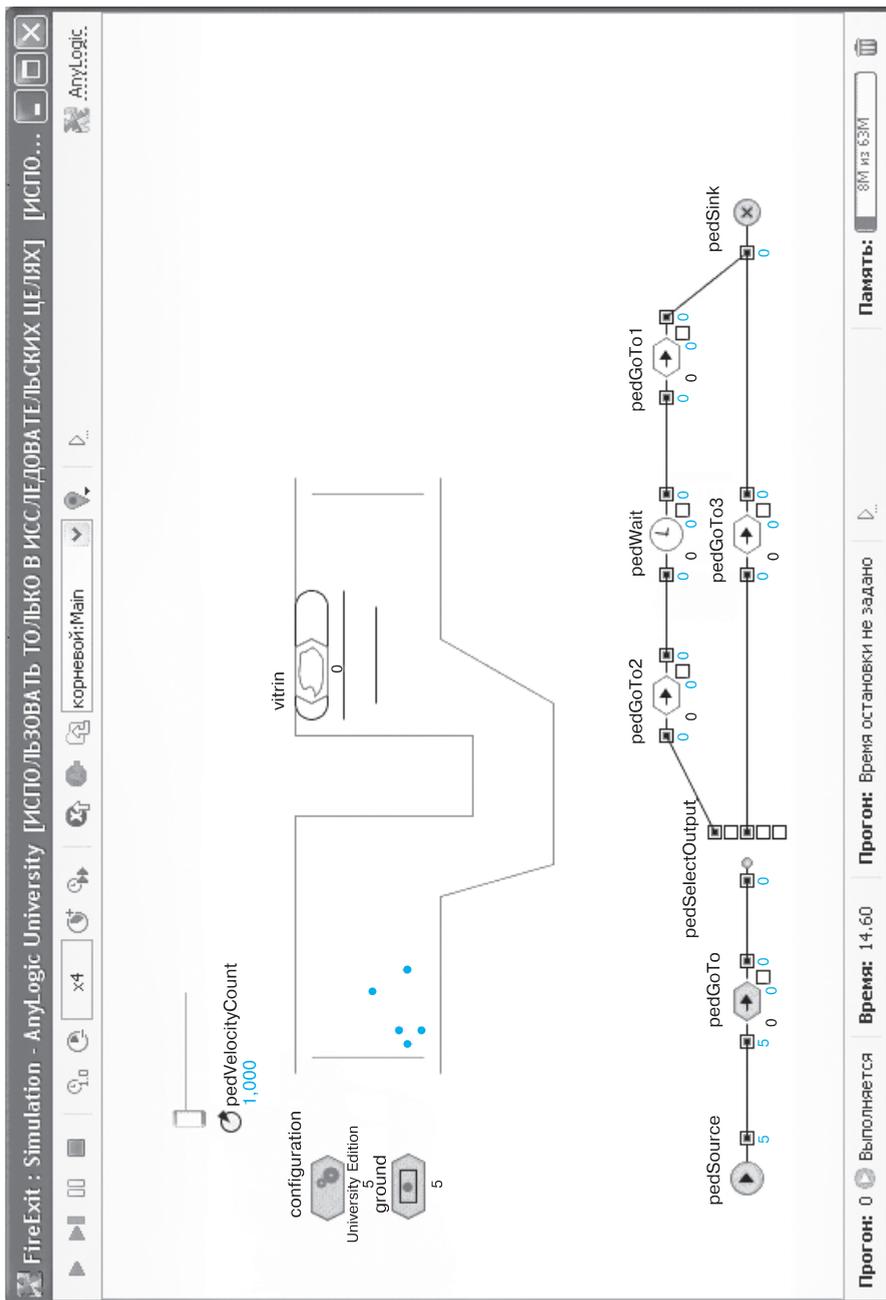


Рис. 3.3. Демонстрационное окно модели

2. Алгоритм работы: пешеходы появляются (pedSource) с некоторой частотой — по умолчанию 1000 в час, идут (pedGoto) до некоторого места, где замечают витрину (отмечено чертой) и принимают решение (pedSelectOutput): идти дальше (большая часть, 7 из 10 пешеходов) или подойти к витрине (3 из 10). Итоговая цель пешеходов — выход (pedSink).
3. Параметр, которым мы можем управлять — количество пешеходов в час.

Запустим модель и посмотрим результат.

Для 1000 пешеходов в час никаких затруднений нет (рис. 3.4).

В переходе одновременно находится примерно 20 человек (подсчет статистики ведется на всех узлах).

Для 6000 пешеходов в час затруднение появляется на повороте, но в целом пропускной способности достаточно<sup>1</sup> (рис. 3.5).

А теперь при том же потоке пешеходов изменим модель — сделаем витрину более заметной, видимой почти от выхода (рис. 3.6).

Хорошо видно, что возникла пробка. Ее можно увидеть и численно: разница между вошедшими (576 на входе) и вышедшими (147 на выходе) стала гораздо больше, хотя к самой витрине народу подошло меньше (43 вместо 51).

Причина пробки — время, которое было потрачено частью людей на то, чтобы протолкнуться к витрине, а остальными — на то, чтобы все-таки пройти мимо. Хотя это время зависит от алгоритма обхода препятствия (и в другой версии системы моделирования может измениться), в реальности происходит примерно тоже самое.

Для создания более наглядной модели в качестве подложки можно использовать план здания, а стены-препятствия расставить точно так, как они стоят в реальности.

Конечно, создать такую модель для конкретных условий можно только тщательно исследовав пешеходов: как они движутся, сколько из них смотрит на витрины, как изменяется их движение. Именно поэтому такие параметры — предмет многочисленных и довольно сложных исследований.

Аналогичный подход можно применить к очень многим процессам, например создав модели машин, веществ и аппаратов, исследовать организацию производства.

<sup>1</sup> С точки зрения толкающегося на повороте или в переходе пешехода, вряд ли этого хватит. Поэтому всегда возникает вопрос о цели исследования.

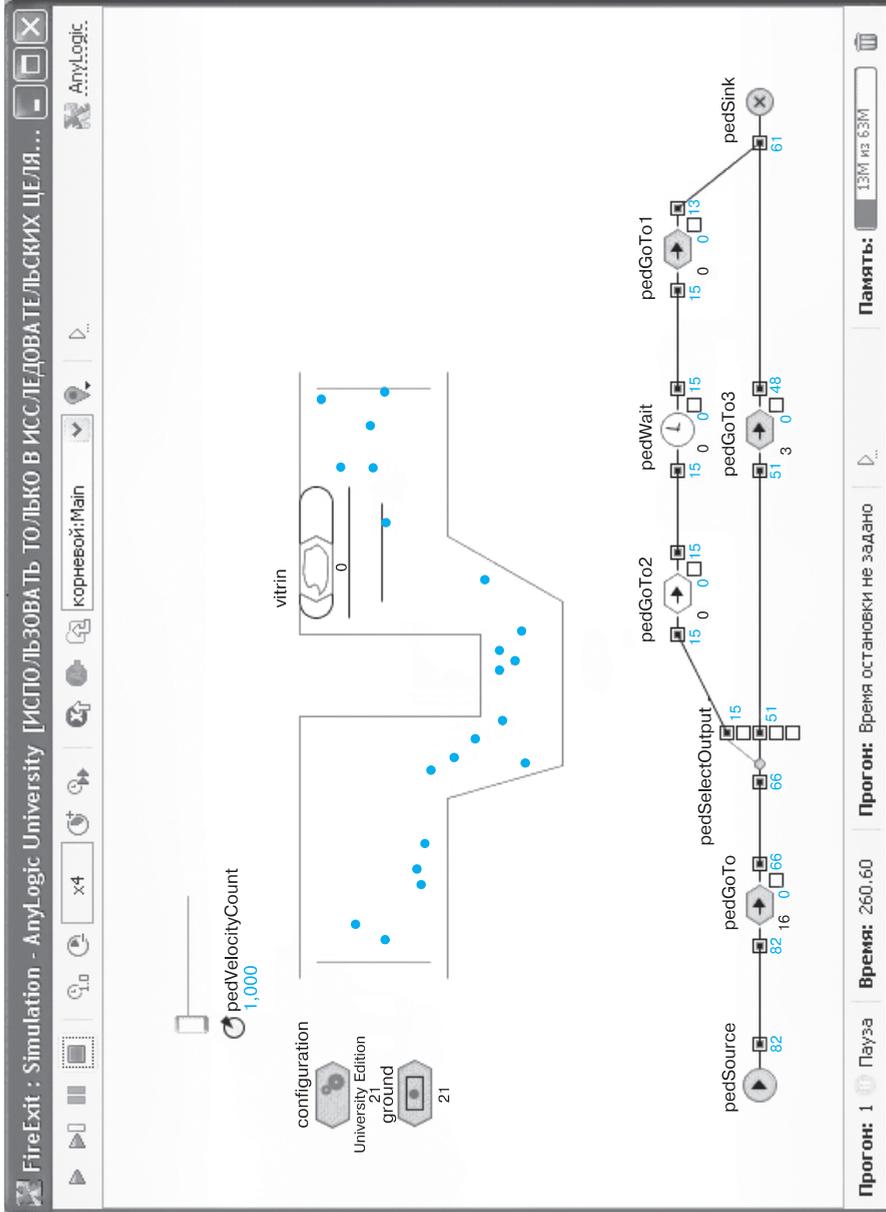


Рис. 3.4. Исследование модели (этап 1)

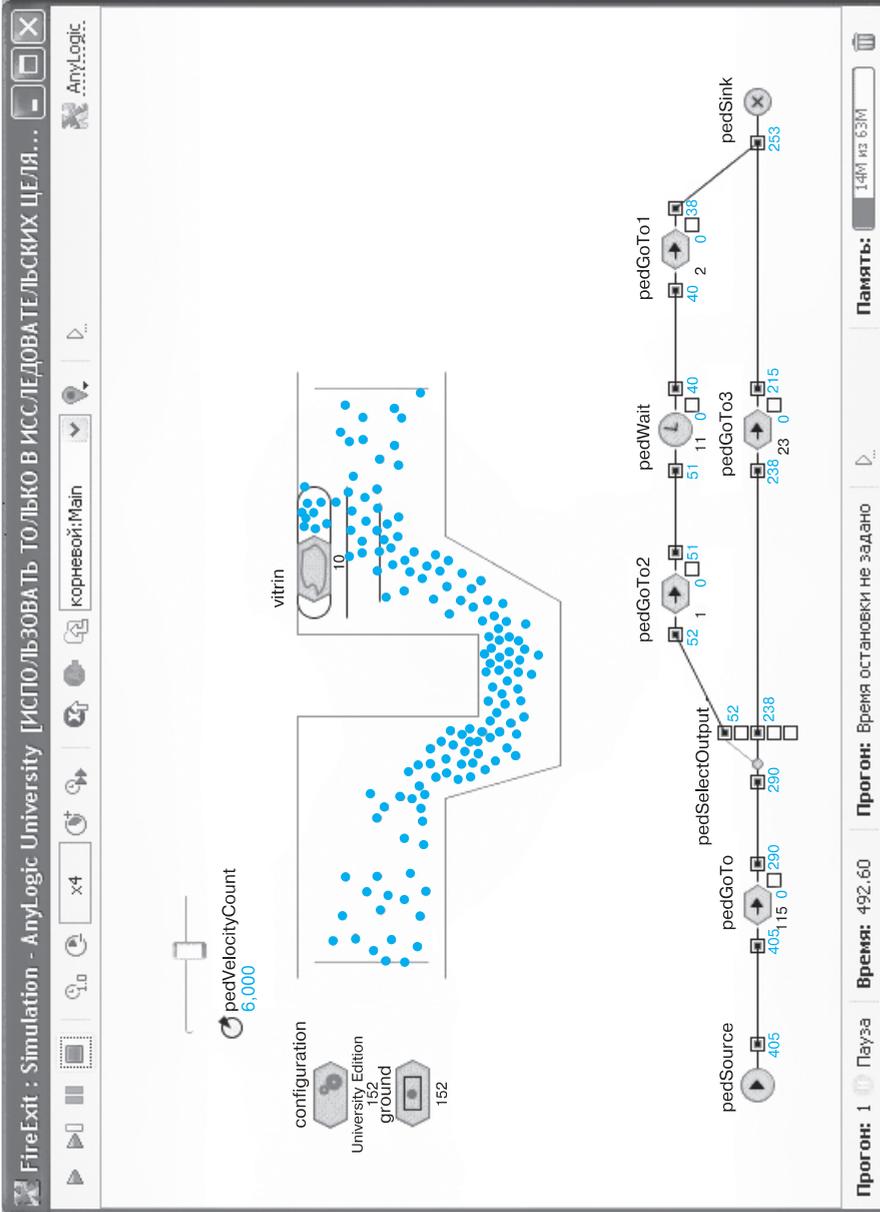


Рис. 3.5. Исследование модели (этап 2)

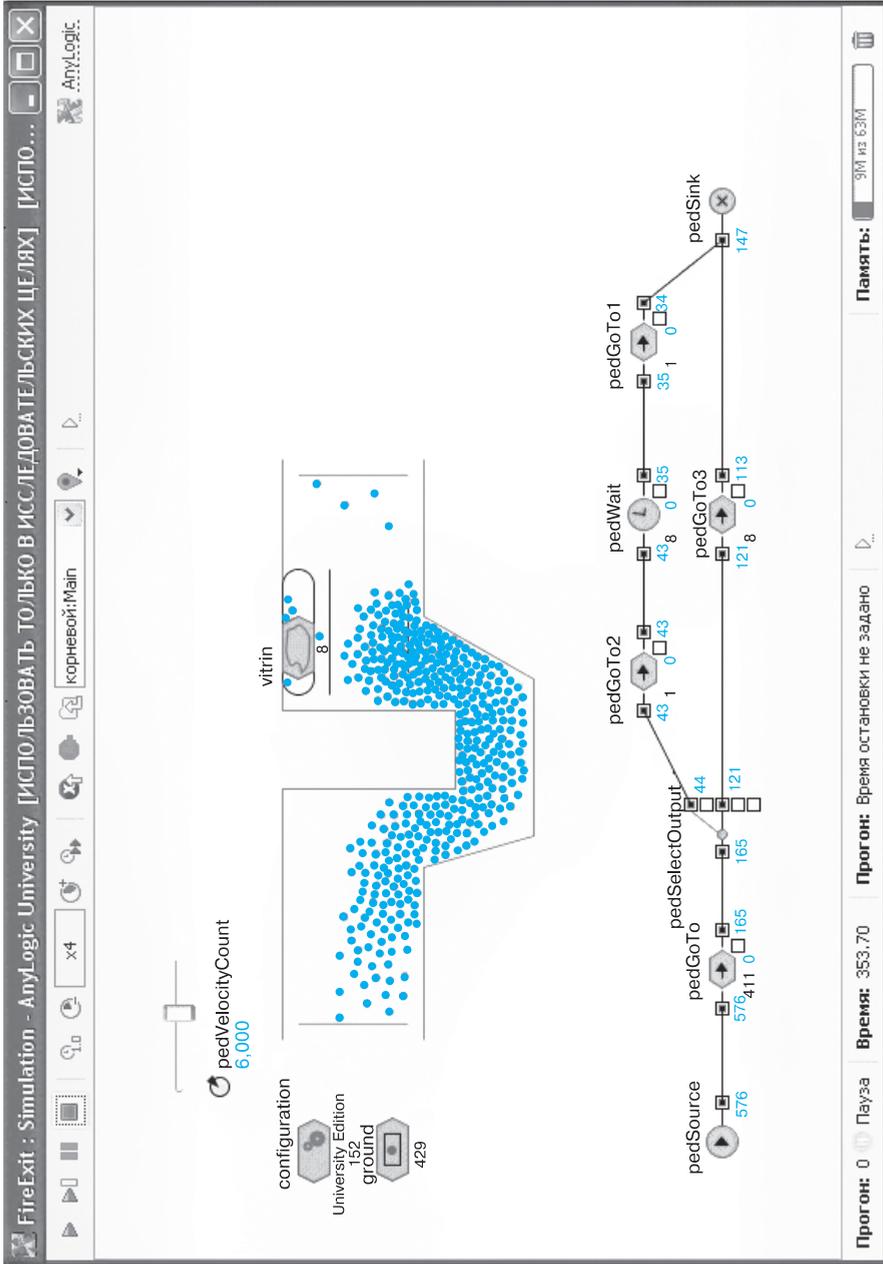


Рис. 3.6. Исследование модели (этап 3)

**Джеффри Гордон** — основатель дискретно-событийного подхода в имитационном моделировании, создатель системы имитационного моделирования GPSS World.

**Джей Форрестер** — американский инженер, разработчик теории системной динамики.

Такие модели — мощный и универсальный способ исследования влияния изменений в поведении отдельных объектов-агентов на всю модель. В математической модели, например, было бы очень сложно увидеть, как повлияет изменение тактики поведения жертв на популяцию хищников. Иногда очень простые изменения параметров приводят к существенно другим результатам, что в формулах можно учесть только после того, как эффект будет замечен.

#### Рассмотрим дискретно-событийные модели.

В агентной модели агент, как мы помним, принимал решения о своих действиях, исходя из восприятия окружения. При моделировании же многих организованных процессов все решения уже приняты заранее, т. е. известно, в каком порядке, кто и как должен действовать.

Моделируя такие системы, понятием агента (и самим агентным подходом) не пользуются, а используют понятие *заявки на обслуживание* — обращения к системе для достижения какого-то результата. Порядок обработки заявки задается в системе в виде некоторой последовательности событий: появления заявки, передачи заявки от одной стадии к другой, задержки (моделирующей выполнение стадии), накопления заявок в очереди.

При возникновении таких событий также оценивается доступность ресурсов, например занят или свободен какой-либо аппарат или комната.

Время в таких системах чаще всего представляется в виде условных дискретных шагов, поскольку заявка переходит из одной стадии в другую сразу, т. е. дискретно.

Такой подход позволяет проанализировать работу системы под заданной нагрузкой, определить заранее «узкие» места, оценить количество необходимых ресурсов и качество работы системы в целом.

Рассмотрим такую модель на примере упрощенного представления транспортного маршрута.

Наш маршрут состоит из трех остановок: начальной, промежуточной и конечной. Маршрутное транспортное средство (будем его в дальнейшем называть маршруткой) имеет 12 мест и ходит по некоторому расписанию. В маршрутку можно посадить не более 12 человек.

На первой остановке люди только садятся, на промежуточной — выходят (если это предполагалось) и садятся (если есть места), а на конечной — только выходят.

Для нас основным критерием работы линии будет количество ожидающих посадки людей на остановках. Еще один критерий, часто используемый в таких системах, — время, проведенное заявкой в системе. Рабочее окно нашей модели представлено на рис. 3.7.

В этой модели, в отличие от предыдущей, мы не используем анимации, поскольку нас интересуют только численные оценки. Длины очередей на каждом шаге мы фиксируем в специальных списках и отражаем на гистограммах, оценивающих длину двух очередей.

На рисунке 3.7 видно, что длина очереди на первой остановке не превышала 4, а на второй, гораздо более интенсивной, доходит и до 7. Насколько такое допустимо — вопрос изначально заданных критериев.

Если пассажиры не будут учитывать расписания маршруток, то при длительном перерыве в их движении (в нашем случае — от 18 до 30 точек отсчета) ситуация может выглядеть так, как показано на рис. 3.8.

То есть на остановках начнут скапливаться ожидающие маршрутку (23 на первой остановке и 21 на второй, поскольку там последняя маршрутка прошла позже). Чтобы это скомпенсировать, потребуется больше, чем 4 маршрутки, потому что не обязательно выходят все люди и постоянно подходят новые. При необходимости можно подобрать более адекватное расписание или увеличить количество маршруток.

Эта модель упрощена, поэтому мы не оцениваем задержку при входе и выходе пассажиров<sup>1</sup>, не рассматриваем работу станций-пе-

<sup>1</sup> В ряде городов введены в действие системы автоматического контроля пассажиров. В результате время посадки 15 человек может достигать 10–12 минут, что, конечно, стоит учесть в модели. Аналогично будет действовать и условие «оплата при выходе».

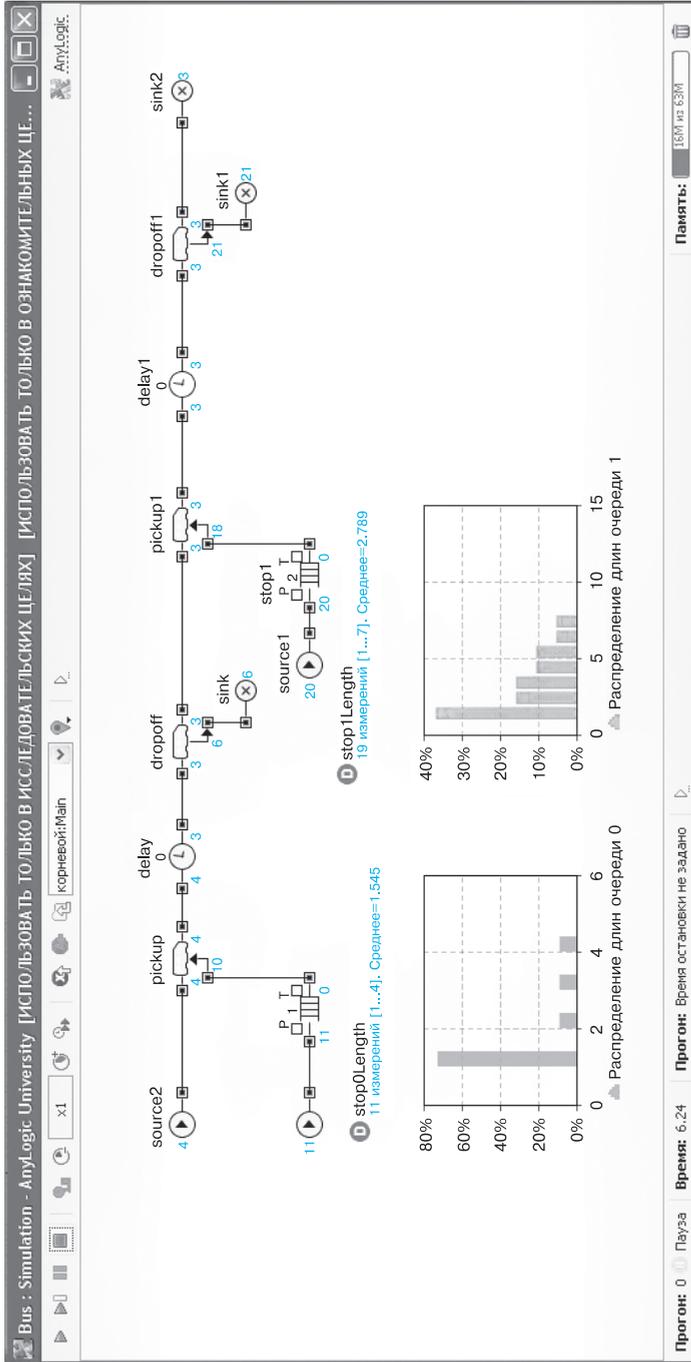


Рис. 3.7. Транзакционная модель маршрута



ресадов, возврат маршрутки назад, реальное время маршруток в пути. Очевидно, что при более тщательном подходе можно достаточно точно описать работу транспортной сети города и, оценив интенсивность появления пассажиров на остановках, спрогнозировать ее поведение.

Таким образом, можно моделировать работу учреждений, складов, транспортных сетей, систем обслуживания, конвейерных производств, оценивать достаточность ресурсов и скорость их работы. В отличие от агентного подхода этот способ требует существенно меньших ресурсов, что позволяет строить и изучать достаточно сложные модели.

В целом ряде случаев применение таких моделей — хорошая альтернатива реальным «пробам». Например, значительно целесообразнее проверять достаточность пожарных водоемов, pomp и расчетов на сетевой транспортной модели, а не в условиях реальных пожаров. Хотя в последние несколько лет решения принимаются именно на основе практического опыта. Реальные потери, конечно, значительно убедительнее.

**Системно-динамические модели.** Особый вид имитационных моделей разработан и используется для прогнозирования развития крупных систем, в которых поведение отдельных объектов взаимозависимо, причем связей много. Чаще всего такие системы рассматриваются в финансово-экономической сфере и в производстве.

В моделях системной динамики всю систему представляют в виде набора взаимосвязанных объектов следующих видов:

Название объекта	Назначение
Уровень	Переменная, накапливающая изменения
Связь	Обозначение влияния переменных
Связь с задержкой	Влияние с запаздыванием
Поток	Переменная, изменяющая значения уровней
Поток с регулятором	Изменение значения уровней с регуляцией. Изменение значения потока на основании вспомогательной переменной

*Продолжение таблицы*

Название объекта	Назначение
Вспомогательные переменные	Переменные-параметры, определяющие поведение, но сами ни на что не влияющие
Константы	Неизменные (во время симуляции) значения
«Облако» («Озеро»)	Неисчерпаемый источник или поглотитель

В качестве примера мы попробуем исследовать работу таможи в некоторой стране. Рассмотрим типичную для таможи ситуацию, когда часть товара поставляется в обход таможи и контролирующие органы страны полагают, что бюджет недополучает с этого налога.

Предлагается идея: вместо того чтобы усиливать борьбу с контрабандой (это долго, дорого и не гарантирует успеха), государство увеличивает налог на товар, компенсируя свои потери.

Поставщики товара поднимают цену при продаже, чтобы скомпенсировать выросший налог.

Известно, что в таких случаях контрабанда возрастает, потому что становится выгодной большему количеству поставщиков и потребителей.

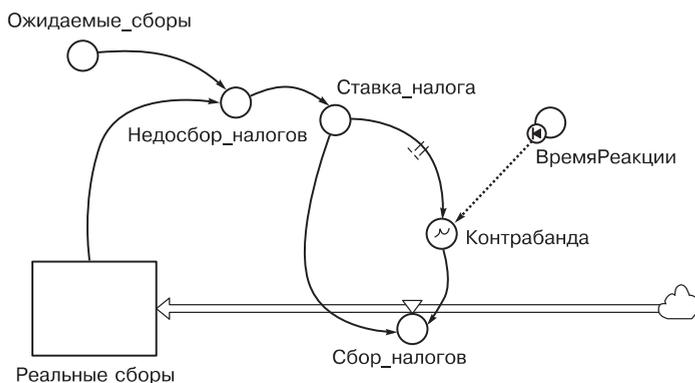
Возникает вопрос: сумеет ли государство скомпенсировать потери таким образом?

Составим модель: есть поток товара (мы укажем его в денежном эквиваленте в USD, условных системных деньгах), с которого по заданной ставке взимается налог. Налоги определяют уровень реальных сборов.

Зная объем ввоза (предположим, он не меняется), мы предполагаем уровень сборов и можем оценить недосбор налогов. Исходя из недосбора, мы вычислим новую ставку налога.

Изменяя ставку, мы повлияем и на сбор налогов, и на уровень контрабанды. Уровень контрабанды изменится не сразу, а через некоторое время, требуемое для реакции системы.

Составим модель<sup>1</sup> (рис. 3.9).



Год	Контрабанда	Недосбор_налогов	Реальные_сборы	Ставка_налога
0	USD1,10	USD0,00	USD80,00	USD0,00
20	USD2,19	USD5,39	USD74,61	USD4,31
40	USD2,44	USD6,07	USD73,93	USD4,86
60	USD2,49	USD6,21	USD73,79	USD4,97
80	USD2,50	USD6,24	USD73,76	USD4,99
100	USD2,50	USD6,25	USD73,75	USD5,00

Рис. 3.9. Исследование системно-динамической модели

«Проиграв» эту модель для 100 условных лет, мы выясним удивительную вещь — реальные сборы налогов не выросли, а упали. Можно экспериментировать с коэффициентами и усложнять модель, но суть дела не изменится: простой рост налогов при нежелании или неспособности бороться с контрабандой только ухудшит ситуацию.

Такие сравнительно простые схемы встречаются достаточно часто и имеют свои названия. Приведенная в примере схема называется «Решение, обреченное на неудачу».

Модель можно усложнить, введя уровень борьбы с контрабандой, в котором учесть влияние на деятельность контролирующих органов возрастания объема сборов, влияние борьбы с контрабандой на время и стоимость транспортных перевозок, другие параметры.

<sup>1</sup>

Модель подготовлена в демонстрационной версии PowerSim Studio 8.

Подобные схемы (иногда большие и сложные) позволяют изучать взаимное влияние происходящих социальных процессов и используют для принятия управленческих решений.

Системно-динамическое моделирование применяется для исследования и предсказания поведения сложных систем (например, социальных отношений) и активно используется для принятия решений.



### Вопросы и задания



1. Предложите примеры реальных ситуаций, которые могут быть исследованы с помощью дискретно-событийных моделей. Выделите параметры, которые будете наблюдать.
2. Предложите примеры реальных ситуаций, которые могут быть исследованы с помощью агентных моделей. Опишите параметры поведения агентов.
3. Предложите примеры использования системно-динамических моделей, в которых итоговым решением стало бы принятие некоторого указа или закона.

## § 15

### Управление и управляемые системы

- *Общая схема управления*
- *Что изучает кибернетика?*

Особый вид связи и особый класс систем — это системы, в которых один компонент в значительной мере определяет поведение другого, т. е. **управляемые системы**.

**Управлением** называют особый вид деятельности, направленный на поддержание системы в продуктивном состоянии, т. е. в состоянии, достигающем некоторых заранее определенных целей, путем организации поведения и взаимодействия элементов между собой и внешним миром. Для живого организма эта цель — выживание и размножение, для технической системы — выработка некоторого продукта.

Эта деятельность включает в себя: выработку решений (нужных воздействий), их передачу, выполнение и получение результатов.

В моделировании и создании таких систем выделяют две основные части: субъект управления (то, что управляет) и объект управления (то, чем управляют).

Эти две части связаны между собой, и поведение объекта управления в большей степени определяется субъектом. Нужно заметить, что в такой системе необходима минимум одна связь, т. е. компонент взаимодействия субъекта с объектом.

Связь эта информационная. Сообщения, управляя поведением объекта, становятся *командами*. При этом ни природа связи, ни вид сообщений существенного значения не имеют. Такая связь в управляемой системе называется *прямой связью*.

Часто предусмотрена и *обратная связь*, т. е. сообщения о результатах исполнения команд от объекта субъекту. Эта связь, очевидно, тоже информационная. Системы без обратной связи называют *разомкнутыми*, а системы с обратной связью — *замкнутыми* (рис. 3.10).

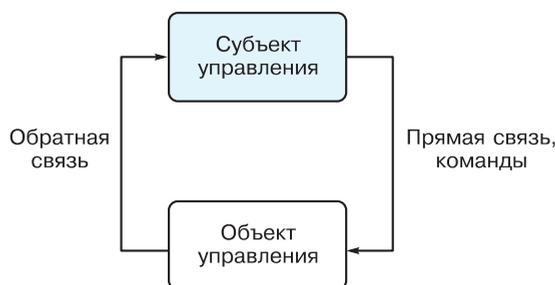


Рис. 3.10. Схема простейшей замкнутой управляемой системы

Такой подход универсален — нам не потребовалось для описания процесса оговаривать природу и способ связи объекта и субъекта. Он позволяет моделировать и изучать процессы управления в самых разных системах: технических, биологических, социальных.

Разработка технических систем автоматического управления с обратной связью стала причиной возникновения целого научного направления — *кибернетики*, в котором с помощью такого подхода рассматриваются самые разные системы с управлением. Основное положение кибернетики гласит, что управление — *процесс целиком информационный* (поскольку воздействие, оценка результатов и выработка новых команд — это процесс обработки и передачи некоторой информации) и протекает он по общим принципам в любых управляемых системах.

Системы управления — одно из самых старых и распространенных применений компьютеров<sup>1</sup>. Фактически современные компьютеры очень часто используются как универсальные субъекты управления, которые можно стандартными средствами связать с любыми объектами (от периферийных устройств до станков и сложных механизмов).

Использование этого подхода дает возможность создавать самые разные системы, управляющие сложными процессами или помогающие такое управление организовать с минимальным вмешательством человека.

Создание такой универсальной модели — это одна из важных задач, приводящих к понятию *искусственного интеллекта*. Известно, что один из крупных ученых в этой области, Марвин Минский, как-то дал одному из студентов задачу машинного зрения (т. е. сопоставления зрительного образа некоторым записям в базе данных) как дипломную работу. Эта задача не решена до сих пор, а как студент получил диплом, история умалчивает.

Тем не менее поиск решения задачи привел к появлению огромного количества продуктивных методов, алгоритмов и подходов к ее решению.

Появление устройств, выполняющих (и выполняющих очень эффективно) операции и действия, ранее доступные только людям, заставило задуматься: что еще и каким образом может быть автоматизировано? Как на самом деле надо принимать решения? Как действует человеческое мышление? Причем ответ на эти вопросы должен быть не отвлеченным описанием, а позволяющим действительно решить группу технических задач моделирования разных аспектов деятельности и мышления человека.

При решении этих задач выделилось два сообщающихся направления — это разработка и применение автоматических систем (специально спроектированных технических комплексов), которые на некоторых участках заменяют деятельность человека, и систем вспомогательных (автоматизированных), предназначенных для решения задач вместе с человеком.

В следующих главах мы продолжим знакомство с методами и средствами, которые используются во всех этих системах. Это будут методы представления и хранения информации, методы ее обработки, а также методы организации обмена информацией.

---

<sup>1</sup> Автоматические системы управления — один из источников появления универсальных вычислительных машин.

## Вопросы и задания



1. Приведите примеры систем, которые на некоторых участках заменяют деятельность человека, и систем, предназначенных для решения задач вместе с человеком.
2. Изобразите свои примеры из задания 1 графически с выделением субъектов, объектов управления и связей между ними.
3. Выполните проект «Моделирование» из задачника-практикума.

## Коротко о главном

Во множестве областей деятельности, особенно при изучении сложных объектов и систем, мы часто подменяем исходный объект его упрощенным подобием. В этом случае упрощенное подобие, созданное специально, называется *моделью*. Деятельность по созданию и исследованию моделей называется *моделированием*.

Модели строят исходя из цели, т. е. задачи, в которой предполагается ее использовать. Исходя из цели, оценивают и их подобие реальному объекту. Используя модели, мы можем изучить то, что невозможно сделать с исходным объектом, например, из-за его недоступности или ценности.

Все модели, кроме материальных, можно назвать *информационными*, поскольку исходными данными для любой модели, а также результатом ее работы или использования является информация. В общем виде под *информационной моделью* будем понимать описание объекта моделирования на каком-либо формализованном языке с тем, чтобы в дальнейшем исследовать полученную модель с использованием компьютера.

При построении моделей сложных объектов эти объекты представляют как системы. *Система* — это совокупность отдельных частей, связанных в единое целое и обладающих свойствами, которыми отдельные ее части не обладают. Отдельные части могут рассматриваться как неделимые элементы или как подсистемы. Изучая системы, выделяют некоторые их общие свойства: *эмерджентности, целостности и иерархичности*.

Существует множество классификаций моделей. Из всего многообразия мы рассмотрели те, которые создаются и используются только с помощью компьютеров: описательные модели (например, базы данных), нормативные модели (например, программы). Такие модели получили название компьютерных, поскольку в информатике основной инструмент исследования моделей — компьютер.

Для исследований, решения и иллюстрации в различных задачах часто используют:

- *математические модели*, описывающие исходную систему с помощью математических соотношений;
- *имитационное моделирование* — подход, при котором мы описываем исходные объекты, имитируя их поведение.

В некоторых случаях эти методы взаимозаменяемы, но часто выгоднее использовать какой-то один.

В имитационном моделировании выделяют модели:

- *дискретно-событийные*, в которых исследуются цепочки событий;
- *агентные*, в которых исследуется система, состоящая из самостоятельно принимающих решения элементов — агентов;
- *системной динамики*, в которых системы представляются в виде преобразующихся потоков ресурсов и информации.

Используя моделирование как научный метод познания, мы можем описывать, проектировать и совершенствовать системы, а также предупреждать их нежелательное поведение.



### Источники

1. Качала В. В. Основы теории систем и системного анализа. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 216 с.
2. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика). — М.: Прогресс, 1971. — 339 с.
3. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. — М.: Мир, 1978. — 418 с.
4. Медоуз Д. Х. Азбука системного мышления — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 343 с.
5. Арнольд В. И. Теория катастроф. — 3-е изд., доп. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. — 128 с.