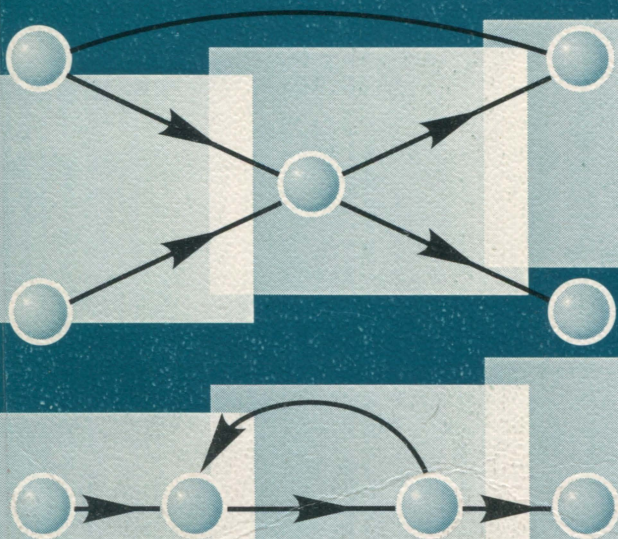


Stafford Beer  
CYBERNETICS  
AND MANAGEMENT

Стаффорд  
Бир



# КИБЕРНЕТИКА и МЕНЕДЖМЕНТ



Стаффорд Бир

КИБЕРНЕТИКА и  
МЕНЕДЖМЕНТ



Stafford Beer

CYBERNETICS AND MANAGEMENT

**С. Бир**

---

# **КИБЕРНЕТИКА И МЕНЕДЖМЕНТ**

---

Перевод с английского  
*В. Я. Алтаева*

Под редакцией  
*А. Б. Челюсткина*

Предисловие  
*Л. Н. Отоцкого*

Издание второе

МОСКВА

---



URSS

**Бир Стаффорд**

**Кибернетика и менеджмент:** Пер. с англ. / Под ред. А. Б. Челюсткина. Предисл. Л. Н. Отоцкого. Изд. 2-е. — М.: КомКнига, 2006. — 280 с.

ISBN 5–484–00434–9

Эта книга не является ни научной монографией, ни учебником, а представляет собой краткий очерк основ кибернетики. Она дает представление о содержании, целях и методах кибернетики как единой науки. Автором затронуты все ключевые проблемы кибернетики. С достаточной научной полнотой изложены логические и биофизические начала кибернетики. Освещаются новейшие представления в области теории конечных автоматов и машин Тьюринга, обучающихся и обучающих систем, самонастраивающихся и самоорганизующихся систем. Приводятся принципы построения кибернетического промышленного предприятия будущего.

Доступное и увлекательное изложение (без привлечения сложного математического аппарата), живой язык, удачная методика изложения, яркие примеры из различных областей науки, техники и повседневной жизни и особенно из области управления производством — все это приводит к тому, что книга читается с неослабевающим интересом. Полемический характер изложения многих проблем, оригинальные идеи и взгляды автора вызовут у читателя желание поспорить и вновь продумать некоторые кардинальные вопросы.

Книга рекомендуется математикам и биологам, экономистам и специалистам в области автоматизации, научным работникам и инженерам, интересующимся приложениями кибернетики. Также она будет полезна студентам и аспирантам, изучающих соответствующие естественные или экономические дисциплины.

1-е издание выходило под названием  
«Кибернетика и управление производством»

Издательство «КомКнига». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.  
Подписано к печати 18.01.2006 г. Формат 60 × 90/16. Печ. л. 17,5. Зак. № 411.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, д. 11А, стр. 11.

ISBN 5–484–00434–9

© В. Я. Алтаев, перевод  
на русский язык, 1963, 2006  
© Л. Н. Отоцкий,  
предисловие, 2006  
© КомКнига, 2006



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (Л.Н.Отоцкий) . . . . .	4
Из предисловия автора . . . . .	7
От автора . . . . .	14
Глава 1. Введение . . . . .	15
<b>Часть первая. Основные понятия . . . . .</b>	<b>20</b>
Краткое содержание . . . . .	20
Глава 2. Системы как предмет исследования . . . . .	22
Глава 3. Сущность управления . . . . .	36
Глава 4. Универсальность обратной связи . . . . .	46
Глава 5. Целесообразные системы и информация . . . . .	60
Глава 6. «Черный ящик» . . . . .	72
<b>Часть вторая. Логические основы кибернетики . . . . .</b>	<b>85</b>
Краткое содержание . . . . .	85
Глава 7. Кибернетика как новая наука . . . . .	87
Глава 8. Логические начала . . . . .	94
Глава 9. Принцип внешнего дополнения . . . . .	103
Глава 10. Эффективность двоичной системы счисления . . . . .	110
Глава 11. Теория автоматов . . . . .	118
<b>Часть третья. Биофизические основы кибернетики . . . . .</b>	<b>138</b>
Краткое содержание . . . . .	138
Глава 12. Математическая биофизика . . . . .	140
Глава 13. Экспериментальные исследования свойств адаптации . . . . .	147
Глава 14. Обучающиеся и обучающие машины . . . . .	156
Глава 15. Разумные самоприспосабливающиеся машины . . . . .	167
Глава 16. Облик кибернетического предприятия . . . . .	186
<b>Часть четвертая. Кибернетическая теория моделей . . . . .</b>	<b>201</b>
Краткое содержание . . . . .	201
Глава 17. Модель живых тканей . . . . .	203
Глава 18. Модель механизма управления . . . . .	214
Глава 19. Модель неопределенности . . . . .	237
Глава 20. Модель языка . . . . .	266
<b>Литература . . . . .</b>	<b>272</b>



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В предисловии к переизданию книги «Мозг фирмы» Стэффорда Бира<sup>1)</sup> говорилось о важности освоения наследия «отца кибернетики менеджмента». Причем это относится не только к перспективам развития информационных технологий, но и к более широким проблемам развития общества. Достаточно упомянуть разработанные им теоретически в рамках Модели жизнеспособной системы (VSM) механизмы преодоления принципиальных недостатков бюрократических пирамидальных структур управления.

Эти механизмы уже использовались Биром на практике и так необходимы сейчас для новой России. В одной из последних статей «Мир в мучениях» (“World in Torment”)<sup>2)</sup> Бир еще более широко рассматривает существующие проблемы общества, симптомы болезни которого ощущаются все более остро в начале XXI века. В частности, он пишет: «Если советский коммунизм принял свое крушение, то западный капитализм этого еще не сделал». Не случайно еще одна книга, выпущенная настоящим издательством, посвящена значению идей Бира в «социальных приложениях»<sup>3)</sup>.

В этих условиях, кроме важности издания таких «сопутствующих» «Мозгу фирмы» работ, как книга «Сердце предприятия» (“The Heart of Enterprise”), принципиальным является издание и первых пионерских работ Бира, в которых дается теоретический фундамент для последующего развития. Базовой работой этого ряда является книга «Кибернетика и менеджмент» (“Cybernetics and Management”), второе издание перевода которой в 1965 году было уже дополнено общеметодологическими и философскими работами автора. Именно в ней в главе 16 набрасывается контур предприятия будущего как живого организма,

---

<sup>1)</sup> Стэффорд Б. Мозг фирмы. М.: УРСС, 2005.

<sup>2)</sup> [www.staffordbeer.com/papers/World%20in%20Torment.pdf](http://www.staffordbeer.com/papers/World%20in%20Torment.pdf).

<sup>3)</sup> Хищенко В. Е. Самоорганизация: элементы теории и социальные приложения. М.: КомКнига, 2005.

детализированный в дальнейшем в VSM. А в главе 9 формулируется знаменитый «принцип внешнего дополнения», являющийся основой механизма преодоления противоречия между необходимостью «замкнутого контура» для управления, с одной стороны, и принципиальной «незамкнутостью» любой системы с точки зрения Геделевской «неполноты» — с другой. Именно принцип внешнего дополнения впоследствии в рамках VSM развился до «алгедонического» контура управления. В книге последовательно анализируются фундаментальные основы систем управления и с логической, и с биофизической стороны, и с точки зрения экспериментальных исследований адаптации. А в главе 2 дана классификация систем, в которой системы управления в экономике отнесены к «очень сложным вероятностным системам», имеющим гомеостатическую природу. Детализация вопросов обеспечения их выживаемости была сделана в последующих работах Бира.

В предисловии к первому русскому изданию в 1965 году в эпоху эйфории по поводу развития средств вычислительной техники такое развитие не учитывалось, а его классификация подвергалась критике. Бир же уже тогда указывал на принципиальную необходимость пересмотра психологии управления с учетом появления новых технических средств. В прилагаемой к книге статье «Дело не в автоматизации» Бир прямо говорит: «Я не против автоматизации, но я против культа автоматизации, так как считаю, что, совершая революцию, мы сосредоточили внимание вовсе не на том, что в ней важно».

Сейчас, на новом витке развития, проблема интеграции «нижних этажей нервной системы» Интернет с «верхним уровнем интеллекта» стоит не менее остро. Существующая технология Internet гораздо лучше справляется с социокультурной стороной коммуникаций, когда главным инициатором общения является человек. Однако для новых технологий B2B с минимизацией влияния медленного и «склонного к ошибкам» «человеческого звена» «интеллекта» существующих порталов явно не хватает<sup>4)</sup>. Именно фундамент такой интеграции разных уровней жизнеспособных систем и закладывал Бир, взяв за основу своих моделей устройство нервной системы человека. Благодаря своему глубокому научному фундаменту VSM может

---

<sup>4)</sup> <http://www.osp.ru/os/2000/03/076.htm>.

стать «онтологией верхнего уровня» для перспективного развития как КИС, так и Интернет (Semantic Web).

В книге, в отличие от «Мозга фирмы», не рассматриваются социальные проблемы зато больше внимания уделяется методологическим и философским вопросам. Так, в дополнительной статье «Мифология систем под сводом сумерек» детально анализируется новая интерпретация понятий порядка и хаоса с точки зрения кибернетики. Этот подход близок по своей сути к взглядам Ильи Пригожина на самоорганизующиеся структуры в условиях неравновесной термодинамики. Эти же условия являются необходимыми и для более сложно организованных систем, рассматриваемых Биром.

Книга является важным дополнением к последующим его работам, так как дает возможность увидеть фундамент, который в дальнейшем детализировался и развивался.

*Леонид Отоцкий,*  
кафедра системной интеграции  
и менеджмента МФТИ

*Начало — половина целого.*

Пифагор

## ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА

В ноябре 1957 года я получил приглашение от Шведской Королевской академии технических наук прочесть лекцию по отдельным вопросам кибернетики и, в частности, о ее значении для промышленности. Я прочел эту лекцию в Стокгольме 26 апреля 1958 года. Благодаря любезности моих хозяев и содействию Шведского государственного совета по техническим исследованиям я получил возможность провести еще неделю в Швеции. В ходе семинаров и бесед, которые состоялись в Стокгольме и Уппсале, первоначальные рамки лекции расширились до довольно полного изложения предмета. Академия обратилась ко мне с просьбой подготовить изложение этого материала для печати. При этом возникло затруднение, обусловленное тем, что к этому времени тот объем сведений по кибернетике, который я изложил своим слушателям, уже был весьма обширным. Он намного выходил за узкие рамки статьи. Для изложения всего материала потребовалось бы уже что-то вроде книги. Однако интерес, проявленный к предмету в Швеции, послужил одним из стимулов к тому, чтобы взяться за эту работу. В 1956 году в Намюре, в Бельгии, была основана Международная ассоциация по кибернетике, организаторы которой в течение длительного времени убеждали меня дать общее изложение тех позиций, с точки зрения которых я веду работу в кибернетике. Это явилось еще одним стимулом для написания книги. Таким образом, появление ее обязано этим двум причинам. Она не является ни учебником, ни научной монографией. Это общий очерк основ новой науки, предназначенный для всех, кто интересуется проблемами



управления. Однако это не означает, что книга предназначена для легкого чтения. В ней рассматриваются сложные вопросы, понимание которых самими специалистами по кибернетике находится еще лишь в самой начальной стадии. Однако эти вопросы являются весьма увлекательными, они открывают новые, многообещающие перспективы перед ученым и философом и требуют к себе пристального внимания со стороны руководителя предприятия. Эта книга и предназначена прежде всего для руководителей производства, имеющих научную подготовку и обладающих смелостью мысли. Именно такие люди могут овладеть кибернетикой и заставить ее работать на себя.

Я попытался дать связную картину, отдельные детали которой образуют единую композицию. Кратко прослежены истоки кибернетики, новый образ мышления изложен на фоне истории и философии науки, показана связь других областей науки и иных направлений мысли с кибернетикой, наконец, намечены перспективы использования кибернетики в промышленном производстве. Таковы широкие и важные вопросы, над которыми пришлось работать автору. При этом автор прежде всего стремился к краткости изложения, ибо читатели, которым адресована книга, не могут позволить себе роскоши копаться в толстом фолианте, так как время у них ограничено. Поэтому результат моих усилий далек от совершенства. Это попытка найти компромисс между двумя противоречивыми методами изложения материала: сжатым, точным, но не всегда понятным — и пространным, скрупулезным, но утомительным.

Стремясь всеми силами избежать как той, так и другой крайности, я сосредоточил все внимание на самом важном, с моей точки зрения, аспекте: т. е. старался показать внутреннее единство предмета. Некоторые считают, что кибернетика является синонимом автоматизации, другие полагают, что это наука, занимающаяся экспериментами с крысами, третьи убеждены, что это отрасль математики, наконец, четвертые думают, что целью кибернетики является создание вычислительной машины, способной управлять целой страной. Я надеюсь, что, прочитав эту книгу, читатели поймут, каким образом все

эти совершенно различные представления могут существовать одновременно и почему в то же время ни одно из них не является единственно правильным.

Стремление охватить весь предмет и показать его единство, а также сделать изложение конкретным и подкрепить его фактами потребовало привлечения большого числа примеров и сравнений. Они приведены с целью демонстрации того, какое место занимает кибернетика в современных науках и какие идеи она заимствует из них. Необходимость сжатого и логически последовательного изложения материала заставила опустить исчерпывающее пояснение всех деталей. Во многих случаях читателю они полностью известны. Однако иногда он может встретиться с затруднениями, наткнуться на недостаточно полно раскрытый термин или не уловить существа отдельного теоретического положения. В этом случае я рекомендую продолжить чтение и забыть о непонятном моменте. Наглядными примерами являются приводимые иногда математические выкладки, которые даны как пояснения отдельных положений для тех, кто знаком с алгеброй. Любой читатель, не владеющий основами математики, может смело опустить эти примеры при чтении.

Однако таких рекомендаций нельзя дать в отношении новой терминологии. Каждая наука имеет свой собственный язык, причем существуют две причины, обуславливающие необходимость овладения его основами и новыми терминами, на которых он построен. Так, например, если имеется важное управляющее устройство, предназначенное для поддержания какой-либо регулируемой переменной в заданных пределах и называемое гомеостатом, то целесообразно, говоря о таких устройствах, называть их гомеостатами, а не повторять всякий раз полное описание названия этого устройства. Далее, если читатель, ознакомившись с популярной книгой, заинтересуется предметом и захочет использовать прочитанный материал, то он будет стремиться читать другие работы по данному предмету. Если же эти работы покажутся ему бессмысленными, ибо в них используются термины, с которыми он никогда не встречался, то он будет вправе осудить автора популярной книги. Таким

образом, хоть я и являюсь горячим сторонником школы «простого английского языка» и питаю столь же сильную неприязнь к жаргону, как и все представители этой школы, я полагаю, что в этом отношении не следует перебарщивать. Например, стремление говорить о политике на «бейсик инглиш»<sup>1)</sup> не вызвало бы ничего, кроме раздражения. Сложные понятия требуют использования соответствующих терминов, с помощью которых эти понятия могут стать предметом рассмотрения. В противном случае обсуждение их зайдет в тупик, а участники обсуждения только потеряют терпение, пытаясь до чего-нибудь договориться.

В данной книге я стремился по ходу изложения материала развить основную терминологию кибернетического языка. Каждый новый термин при введении выделен жирным шрифтом и значение его пояснено, если есть основание считать, что он неизвестен читателю. В связи с этим следует предупредить новичка в кибернетике, что при попытке непоследовательного чтения книги он может столкнуться с непонятным для него языком. С другой стороны, очень легко можно забыть значение слова, встретив его после первого знакомства через несколько глав или, возможно, спустя несколько дней или недель. Если читатель чувствует, что значение слова утратило для него смысл, то ему следует освежить в памяти первоначальное значение, просмотрев соответствующую страницу.

Примерно аналогичные вопросы возникают в отношении библиографических ссылок на другие работы. Большинство указанных в книге работ посвящено подробному рассмотрению кибернетических проблем, упоминаемых в тексте книги. Они подчас могут и не представлять интереса для среднего читателя, как явствует из самих названий ряда работ или из названий журна-

<sup>1)</sup> Basic — сокращение от первых букв British-American Scientific International Commercial. Basic English — примитивный английский язык, состоящий всего из 850 слов, который разработан Огденом (С. К. Ogden) и предложен в качестве международного языка, на котором якобы можно выразить все современные понятия. (Прим. перев.)

лов, в которых они опубликованы. Если в тексте книги рассматривается вопрос, не имеющий фундаментального значения в кибернетике, то ссылки на работы, посвященные этому вопросу, как правило, вообще не приводятся. Например, в книге затрагивается несколько математических вопросов, которые могут вызвать желание более подробного изучения. Если бы была дана библиографическая ссылка, то она включала бы монографию Клини (Kleene) «Введение в метаматематику» (1952). Судя по названию, можно подумать, что это популярная книга. Однако такое предположение ведет к явному заблуждению. «Введение», став теперь уже классической работой, представляет исчерпывающее исследование, доступное только для специалистов по математике и логике. Поскольку настоящая книга не является учебником, нет смысла приводить огромный список внушительных библиографических ссылок по различным проблемам, принадлежащим другим областям науки.

На этом следует закончить пояснения и предоставить книге говорить самой за себя. Что же она в конечном счете стремится сказать? Вот некоторые замечания по этому поводу.

В наши дни в мире высвобождаются гигантские новые силы. Это силы энергии атома, силы новых наций, приобретающих уверенность в своей потенциальной мощи, силы новых идеологий. В развитии методов управления нельзя обнаружить чего-либо подобного ни с точки зрения экономики или политики, ни социологии или промышленного производства. Наука занималась поисками «первичного» источника энергии в физике самого Солнца, в освобождении энергии при основном преобразовании, т. е. при превращении водорода в гелий. Сейчас наука стремится отыскать «первичный» источник управления в кибернетике природных процессов, в эволюции нервной системы и самого мозга. Роль научных исследований природы управления ежегодно возрастает по мере увеличения мощи неуправляемых сил.

Если необходимость в проведении этой работы очевидна и перспективы, открываемые кибернетикой, необо-



зримы, то, пожалуй, необъяснимо, почему прогресс идет так медленно, а научные силы, сосредоточенные на проблемах кибернетики, столь ограничены. Я думаю, что объяснение существующего положения очень просто и естественно. Кибернетика — новая наука со сложной родословной и с большими требованиями. Она пока что выступает в мире науки в роли выскочки. Ее язык звучит грубо, поведение выглядит нескромным. Она полна юношеского пыла и энергии. Ни одно из этих качеств не может внушить любви. Новая наука еще не защищена от иронических нападок, не завоевала пока что академического признания. Однако не так давно идея расщепления атома также подвергалась насмешкам, а уже совсем недавно к мысли о космических полетах не проявляли никакого почтения. За последние годы в гостиницах науки произошли головокружительные изменения. Возможности мыслящих управляющих машин ожидают своей очереди в кулуарах.

Сколько им придется ждать? Ответ на этот вопрос зависит от дальновидности и энергии ученых и руководителей производства, университетов и правительств. Те, кто должен работать в этой области, нуждаются в поддержке и ободрении со стороны тех, кому нужны плоды их труда. Инерция старого консервативного образа мыслей еще до конца не преодолена ни одной из сторон. Как всегда, истинным препятствием к развитию нового образа мышления является не сложность проблем, а консервативность самих людей. Это обстоятельство может огорчать, но в то же время оно рождает уверенность в том, что новые взгляды содержат в себе большие возможности, ибо известно, что ничто подлинно ценное никогда легко не делается и что мощную оппозицию вызывают только фундаментальные идеи.

Содержание текущей фазы развития кибернетики очевидно. Высоко развитые в промышленном отношении страны Запада вынуждены встретиться с сильным давлением с Востока.

Признаки в этом отношении явно зловещие. Поразительные темпы развития в России, например, не являются исключительно плодом одной железной воли и самопожертвования. Спутники не выводятся на орбиту

постами и молитвами. В Англии мы не можем похвастаться какими-либо успехами в области исследования космоса, ибо у нас всегда не хватает денег для осуществления необходимых программ. Иногда утверждают, что в сфере промышленного производства использование новых методов и деятельность образованных администраторов якобы преобразили лицо английской промышленности. Однако на деле индекс промышленного производства за четыре года не сдвинулся с места. Нам жизненно необходим какой-то принципиально новый путь развития, мы должны предпринять что-то качественно новое в своих усилиях, что-либо использующее зрелость и опыт нашей культуры. Кандидатом на эту роль является наука об управлении. Кибернетические исследования можно двинуть вперед, затратив значительно меньшие средства, чем те, например, которые тратятся на ракетостроение. И если мы не сделаем этого, то кто-нибудь другой сделает это наверняка.

*Стаффорд Бир*

## ОТ АВТОРА

Я хотел бы выразить свою благодарность компании «Юнайтед Стил», в которой я являюсь руководителем отдела теории исследования операций и кибернетики, за разрешение опубликовать эту книгу. Я весьма признателен также профессору Эди Веландеру (Edy Velander), директору Шведской Королевской академии технических наук, и профессору Жоржу Буланже (Georges Boulanger), президенту Международной ассоциации по кибернетике, за ту помощь, которую они мне оказали. Однако я считаю нужным подчеркнуть, что взгляды, изложенные в этой книге, отражают мою личную точку зрения и не получили официального одобрения со стороны этих организаций.

Мне хочется, далее, принести благодарность всем тем, чьи труды и исследования повлияли на формирование идей, изложенных в предлагаемой вниманию читателя книге. Многие из этих ученых упомянуты в самом тексте, но я считаю приятным долгом особо отметить имена доктора Росса Эшби, Гордона Паска, доктора Грея Уолтера и доктора Фрэнка Джорджа, которым, пользуясь случаем, я приношу свою искреннюю благодарность.

*Стаффорд Бир*

## Глава 1

### ВВЕДЕНИЕ

Всегда существовали ученые, которые считали, что человеческое познание покоится на едином фундаменте. Однако в наши дни на ученых, готовых исследовать это единство, многие смотрят с большим недоверием. По мнению некоторых критиков, никто не возьмет на себя смелость утверждать, что один человек может усвоить больше, чем ничтожную долю всех знаний, накопленных современной наукой. Более того, говорят другие, всякий, кто пытается рассматривать явления, исходя из представления о том, что в основе наших знаний лежит нечто общее, рискует оказаться в положении исследователя, убежденного в том, что существует какой-то «таинственный ключ познания вселенной», некий единственный изначальный принцип, открытие которого позволит человеку осмыслить свое предназначение. Этот принцип является, конечно, неуловимым метафизическим миражем. Однако, несмотря на все эти обоснованные высказывания, существуют ученые, готовые исследовать единые истоки науки, готовые решать задачи, относящиеся ко всем ее областям, т. е. не учитывать специфику концепций только какой-либо одной конкретной отрасли науки.

Немногим более пятнадцати лет назад в Америке сформировалась группа таких ученых. Это были известные специалисты различных отраслей науки, но всех их объединял интерес к одной общей проблеме, которую можно кратко назвать проблемой управления. Настало время по-новому осмыслить эту проблему, подойти к ней с позиций, выходящих за рамки ортодоксальных



границ, предусмотренных университетскими программами. Важнейшая роль проблемы управления выявилась в то время в связи со второй мировой войной. Однако для рождения новой науки недостаточно одной потребности защиты отечества, для этого необходим определенный общий уровень развития научной мысли. И действительно, несколько быстро развивающихся направлений науки, зародившихся в совершенно различных областях, сливались в то время в единое русло.

Ученые и инженеры усиленно работали над созданием электронной управляющей аппаратуры различных типов. Математики стремились внести свой вклад в общее дело, исследуя свойства информации в электрических системах и описывая их аналитическим языком. На другом участке специалисты развивали теорию кодирования информации. Они пытались дать ответ на вопрос: как можно измерить содержание информации в сообщении и как точно выразить эту меру? Специалисты по статистике также начали рассматривать поток информации в живом организме как основу физиологического регулирования его функций. С этой целью использовалась теория вероятностей в той форме, которая была разработана для решения проблемы неопределенности в новых отраслях физики и которая воплотилась в дисциплине, известной под названием статистической механики. Ученые-биологи также начали проявлять интерес к проблемам управления и к механизму передачи и переработки информации в живом организме. Они предприняли первые попытки рассматривать эти задачи с формальной точки зрения, используя математический аппарат. Специалисты в области логики, инженеры, психиатры и специалисты других областей знаний становились на путь, который вел к одной центральной идее — сущности понятия управления. Постепенно некоторые из этих исследователей, несмотря на разделявший их языковой барьер, обусловленный наличием особых профессиональных языков, которыми пользуются специалисты различных отраслей науки, начали осознавать, что все они рассматривают одну и ту же проблему.

Группа таких ученых первоначально сплотилась вокруг энергичного американского математика Норберта

Винера (Norbert Wiener). К 1947 году они пришли к выводу о том, что их исследования привели к открытию новой области научной мысли, и они назвали эту новую науку кибернетикой. Классическая работа Винера относится именно к этому году [1]. В настоящее время эта работа может служить примером того, как постепенно становилось все более очевидным удивительное открытие, что некоторое подлинное единство действительно характеризует механизм управления, изучаемый самыми различными науками.

Два члена упомянутой группы были заняты в то время разработкой машины, которая должна была дать возможность слепым читать. Уже тогда была не нова идея применения фотоэлемента, сканирующего строку печатного текста с целью воспроизведения различных звуковых соответствий буквам и словам, содержащимся в тексте. Если бы удалось найти средство соединения полученных таким образом звуков в звуковые образы, которые можно было бы так же легко распознавать, как зрительные образы, то слепых, обладающих слухом, можно было бы научить читать «ушами». Основная трудность реализации такой идеи заключается в том, что звуковой образ должен быть существенно идентичным для каждого постоянного сочетания букв независимо от вида шрифта. Прибор, разработанный двумя учеными, был основан на принципе избирательного чтения, реализуемом при помощи процесса автоматического сканирования. Была выполнена схема аппарата, содержащего большое число фотоэлементов и генераторов. Эта схема, как рассказывает Винер, привлекла внимание известного анатома, входившего в группу. Ознакомившись со схемой, анатом спросил: «Скажите, пожалуйста, это схема четвертого слоя зрительного аппарата мозга?»

Этот случай является одним из первых примеров того, каким образом в результате слияния установившихся научных дисциплин начала зарождаться общая теория управления. Кого не поразит тот факт, что специалисты, не имевшие отчетливого представления о той области науки, в которой работали их коллеги по группе, подошли с одних формальных позиций к столь сложной

проблеме. Такой синтез взглядов отнюдь не был случайным совпадением. Эти ученые, воодушевленные сделанным открытием, разработали на базе математического описания процесса сканирования теорию анатомического и физиологического механизма той части мозга, которая связана со зрением. Процесс сканирования характеризуется наличием времени цикла, в течение которого производится периодическая «развертка». В новой теории зрительного аппарата мозга было установлено, что продолжительность этого периода определяется временем, затрачиваемым на передачу информации через определенные нервные каналы. Далее было установлено, что этот период близко совпадает с периодом альфа-ритма мозга, который был ранее найден непосредственно из физиологических опытов. Таким образом продолжалось слияние различных областей знаний.

Можно надеяться, что эти предварительные замечания об истории зарождения кибернетических исследований, проиллюстрированные примером, относящимся к периоду их возникновения, помогут читателю лучше понять предмет и перспективы кибернетики. Отметим, что материал будет рассмотрен не в хронологическом, а в систематическом порядке. В ходе изложения придется рассмотреть многие вопросы, которые ряду читателей могут оказаться знакомыми. Однако при этом каждый читатель почти наверняка встретится и с некоторыми идеями, о которых он не имеет достаточного представления, так как кибернетика объединяет самые различные области знаний. В связи с этим все вопросы вначале обсуждаются в упрощенном виде. Поэтому автор заранее приносит свои извинения тем читателям, которые являются специалистами соответствующих отраслей и для которых некоторые разделы могут показаться скучными.

Остается сделать последнее замечание о задачах, которые ставит перед собой эта книга. Уже известно несколько попыток систематического изложения научных основ кибернетики. В этих работах основное внимание сосредоточивалось на связи кибернетики с различными традиционными областями знаний. Некоторые биологи быстро оценили значение кибернетики для биологии.

Ряд инженеров также хорошо представляет себе роль кибернетики в развитии техники и в первую очередь в автоматизации производства. В социологии ощущается потребность введения формального аппарата кибернетического типа. Известный антрополог Маргарет Мид (Margaret Mead) была членом первой группы американских ученых, начавших работы в этом направлении. Наиболее интересными публикациями, связанными с этими работами, являются статьи Симона (Simon). Аналогичная картина наблюдается и в экономических науках. Данная же книга ставит своей целью показ связи между кибернетикой и управлением производством.

Изложение задач управления производством с привлечением в самом общем виде некоторых идей кибернетики не представляет особого труда. Такие работы уже имеются. Однако такой слишком общий подход не дает ясного представления о проблемах и существо новой науки. Поэтому в настоящей книге прежде всего излагаются основные положения кибернетики, в то время как примеры берутся из области управления производством.



## Часть I

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Кибернетика есть наука об управлении и связи. Прикладные аспекты этой науки можно отнести к любой области исследований: к технике или биологии, физике или социологии и т. п. Теоретическим содержанием этой науки является общая теория управления, не связанная непосредственно ни с одной прикладной областью и в то же время применимая к любой из них. В первых пяти главах раскрываются основные понятия новой науки кибернетики, являющиеся базой ее формальных и прикладных аспектов, рассматриваемых в настоящей книге в их взаимосвязи.

В первой из этих пяти глав (в главе 2) рассматривается объект управления. Показывается, что объектом является система, т. е. любой комплекс динамически связанных элементов. С формальной стороны эти элементы можно рассматривать как точки, связанные цепью соотношений. Вместо классификации систем и связей по ортодоксальным признакам (например, являются они живыми или неживыми объектами, представляют собой учреждение или технологический процесс на металлообрабатывающем заводе) предложена более общая классификация. Эта классификация основана на оценке сложности систем и природы существующих в них связей (регулярные или случайные).

Далее (в главе 3) рассматривается само понятие управления. Какое, по существу, содержание вложено в это понятие? Показывается, что в общепринятом употреблении под управлением понимается один из видов регулирования, являющийся, по сути дела, принужде-

нием. Однако существуют более совершенные методы управления, в частности в природе и особенно в биологических системах. Управляющая система представляется особым видом машины, ибо каждая система выполняет какие-либо функции, которые можно рассматривать как цель машины. Управление является стратегией, применяемой машиной для достижения этой цели.

В главе 4 вводится одно из самых фундаментальных понятий управления — принцип обратной связи. Большинство работ по этому вопросу посвящено только техническим и математическим аспектам. В настоящей работе главное внимание обращено на универсальность этого принципа и его важную роль для любых систем. Хотя это понятие вводится на примере объектов, обычно называемых машинами (т. е. комплексов технических устройств), оно распространяется в дальнейшем и на системы принципиально иного типа. Исследуются специальные случаи реализации принципа обратной связи в экономике государства и в механизме памяти человеческого мозга. Эта глава подготавливает основу для изложения специфических методов кибернетики, применяемых для исследования указанных выше случаев.

В пятой главе излагается ряд основных понятий и поясняется значение специфической терминологии, применяемой в кибернетике. Систему или машину можно описать языком логических формул, а изменение состояния машины — в виде преобразования этих формул. Таким образом, динамическая система или машина заменяется моделью и набором правил — алгоритмом, определяющим изменения состояния. В целях обеспечения требуемого потока внутренней информации в системе для оценки наблюдаемого поведения дается критерий, позволяющий измерять внутреннюю пропускную способность системы.

Одним из наиболее важных понятий кибернетики является понятие «черного ящика» (глава 6). Этот «ящик» определяет собой механизм управления системой. «Ящик» называют черным, ибо детали его внутренней структуры неизвестны. Принцип «черного ящика» играет важнейшую роль, так как кибернетические системы являются в высшей степени сложными, вследствие чего

структура применяемых в них управляющих устройств не поддается точному определению. Для описания и моделирования кибернетических систем, а также для управления ими требуется метод, который всесторонне учитывает сложность этих систем. Поведение «черного ящика» исследуется путем выявления логических и статистических связей между информацией, поступающей на вход «ящика», и управляющими воздействиями на его выходе.

Итак, в этих пяти главах решаются следующие задачи: определяются важнейшие факторы, связанные с проблемой управления, являющейся предметом исследования кибернетики; выясняется истинная природа управления, отличная от общепринятого содержания, вкладываемого в это понятие; кратко рассматриваются основные методы, используемые кибернетикой в качестве инструмента исследования, и, наконец, вводятся и поясняются некоторые понятия и термины, требующиеся для дальнейшего изложения материала.

## Глава 2

### СИСТЕМЫ КАК ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Управление есть неотъемлемое свойство любой системы. Здесь в слово «система» вкладывается смысл, отличный от того, в котором его употребляют директор предприятия или азартный игрок. Под этим термином мы будем подразумевать *взаимосвязь* самых различных элементов. Таким образом, все, состоящее из связанных друг с другом частей, мы будем называть системой. Так, например, игра в бильярд представляет собой систему, в то время как один бильярдный шар не является системой. Автомобиль, ножницы, экономика, язык, слуховой аппарат, квадратное уравнение — все это системы. Их можно считать совокупностью отдельных элементов и частей, но осмыслить сущность систем можно только тогда, когда связи между элементами и частями, динамические взаимодействия всей системы становятся объектом исследования.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ

Заметим прежде всего, что определение любой конкретной системы является произвольным. Вполне обоснованно ножницы можно назвать системой. Однако более сложная совокупность элементов, включающая, например, работницу, режущую что-нибудь ножницами, также является подлинной системой. В свою очередь, работница с ножницами представляет часть более крупной системы производства какого-либо изделия и т. д.

По существу, вся вселенная состоит из множества систем, каждая из которых содержится в более крупной системе подобно множеству пустотелых кубиков, вложенных друг в друга. Так же, как всегда, можно представить себе более обширную систему, в которую входит данная, всегда можно выделить из данной системы более ограниченную. Пару ножниц, о которой мы только что упоминали, можно считать минимальной системой. Однако посмотрим, что получится, если сломать винт, соединяющий лезвия, и рассматривать одно лезвие. Исходя из старой точки зрения, это уже не система, а один безжизненный ее обломок. Действительно, одно лезвие уже не представляет систему для резания. Но, положив лезвие под микроскоп, мы увидим, что оно является сложной системой компонент, взаимодействующих друг с другом особым образом, определяемым, например, температурой, которую имеет лезвие. Элементами этой системы являются различные разновидности зерен стали. Однако если мы возьмем одно из них, то можно обнаружить, что оно, в свою очередь, содержит некоторую систему, в данном случае атомную систему, обладающую определенными свойствами. Основной вывод из всех этих рассуждений сводится к тому, что при стремлении исследовать все воздействия, влияющие на какой-либо единичный материальный объект, мы должны определить его как часть некоторой системы. Эта система является системой в силу того, что она состоит из взаимосвязанных частей и в определенном смысле представляет замкнутое целое. Однако объект, который мы рассматриваем, безусловно, является частью ряда таких систем, каждая из которых, в свою очередь,

представляет подсистему, входящую в ряд более крупных систем. Таким образом, задача строгого определения системы, которую мы хотим исследовать, отнюдь не проста.

Предположим, однако, что нам удалось выделить и описать систему, которую мы хотим исследовать. Изобразим теперь элементы и звенья, составляющие систему, в виде точек на листе бумаги. Связи, действующие в этой системе, можно ввести в такое изображение, соединив точки линиями. При этом некоторые точки могут оказаться соединенными со всеми остальными точками, но в ряде случаев одна точка может соединяться только с еще одной точкой, принадлежащей данной системе. Теперь мы получили возможность рассматривать систему как некоторого вида цепь, в которой нас интересует одно свойство, определяемое типом соединения линий. Вполне возможно, что тип соединения линий будет меняться во времени, ибо части системы взаимодействуют друг с другом внутри системы в процессе выполнения ею возложенных на нее функций. Природа и объем управления, свойственные данной системе, обнаруживаются в поведении соединений, входящих в цепь, которой мы ее изобразили.

Таким образом, задача строгого научного исследования любой системы характеризуется рядом особенностей. Рассмотрим систему, состоящую из  $n$  элементов. Если не считать их системой, то для выяснения природы этих элементов придется выполнить  $n$  отдельных исследований. Однако, коль скоро мы начинаем считать это множество элементов системой, перед нами возникает задача исследования не только самих  $n$  элементов, но также и  $n(n-1)$  связей между ними. (Отметим попутно, что необходимо исследовать именно это число связей, так как связь  $A$  с  $B$  не обязательно определяет связь  $B$  с  $A$ .) Возьмем для примера систему, состоящую только из семи элементов. Внутри такой системы существует сорок две связи. Если определить состояние системы видом цепи, в которой каждая из этих связей реализована или отсутствует (что, вообще говоря, не является достаточно исчерпывающим описанием этих связей), то число различных состояний, в которых мо-

жет находиться система, составляет  $2^{42}$ . Это фантастически большое число, превышающее  $4 \cdot 10^{12}$ .

Это обстоятельство является основной, а также и формальной причиной, обуславливающей сложность и необычность задачи строгого и полного исследования систем. Система, находящаяся в динамическом режиме, т. е. функционирующая система, может переходить из одного состояния в другое в течение любого интервала времени. Естественно, что для оценки поведения такой системы необходимо провести огромный объем исследований. Но проблема управления любой системой может быть правильно осмыслена только на основе именно такого подхода.

Для дальнейшего изложения предмета нам необходимо ввести несколько новых терминов. Линии, изображающие цепь нашей системы, являются, по существу, ее *связями*. Состояние этих линий в любой данный момент времени отражает количество *информации*, содержащейся в системе. Структура связей и характер информации, проходящей по ним к одному из элементов системы, определяют в любой момент времени, находится ли данный элемент в заданном состоянии или нет.

Если представить систему в виде электрической цепи, то наличие или отсутствие энергии в отдельных частях сети связей будет представлять собой информацию, поступающую в рассматриваемые нами элементы, что обуславливает соответственно их включение или отключение. Происходящий в такой системе процесс является в своей основе процессом *принятия решений*. Если объектом, к которому поступает различная информация, является руководитель предприятия, то он наверняка примет какое-либо решение. Если же он ничего не сделает, то, не выполнив возложенных на него обязанностей, он все-таки, по существу, просто решит не принимать никакого решения. Подобным же образом, используя несколько необычный термин, можно утверждать, что содержание информации в цепи, изображающей такую систему, как автомобиль, в любой момент времени будет определять, произошло зажигание в цилиндре или нет. Инженера может поразить употребляемое нами выражение: свеча зажигания «приняла решение» дать искру, но

существо явления заключается именно в этом. Очевидный факт, заключающийся в том, что решения иногда принимаются сознательно, а иногда бессознательно, не должен вносить никакой путаницы в наши представления. Самое главное состоит в том, что в любом случае производится определенный выбор.

Итак, решения представляют собой события, протекающие в цепи, изображающей систему. Решения поддаются описанию (а это обычно означает, что их в определенном смысле можно предвидеть) в терминах информации, содержащейся в системе, и через структуру связей. Тем не менее в рамках того определения природы систем, которое было сформулировано, можно усмотреть такое широкое разнообразие типов, что никому не будет ясно, о чем же конкретно идет речь, если не разбить все существующие системы на некоторые классы, исходя из какого-либо принципа. При этом нужно сразу подчеркнуть, что в реальной действительности системы, конечно, не объединяются в естественные группы, удобные для кибернетического исследования. Однако для формирования исходного пункта всех дальнейших рассуждений нам необходимо провести какую-нибудь, очевидно совершенно произвольную, классификацию систем по определенным признакам.

## ПРОИЗВОЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ

В нашей произвольной классификации систем целесообразно исходить из двух четких критериев. Первым, бесспорно существенным, критерием можно считать степень *сложности* системы. Приняв этот критерий, мы получаем возможность разделить все системы на три класса. Наименее сложные системы, которые мы будем рассматривать, назовем *простыми динамическими системами*. Системы, не являющиеся простыми и отличающиеся разветвленной структурой и большим разнообразием внутренних связей, назовем *сложными системами, поддающимися описанию*. Наконец, мы будем рассматривать системы настолько сложного вида, что хотя их и можно называть сложными, но точно и подробно опи-

сать их уже нельзя. Мы будем называть такие системы *очень сложными*.

Вторым существенным критерием, на котором основывается наша классификация, является различие между *детерминированными* и *вероятностными* системами. Эти мудреные определения можно очень просто пояснить. Детерминированной системой следует считать систему, в которой составные части взаимодействуют точно предвидимым образом. При исследовании детерминированной системы никогда не возникает никакой неопределенности. Если задано предыдущее состояние системы и известна программа переработки информации, то, определив динамическую структуру системы, всегда можно безошибочно предсказать ее последующее состояние. Напротив, для вероятностной системы нельзя сделать точного детального предсказания. Таковую систему можно тщательно исследовать и установить с большой степенью вероятности, как она будет вести себя в любых заданных условиях. Однако система все-таки остается неопределенной, и любое предсказание относительно ее поведения никогда не может выйти из логических рамок вероятностных категорий, при помощи которых это поведение описывается. Швейная машинка является детерминированной системой: вы поворачиваете ручку, и игла поднимается вверх и опускается вниз. Собака в большинстве случаев ведет себя как вероятностная система: вы протягиваете ей кость, и вполне вероятно, что она подойдет к вам, даже в высшей степени вероятно; однако не исключена возможность, что она вместо того, чтобы подойти к вам, внезапно убежит прочь.

Чрезвычайно важно правильно осмыслить природу различия между детерминированными и вероятностными системами. Подлинно научное обоснование того, является ли это различие принципиальным и должно ли оно быть принято в качестве аксиомы, отсутствует, хотя некоторые философы заявляют, что им это известно. Существо проблемы сводится к тому, является ли вероятностная система в действительности детерминированной, но не понятой нами до конца. Очевидно, что при достижении исчерпывающего познания вселенной вероятност-



ные системы исчезнут, поскольку все можно будет точно предсказать, исходя из известных причинно-следственных связей. Некоторые философы считают это утверждение аксиомой. Другие (включая автора) полагают, что оно лишено всякого смысла. Однако эта проблема сугубо философская и не имеет никакого отношения к существу излагаемого предмета. Интересующая нас природа различия выводится нами эмпирически: мы принимаем в качестве экспериментально устанавливаемой истины, что одни системы мы в состоянии описать таким образом, *как будто* они являются детерминированными, в то время как другие мы можем описать только так, *как будто* они являются вероятностными. Иногда одну и ту же систему требуется описать различным образом в различные периоды времени в зависимости от того, какая особенность системы нас интересует. Так, например, «вероятностная» собака превращается в «детерминированную», если рассматривается ее чесательный рефлекс.

Приняв два критерия классификации, в соответствии с которыми мы разделили сначала все системы по первому критерию на три класса (простые, сложные и очень сложные), а затем по второму — на два (детерминированные и вероятностные), мы получаем в итоге систему классификации, состоящую из шести категорий. Рассмотрим вкратце особенности каждой категории.

**Простой детерминированной системой** является система из небольшого числа элементов, имеющая небольшое число внутренних связей, которая характеризуется вполне определенным динамическим поведением. Примером такой системы может служить оконная задвижка. Если приложить усилие к ручке, то задвижка выходит из гнезда — вот и все описание системы. Аналогично игра в бильярд при условии, что *она соответствующим образом определена*, принадлежит к системам этого класса. Исходя из определения, бильярд представляет динамическую геометрическую систему весьма простого вида. Она полностью детерминирована, ибо любой удар дает вполне определенный результат. Эта система становится вероятностной только в том случае, если ее преобразовать для описания реальной игры. Теперь недостатки стола, шаров и киев, не говоря уже

об искусстве игроков, вносят настолько много не поддающихся учету факторов, что система становится вероятностной.

Столь же осторожный подход требуется при оценке третьего примера простых детерминированных систем, который мы берем из сферы промышленного производства. К классу простых детерминированных систем можно отнести систему размещения станков в механическом цехе, к которой можно подойти, исходя из требования обеспечения движения материалов по определенным маршрутам. В рамках такой постановки задачи можно минимизировать расстояния, которые должны проходить материалы в процессе обработки. Однако если нужно исследовать реальные процессы, происходящие при движении материалов, то система сразу становится вероятностной. Этот пример аналогичен примеру игры в бильярд. Абстрактная система является детерминированной, но она теряет это свойство, как только на систему накладываются влияния реальной действительности.

Подобные рассуждения справедливы и в случае, когда мы переходим к рассмотрению **сложных детерминированных систем**. Вместо оконной задвижки можно исследовать электронную вычислительную машину. Ни один человек, кому довелось увидеть внутреннее устройство хоть одной такой машины, не решится назвать ее простой. И действительно, это весьма сложный механизм. В то же время он полностью детерминирован. Вычислительная машина выполняет только те операции, которые ей предписаны. Если же ее поведение не полностью определено заранее, то это означает, что машина функционирует неправильно. Таким образом, современная стандартная электронная вычислительная машина (однако, пожалуй, не та машина, которая появится в кибернетическом будущем) представляет собой прекрасный пример сложной детерминированной системы. В качестве второго примера систем этого класса можно вновь взять бильярдный стол, увеличив его мысленно до космических размеров. Рассмотрим общее поведение видимой вселенной. Поиски «законов», действующих в этой системе, были настолько успешными, что наблю-

даемые движения небесных тел можно считать вполне определенными. Если ученый обнаруживает в этой области какую-либо неопределенность, он просто считает, что имеется пробел в знаниях, и стремится его восполнить. Небольшие отклонения в движении небесных тел по орбитам отнюдь не приписывают вероятностному характеру этого движения. Напротив, эти отклонения служат основой для построения новых космологических гипотез. Такой научный метод является оправданным только в случае, когда систему, принятую в качестве объекта исследования, можно считать детерминированной.

Обращаясь вновь к сфере промышленного производства за третьим примером сложных, но детерминированных систем, мы можем рассмотреть автоматизированный завод — «автоматическую» систему. Мы снова имеем сложную систему. И снова любое отклонение от строго предписанного образа действий, скажем в линии транспортных машин, считается неисправностью или даже аварией. Таким образом, эта система регулирования автоматична, детерминирована.

Перейдем теперь к рассмотрению тех же уровней сложности для случаев, когда системы, определяемые этими уровнями, не детерминированы. Прежде всего, отметим, что такая вещь, как **простая вероятностная система**, представляет собой вполне реальный факт. Возьмем, например, подбрасывание монеты. Эта чрезвычайно простая система в то же время в высшей степени неопределенна. Ее можно описать при помощи двоичного процесса решения, характеризуемого равной вероятностью двух различных результатов. До сих пор в качестве вторых примеров мы брали системы, характеризующиеся движением входящих в них элементов в пространстве. Однако коль скоро мы обратились к вероятностным системам, то мы можем рассмотреть в качестве второго примера *живой организм*. Для иллюстрации «простых» систем можно взять поведение медузы, рассматривая ее в целом. Медуза — чрезвычайно простой организм, но ее движения даже в совершенно неподвижной воде нельзя предсказать иначе, как пользуясь аппаратом теории вероятностей. (Отметим попутно, что с точки зрения биохимии даже медуза является очень

сложной системой. Поэтому всегда необходимо точно определять, какую сторону системы мы исследуем.)

Сохраняя наш прежний принцип заимствования третьего примера из области производства, мы можем далее рассмотреть систему статистического контроля качества продукции предприятия. Эта система представляет собой общеизвестный метод последовательной проверки изделий, например размеров каких-либо деталей, изготавливаемых на станках. В ходе проверки измеряются только предельные размеры, причем отбор деталей для проверки производят, исходя из степени риска отбраковки. Такая система, безусловно, отличается своей простотой, и в то же время целесообразность ее применения определяется именно присущей ей вероятностной природой.

Далее мы переходим к **сложным вероятностным системам** и к первому физическому примеру таких систем. Возьмем запас каких-нибудь материалов или изделий. Запас может представлять собой товар на полках магазина или на складе, буферную продукцию между двумя производственными процессами или, наконец, резерв, хранимый на случай аварии. Этот запас, таким образом, является физической системой: изделия или материалы поступают и направляются на хранение, возникает потребность в хранящихся материальных ценностях, и они извлекаются из запаса. Насколько далеко можем мы зайти, описывая все это как систему? Можно с полной уверенностью ответить на этот вопрос, что содержание такой системы достаточно сложно, ибо как процесс поступления материалов или изделий на хранение, так и процесс извлечения их из запасов (или процесс обслуживания запасом потребителей) описываются при помощи аппарата математической статистики. Другими словами, эти процессы являются случайными по самой своей природе, но в то же время они полностью поддаются математическому описанию. Даже в случае, когда динамика системы значительно усложнена, т. е. система имеет очень много входов (запасы пополняются из многих источников) и много выходов (запасами пользуется большое число потребителей), ее все-таки следует отнести к рассматриваемому классу.

Во втором примере сложных вероятностных систем мы вновь обращаемся к процессу в живых организмах. Возьмем в данном случае условный рефлекс у животного, который представляет собой систему возбуждения и реакции, связанную нервным механизмом и управляемую механизмом удовольствия и боли. И на этот раз мы сталкиваемся с достаточно сложной системой, результаты действия которой в общем виде (но не в деталях) можно заранее предсказать, используя статистические методы.

Третьим примером, из сферы промышленности, является понятие прибыльности. Система для получения прибыли в области промышленного производства принципиально представляет собой сложную вероятностную систему. Вносится какое-либо изменение в процесс производства, которое при ограниченном рассмотрении может представлять собой простой детерминированный акт, направленный на увеличение прибыли за счет изменения производственного процесса какого-нибудь одного изделия. Однако почти наверняка это изменение будет затрагивать также и более крупную систему, принадлежащую к рассматриваемому классу. Внесение этого изменения оказывает влияние во всех направлениях. Результаты этих изменений, а также изменения всей системы в целом до ее перехода в новое состояние равновесия невозможно точно предвидеть. Конечный результат, как надеется руководство, должен свестись к повышению прибыльности. Однако если такая задача ставится перед ученым и он считает, что ее можно решить, то единственным средством решения является теория вероятностей.

Пока что мы рассмотрели четыре из шести классов систем в соответствии с принятой классификацией, но до сих пор не упоминали об очень сложных системах, которые в нее входят. Напомним, что мы определили такие системы как *настолько* сложные, что, по существу, они не поддаются описанию. В связи с этим мы можем утверждать, что класс **очень сложных детерминированных систем** является пустым. И действительно, любую полностью детерминированную систему, например рассмотренную выше астрономическую систему, можно в

конце концов подробно описать. Какой бы сложной ни стала система, принципиально ее можно точно определить. Таким образом, мы можем утверждать, что среди детерминированных систем нет ни одного члена, принадлежащего классу очень сложных систем.

Совершенно иная картина наблюдается, однако, в отношении класса **очень сложных вероятностных систем**. Так, например, экономика государства настолько сложна и настолько случайна, что было бы наивным считать, что ее когда-либо удастся полностью описать. То же самое можно сказать и о человеческом мозге, если взять второй пример из области живых организмов. Более того, мозг представляет собой объект, поразительно недоступный для исследования. Если он мертв, то не является более динамической системой (по этой причине его и считают мертвым), не говоря уже о том, что после смерти человека мозг очень быстро распадается. Хирургическое исследование не дает ощутимых результатов и сопряжено с большим риском. Результаты, получаемые на основании психиатрических и энцефалографических исследований механизма работы мозга, накапливаются очень медленно.

Пожалуй, самым ярким примером *промышленной* системы такого рода является предприятие или фирма. Я всегда считал, что фирма как будто объединяет в себе характерные черты двух предыдущих примеров. Очевидно, что фирма не является живым организмом, но в то же время ее *поведение* очень напоминает поведение такого организма. Для фирмы совершенно необходимо вырабатывать методы, обеспечивающие сохранение существования в условиях меняющейся среды. Она вынуждена приспосабливаться к экономическому, финансовому, социальному и политическому окружению и должна обладать способностью к обучению на основе опыта.

Приведенная, пусть весьма произвольная, классификация помогает понять кибернетические задачи, связанные с описанием систем и управлением ими. Она придает этим задачам практическую направленность, ибо принятые за основу классификации критерии отражают научный подход к исследованию каждого класса систем.

Ниже для наглядности описанные нами примеры приводятся в виде таблицы. Однако следует вновь сделать предупреждение о том, что предложенная система классификации является произвольной. Это означает, что границы, разделяющие отдельные классы, следует представлять себе очень расплывчатыми, в виде областей, в которых лежат близкие по характеру системы.

Системы	Простые	Сложные	Очень сложные
Детерминированные	Оконная задвижка	Цифровая электронная вычислительная машина	
	Проект механических мастерских	Автоматизация	
Вероятностные	Подбрасывание монеты	Хранение запасов	Экономика
	Движение медузы	Условные рефлексы	Мозг
	Статистический контроль качества продукции	Прибыль промышленного предприятия	Фирма

Итак, первой важной чертой предложенной классификации, в рамках которой будут в дальнейшем излагаться основы кибернетики, является группировка систем в соответствии со свойственной им природой управления, а следовательно, и в соответствии с научными методами исследования, которые к ним применимы. Фигурально выражаясь, отрицательная ценность такой классификации состоит в том, что она разрушает представление о возможности правильной классификации систем на основе современных традиционных взглядов на принцип деления научных дисциплин. Если настаивать на подходе к проблеме классификации с позиций

классических университетских принципов, то результат коренным образом отличался бы от тех выводов, к которым мы пришли. В этом случае мы получили бы класс *формальных* систем, таких, как математика и логика, класс *механических* систем, рассматриваемых в технике, класс *физических* систем, в который входят также химические и термодинамические процессы, и класс *живых* систем, принадлежащий многим областям биологии. Любая система классификации, построенная на отличной от выбранной нами основе, например классификация, базирующаяся на структуре современной науки, которую мы только что привели в качестве иллюстрации, безусловно, является вполне закономерной. Можно предложить еще очень много столь же закономерных и полезных схем. Принятая нами классификация, естественно, вызовет нарекания со стороны тех ученых, чей кругозор ограничен одной отраслью науки. А все кибернетики, так же как и сам Винер, работают в области, принадлежащей различным отраслям науки, так как предметом *их* исследования является управление вообще.

В то же время проблемы управления в каждом из пяти классов систем, которые мы рассмотрели, отличаются по степени сложности, и специалиста по кибернетике они интересуют далеко не в равной мере. Если говорить о промышленном производстве, то техника быстро достигла такого уровня развития, что успешно решает задачи управления как простыми, так и сложными детерминированными системами. Если же учесть прикладную статистику, то задачи управления простыми вероятностными системами также можно считать в принципе решенными. Только тогда, когда мы переходим к двум последним классам, т. е. к сложным и очень сложным вероятностным системам, мы попадаем в подлинно интересующую нас область исследования. При этом первый из указанных классов представляет область исследования теории операций, а второй — кибернетики.

Область исследования теории операций рассмотрена во многих работах. В работе [2], которую можно считать дополнением к этой книге, я также рассмотрел этот вопрос и постарался показать, как ряд методов, объеди-



ненных общим названием теории исследования операций, в определенном смысле послужил источником возникновения кибернетики, являющейся подлинно самостоятельной наукой. Другая моя работа [3] содержит анализ, показывающий связь методологий, принятых в теории исследования операций и кибернетике. Однако для целей настоящей книги достаточно того, что вполне четко очерчена специфическая область кибернетики в общей картине исследования систем.

### Глава 3

## СУЩНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ

В предыдущей главе были рассмотрены не строгие системы категорий, а скорее общие перспективы. Поэтому сейчас нужно, прежде всего, ясно отметить, что подлинной областью исследований кибернетики является область очень сложных вероятностных систем. Специалисту по кибернетике известно, что в связи с этим от него требуется разработка принципиально новых методов и развитие новых идей, ибо между кибернетическими системами и, к примеру, «сложными детерминированными» системами имеется качественное различие. Это замечание отнюдь не следует считать тривиальным. Многие, по-видимому, воображают, что задачи любой сложности в конечном счете будут решены все более крупными вычислительными машинами, если удастся создать достаточный объем памяти, повысить быстродействие выводных печатающих устройств и обеспечить неограниченное число программ. Это глубокое заблуждение. Такой подход направляет нас по совершенно неправильному пути.

Во-вторых, из уже рассмотренных примеров вытекает особая роль биологических систем в области исследований кибернетики. Факты вещь упрямая: эффективность, связанность биологической системы как системы несравненно выше, чем любой неживой системы. Рассмотрим пример.

Если бы кто-нибудь совершенно неожиданно бросил в меня мяч, то вполне вероятно, что мне удалось бы его

поймать. Однако для этого мое тело должно принять участие в чрезвычайно большом числе событий. Все мое существо должно превратиться в «машину для поимки мяча». Я становлюсь огромной информационной сетью, осуществляющей тысячи тысяч логических функций. Мои сознательные акты сводятся к тому, что я внезапно вижу летящий на меня мяч, решаю поймать его и выполняю свое решение. Больше почти ничего не проникает в мое сознание. Но посмотрим, что в действительности происходит внутри машины для поимки мяча. Универсальная зрительная сканирующая система, ведущая непрерывное наблюдение, прежде всего обнаруживает летящий мяч. Далее в результате сложного комплекса умозаключений в мозгу быстро рождается представление о том, что происходит, и этот же комплекс приводит в действие волевую систему. В результате волевого акта (который сам по себе представляет еще не понятый психологический процесс) вступают в строй особые следящие зрительные механизмы и начинается другой комплекс двигательных актов. Каким-то образом мои пальцы (которые должны схватить мяч в строго определенный момент) вовремя следует поставить на пути движения мяча. Для этого очень часто может потребоваться резкий бросок всего тела в воздух. Чтобы успешно выполнить эту задачу, не упав лицом на землю, я вынужден соответствующим образом менять положение своего тела, выбросив руки и ноги совершенно определенным образом, чтобы избежать при этом потери равновесия. Эти движения, в свою очередь, требуют осуществления особых физиологических актов: я должен вдохнуть большие порции кислорода, мой мышечный тонус должен измениться, общее «внимание» всей нервной системы придет в новое состояние равновесия и т. п. Любопытно, что, пожалуй, можно было бы написать целый учебник о том разнообразии актов, которые должны совершиться в этой машине для поимки мяча в течение нескольких секунд. Лишь ничтожно малое число этих актов достигает уровня сознательной деятельности. Возможно, осознается не более одного из миллионов решений, принимаемых внутри машины.

Эти отрезвляющие соображения наглядно демонстрируют, почему человек столь эффективен, как кибернетическая система, в сравнении, допустим, с таким примером, как завод. Быстрота реакции, суммирование информации, способность строить достаточно надежные выводы, основываясь на чрезвычайно убогом объеме информации, — таковы лишь некоторые из отличительных свойств живых организмов, являющихся столь замечательными по сравнению со свойствами систем, созданных руками человека. Однако самый удивительный и поучительный урок дает нам содержание самого понятия управления в живых организмах.

Следует признать, что все наше представление об управлении наивно, примитивно и находится во власти почти фатального представления о причинности. Управление большинству людей (как это ни прискорбно для развитого общества) представляется процессом грубого принуждения. Так, например, считают, что полицейский, регулирующий уличное движение, осуществляет «управление». Однако на самом деле он просто пытается принять ответственное решение, имея явно недостаточную информацию и принципиально используя метод принуждения (ибо он легализован законодательством).

Рассмотрим примерно аналогичную, хотя и несколько более сложную ситуацию, которая возникает при высадке пассажиров с только что прибывшего парохода. Пароход приближается к причалу, пассажиры готовы к высадке, служащие порта ожидают прибытия судна. Вся эта ситуация представляет собой систему — машину для высадки пассажиров. Что же происходит на самом деле? Начинаются шум и беспорядок, продолжающиеся долгое время. Во время всей этой неразберихи пассажиров толкают то туда, то обратно, их багаж тащат, их терпение все больше и больше истощается. Задержавшись на длительное время, в течение которого пассажиры испытывают большие неудобства и много волнений, они наконец отправляются дальше на поездах, отходящих из порта по расписанию, которое подчас не имеет ничего общего с расписанием, указанным в путеводителе. Бедняги пассажиры философски покорно воспринимают все происходящее, считая, что таковы черты

современной жизни. Они верят в то, что ими «управляют». Такое впечатление, возможно, создается потому, что люди видят одетых в официальную форму чиновников, отдающих распоряжения. В этом примере невозможно обнаружить даже отдаленные черты, свойственные управлению, осуществляемому в природе.

Замечательной особенностью естественных, и в первую очередь биологических, механизмов управления является то, что они представляют собой гомеостаты. Нужно обязательно правильно понять, что такое гомеостат. Термостат, например, безусловно, представляет собой машину, предназначенную для поддержания температуры в заданных пределах. *Гомеостат* воплощает в себе расширение понятия такой машины, будучи устройством управления, предназначенным для поддержания значений любой переменной (совершенно не обязательно температуры) в заданных пределах. Классическим примером из области биологии является механизм гомеостазиса температуры крови человека. Общеизвестно, что температура человеческого тела меняется очень незначительно, хотя человек может переходить из холодильника в котельную. Аналогичный механизм гомеостазиса повсеместно наблюдается в природе. Возьмем совершенно иной пример и рассмотрим гомеостазис, управляющий численностью животных в природе. В природе, например, достаточное число гусениц для прокормки птиц (которые, поедая их, тем самым ограничивают численность гусениц) и для уничтожения растительности (что ограничивает ее развитие), а также для появления достаточного числа бабочек и мотыльков. В то же время мы обычно не наблюдаем нашествия гусениц. Таким образом, система, очевидно, является гомеостатической, хотя нити механизма обеспечения пищей настолько запутаны, что точные связи трудно обнаружить и описать. Тем не менее в некоторых частных случаях удается достаточно изолировать систему для всестороннего исследования. Так, например, распространение кактуса опунция, начавшего вытеснять другую растительность в Австралии, было приостановлено кактусовой молью (*Sactoblastis*), которой в дальнейшем начало не хватать пищи. Таким образом, в настоящее время эти раститель-

ный и животный виды взаимно регулируют свою численность.

В гомеостате управляемая переменная поддерживается на требуемом уровне механизмом саморегулирования. Не имеет смысла утверждать, что значение этого уровня должно быть неизменным. За исключением всего нескольких замечательных физических констант, отражающих собой логическую бесконечность вселенной, величины, встречаемые в природе, как правило, меняются. Однако самым существенным для биологической системы управления является то, что эти изменения не выходят за рамки допустимых физиологических пределов. Это означает, что управляемая величина всегда находится на требуемом среднем уровне с точки зрения принятой степени аппроксимации и что в системе имеется компенсирующий механизм, который возвращает эту величину к среднему значению, когда она начинает от него отклоняться. На примере гомеостазиса мы сталкиваемся с важнейшим принципом саморегулирования.

В настоящей книге мы не можем вдаваться в подробное исследование понятия гомеостазиса. Для нас вполне достаточно, если четко выяснено различие между обычным пониманием термина «управление», в которое вкладывается понятие принуждения, и тем пониманием, которое нам нужно, т. е. саморегулированием. Осмыслив эту третью отличительную особенность кибернетических систем, мы тем самым получаем первое общее представление о кибернетике как науке. Итак, мы обсуждаем *очень сложные вероятностные системы, имеющие гомеостатическую природу*. Если забыть о существовании окружающих нас различных биологических систем, которые соответствуют этому определению и примером которых мы сами являемся, то весь предмет исследования кибернетики становится довольно расплывчатым. Действительно, в сфере производства или в обществе трудно обнаружить систему, отвечающую всем трем фундаментальным критериям кибернетики, выделенным выше курсивом. В связи с этим в отношении технической кибернетики напрашивается простой вывод, который заключается в том, что промышленные системы управления (при условии, что они достаточно эффек-

тивны) должны строиться как кибернетические системы. Выводы, вытекающие из такого радикально нового взгляда, нетрудно сделать, коль скоро он в полной мере усвоен. С этими выводами мы будем сталкиваться на протяжении всей книги.

Пока что можно сделать общее заключение о том, что кибернетическая система представляет собой не разрозненное скопление отдельных элементов, а является прочно связанной информационной сетью. Отличительной особенностью любой кибернетической системы можно считать полную бессмысленность рассмотрения ее иначе, как единого организма. Так, например, в обсуждении направления развития одного из цехов крупного завода, безусловно, имеется определенный смысл, так же как и в сравнении этого направления с направлением развития другого цеха. Столь же обоснованно можно в дальнейшем сравнивать каждое из указанных направлений с совершенно отличным комплексом развития, обнаруживаемым в результате исследования конъюнктуры рынка среди потребителей фирмы, которой принадлежит данный завод. Однако совершенно бессмысленно выяснять, в каком направлении движется чья-нибудь левая нога, сравнивать его с другим направлением, в котором движется, например, правая рука, и, наконец, сопоставлять эти движения с сенсорной информацией, поступающей в организм человека через органы чувств. Предположим теперь, что завод представляет собой высокоорганизованное предприятие, поведение которого оптимизировано на основе методов теории исследования операций посредством математико-кибернетической модели. В этом случае завод следует рассматривать как единый организм, чего и требует кибернетика. Поэтому более не имеет смысла обсуждать *локальные* тенденции. И в самом деле, именно локальный подход к решению задач, характерный для энергичных и квалифицированных руководителей отдельных цехов, управлений или отделов, который приводит к частной оптимизации соответствующих подразделений, как показано специалистами теории исследования операций, часто вреден для жизнедеятельности всего организма в целом.

Если мы настаиваем с самого начала на необходимости проведения аналогии между биологическими моделями и промышленными предприятиями, то нам могут сразу задать такой вопрос: как можно рассматривать взаимодействие людей и машин, исходя из принципа, что они образуют единую, неделимую систему высшего типа? Ключом к пониманию такой возможности является исследование типов связей, объединяющих такие системы. Мы уже достаточно убедительно показали, что системы следует рассматривать не с точки зрения их внешнего облика, а с точки зрения формальных структур, как информационные цепи, реализующие множества функций выбора. Конь и наездник, например, представляются совершенно автономными системами, по крайней мере для обычного наблюдателя. Марсианин мог бы сказать, что для создания более высокой, неделимой системы, которую можно назвать «конь — наездник», требуются хирургические операции, в результате которых два организма связываются физиологически. Но такое мнение, очевидно, абсурдно. Мы знаем, что «машина, предназначенная для поддержания взаимодействия между наездником и конем», может быть построена без каких-либо физиологических связей на основе процесса обучения. Эти две автономные системы можно обучить реагировать друг на друга, т. е. объединить их с точки зрения информации.

Этот пример отражает накопленный человеком повседневный опыт, но он не ограничен одушевленными системами. Действительно, человек и двигатель, которым он управляет, могут быть объединены в машину, предназначенную для выполнения определенных функций. Двигатель конструируется таким образом, что он реагирует на определенные действия человека (в случае автомобильных и авиационных двигателей диапазон реакций довольно ограничен, однако нет никаких причин, исключающих возможность значительного расширения этого диапазона), а человека обучают реагировать на работу двигателя, и он обычно считает, что «командует» двигателем. Таким образом, идея формального рассмотрения кибернетических систем, независимо от их частного материального воплощения, является весьма

плодотворной. Она сметает барьеры многих установившихся понятий, а также открывает глаза на то, каким образом наше образование, опыт и, особенно, образ выражения мыслей людей двадцатого века заставили нас поверить в то, что некоторые классы машин являются в определенном смысле «невозможными». Мы сразу начинаем понимать, почему идея создания мыслящих, или обучающихся, машин была встречена таким общим негодованием, ибо мы просто сталкиваемся с псевдорелигиозным убеждением, утверждающим, что некоторые виды деятельности присущи только одухотворенным существам.

Эти соображения будут развиты более подробно в дальнейшем. Пока что нас интересует главным образом общее развитие кибернетических взглядов. Чтобы закончить этот общий обзор, нам остается теперь разрушить столь тщательно возведенное только что здание классификации систем. Напомним, что мы все время подчеркивали произвольный характер предложенной классификации, польза которой сводится только к тому, что она служит средством выявления общих рамок предмета нашего исследования. Теперь уже ясно, что мы применяем термин «*машина*» в качестве названия любой целесообразной системы. И хотя, вполне очевидно, в этом смысле могут существовать машины, функции которых не выходят за пределы любого из пяти произвольных классов систем, фигурирующих в нашей классификации, мы не можем идти дальше, не рассмотрев, пожалуй, самый важный класс машин в сравнении с уже известными нам классами. Этот класс состоит из «машин, предназначенных для перевода машин из одного класса в другой».

Любая машина, первоначально определяемая как принадлежащая одному из пяти условных классов, может быть превращена в другую машину, принадлежащую иному классу, путем преобразования. Например, простая детерминированная система может быть преобразована в сложную детерминированную систему весьма просто. Для этого обычно достаточно в необходимой степени увеличить ее. Так, достаточно большое число шкивов можно объединить в такую огромную систему,



что ее механическое поведение будет весьма трудно понять, руководствуясь только интуицией. Действительно, если ко входу такой системы приложить усилие, то поведение груза на входе системы очень трудно предвидеть. Чтобы обнаружить результат, требуется применение сложных законов механики. Процесс преобразования систем из одного класса в другой можно описать формально (как будет показано в дальнейшем), ибо можно разработать особую логику для исследования таких преобразований.

Однако, помимо преобразований систем, осуществляемых по нашей воле, они обнаруживают тенденции к определенному поведению и при отсутствии сознательного вмешательства человека извне. Наглядную аналогию для одной из таких тенденций можно обнаружить во втором законе термодинамики, который утверждает, что всегда имеет место процесс «упорядочения», связанный с понятием *энтропии*<sup>1)</sup>. Этот процесс можно объяснить, не вдаваясь в подробности, как тенденцию любой системы приходить в состояние равновесия, характеризующееся равномерным распределением энергии. Исчезновение локальных сгустков энергии измеряется увеличением энтропии. При максимальной энтропии энергия в данной системе распределена равномерно. В соответствии с такой моделью «порядок» более естествен, чем хаос. Такова причина, объясняющая удобство исследования кибернетических систем со свойственной им тенденцией перехода в устойчивое или упорядоченное состояние посредством саморегулирования через энтропию — понятие, которое заимствовано из термодинамики

<sup>1)</sup> Автор дает толкование энтропии, противоречащее общепринятым взглядам, которое он обосновывает предлагаемым им языком для описания реального мира. Идеи автора о «порядке и хаосе» являются весьма спорными и требуют специального рассмотрения с научно-философской точки зрения. Более подробно взгляды Ст. Бира по этим проблемам изложены в его выступлении на Первом симпозиуме по исследованию систем. (См. S. Beer, *Under the Twilight Arch. of Dawn — The Mythology of Systems. Research and Design. Proceedings of the First Systems Symposium at Case Institute of Technology*, John Wiley & Sons, New York — London, 1961.) (Прим. перев.)

для выражения одного из важнейших инструментов кибернетических исследований.

Однако системам свойственна естественная тенденция к преобразованиям другого рода, противодействующим термодинамическому процессу «деградации». Когда машина, принадлежащая одному из пяти классов, предоставлена самой себе, то всегда имеется достаточно свободной энергии, чтобы преобразовать ее в более сложную машину (что, например, имеет место в процессах роста и, как правило, эволюции), т. е. внести в машину дополнительные элементы случайного поведения. Последняя тенденция является отчасти свойством самой системы формальной классификации. Выше мы уже отмечали, что игра в бильярд *при условии соответствующего ее определения* является детерминированной. Однако если система предоставлена самой себе и становится реальной игрой, то в ней появляются ошибки и она приобретает вероятностную природу.

Таким образом, говоря о машине, предназначенной для перевода из одного класса в другой, мы просто кратко определяли противоположную тенденцию машины как управляющее воздействие, ведущее к этим естественным преобразованиям. Примером подобной машины может служить, допустим, оркестр. На бумаге оркестр можно описать как детерминированную систему, предназначенную для исполнения музыкальных произведений. Но приведите оркестр в действие и вы увидите, что он обладает естественной тенденцией порождать разнообразие за счет внесения ошибок в интерпретацию музыкальной пьесы отдельными музыкантами. Кроме того, оркестр будет вносить дополнительные элементы случайности в исполнение из-за недостаточной связи между музыкантами. Дирижер (или регулятор) ставит перед собой цель уменьшить сложность управляемой им системы, заставляя примерно восемьдесят пять человек играть так, как будто они являются только определенными знаками, указанными в партитуре. Он стремится также повлиять на вероятность системы, связывая исполнение в единое целое, и при помощи жестов и своего «присутствия» свести к минимуму случайные элементы в игре музыкантов. Капитан футбольной команды тоже

является машиной, предназначенной для преобразования системы в менее сложную и менее вероятностную. Такова же роль руководителя в промышленности.

Итак, наша классификация становится полной только после введения особого класса систем, предназначенных для преобразования изолированных классов. В таком виде она завершает наше предварительное общее знакомство с основными идеями кибернетики. Понимание этих идей позволяет осмыслить кибернетический подход к изучению сложных вероятностных саморегулирующихся систем как единого органического комплекса.

## Глава 4

### УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Мы должны часто пользоваться словом «управление» в ходе последующего изложения. Поэтому я хочу сейчас подчеркнуть, что в дальнейшем это слово будет употребляться в совершенно определенном смысле. Оно будет обозначать не систему принуждения и насилия, каковой обычно считают любую систему управления, а всегда будет иметь широкое значение, которое было раскрыто в предыдущей главе. Короче говоря, термин «управление» будет, как правило, обозначать «гомеостатическую машину, предназначенную для саморегулирования». Здесь, как обычно, термин «машина» определяет целесообразную систему. Поэтому управление, являясь по своей сущности машиной, в то же время является неотъемлемой частью другой машины, предназначенной для выполнения каких-либо иных функций. Исходя из этих принципиальных соображений, можно обнаружить и фундаментальный принцип, лежащий в основе управления. Этот принцип носит название *обратной связи*.

### ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Само выражение «обратная связь» достаточно красноречиво, так что вложенный в него смысл не трудно понять. Однако, как это ни странно, истинное значение механизма обратной связи для систем управления осо-

знается совершенно недостаточно даже теми, кто хорошо знаком с этим понятием. Если бы это утверждение не соответствовало истине, наши системы управления были бы гораздо более эффективными, чем они являются на самом деле. По какой-то непонятной причине мы научились хорошо использовать обратную связь только в определенных машинах: двигателях, артиллерийских орудиях, судах и на некоторых предприятиях. В других областях она почти совсем неизвестна. Отсюда можно сделать вывод, что в идее обратной связи скрыта определенная сложность, которая является препятствием для ее понимания большинством людей, что ограничивает ее широкое применение в экономических, социальных и промышленных системах управления.

Однако системы с обратными связями необходимо создавать. Их создание представляет собой техническую проблему, стоящую перед кибернетиками, так же как разработка конструкций различных машин представляет собой обычную проблему, решаемую инженерами. Нам, возможно, удастся перебросить мост через пропасть, наличие которой трудно объяснить, но которая тем не менее существует между техническими и всеми прочими применениями обратной связи. Мы попытаемся сделать это, постепенно развивая это понятие, начав с простейшего примера, и покажем, что переход от техники в другие области не представляет в действительности сложной проблемы.

Представляется целесообразным ввести понятие **обратной связи** элементарным образом на примере простой детерминированной системы. Поскольку регулятор Уатта обычно считают первым сделанным руками человека механизмом с обратной связью, которая в него сознательно заложена, мы, безусловно, должны начать с этого знакомого всем примера. В течение почти ста восьмидесяти лет этот механизм служит наглядным подтверждением изящества и простоты обратной связи и демонстрирует ее эффективность в регуляторе. В то же время и сейчас можно утверждать, что истинное значение этого изобретения еще полностью не осознано. Маховик парового двигателя вращается с возрастаю-

шей скоростью, вместе с ним также с возрастающей скоростью вращаются рычаги с грузами. Эти рычаги управляют клапаном, через который производится выпуск пара в цилиндр двигателя таким образом, что степень открытия клапана пропорциональна уровню подъема рычагов или, что то же самое, скорости. Следовательно, мы получаем гомеостат, ибо, чем больше двигатель стремится превысить требуемую скорость, тем меньше энергии поступает в него. В то же время при отклонении от заданной скорости в другую сторону приток энергии увеличивается, пока заданная скорость не будет достигнута. Таким образом, заданное значение выходной величины достигается путем саморегулирования: вход двигателя подстраивается его выходом, и оба они приходят в установившееся состояние. Почему же мы все-таки утверждаем, что значение этого простого механизма недостаточно правильно оценено?

Прежде всего, нужно обратить внимание на то, что регулятор с обратной связью ведет себя, почти как одушевленный организм: он всегда внимателен и всегда точно выполняет возложенные на него функции. Любопытно, как в этом отношении он отличается от систем управления другого типа. Начальник тюрьмы, например, которому платят деньги за то, чтобы он обеспечил невозможность бегства заключенных (другими словами, наложил определенные ограничения на переменные, которыми управляет), принимает с этой целью много всяких мер. Однако все его усилия можно в принципе свести на нет. Через тюремные стены перелезают, если стража заснет, тюремщиков подкупают, заключенные совершают побег, переодевшись в чужую одежду. Каким бы совершенным ни был механизм управления, побег из тюрьмы, по крайней мере в принципе, всегда возможен. В то же время при использовании механизма управления с обратной связью нельзя себе представить, чтобы переменные выходили за установленные пределы, кроме случая, когда механизм вышел из строя. Это объясняется тем, что само движение за пределы ограничений вызывает появление управляющего воздействия. Эти два фактора неразрывно связаны. Следовательно, регулятор с обратной связью не может не справиться

с возложенной на него задачей, и уже одно это обстоятельство играет само по себе важнейшую роль.

Но еще более важным является вытекающее отсюда следствие, заключающееся в том, что регулятор с обратной связью гарантирует компенсацию возмущений не только определенного вида, но и любых возмущений вообще. Регулятор с обратной связью, для создания которого не требуется разработки особой, весьма сложной конструкции, реагирует на большое число источников возможных возмущений. В частности, он компенсирует влияние на систему возмущений, причина возникновения которых совершенно неизвестна. В этом как раз и заключается важность принципа обратной связи, поскольку в кибернетике, как было указано выше, мы имеем дело с очень сложными системами, не поддающимися детальному описанию. Чтобы получить возможность управлять такими системами, мы должны предусмотреть управляющий механизм, способный выполнять функции, которые нам не ясны, хотя мы сами строим этот механизм. Именно эти функции и может выполнять регулятор с обратной связью. Отсюда вытекает его важнейшая роль, и этим же объясняется то принципиальное этимологическое значение, которое он был призван сыграть в названии нашей науки. Дело в том, что слово «регулятор» (*governor*) происходит от латинского слова «управляющий» (*gubernator*), которое, в свою очередь, образовано от греческого слова «кибернесий» — «кормчий». Винер и его сподвижники в 1947 году решили дать новой науке название кибернетики. Винер пишет: «Рулевые машины кораблей являются, по существу, первыми наиболее совершенными формами механизмов с обратной связью». В свое время еще Платон пользовался словом «кибернетика», а Ампер позаимствовал его для названия науки об управлении государством, но именно Винер окончательно ввел это непривычное слово в широкое употребление, и ему же принадлежит заслуга в том, что оно так удачно выражает вложенный в него смысл.

Приведенный пример обратной связи в регуляторе Уатта иллюстрирует *отрицательную* обратную связь. Термин «отрицательная» объясняется тем, что рассогла-

сование между заданным и действительным значениями гомеостатического параметра машины (в рассмотренном случае этим параметром является скорость вращения вала парового двигателя) определяется как положительная величина, в то время как действие обратной связи имеет противоположный знак. Однако нередко в управлении используется и *положительная* обратная связь. В этом случае функция управляющего механизма заключается в усилении измеренного рассогласования. Так, например, в тормозных системах с внешним источником энергии применяются устройства, которые реагируют на небольшие перемещения, производимые вручную, и усиливают их до тех пор, пока развиваемое тормозное усилие не становится достаточным для остановки движущейся машины. Эти простые детерминированные системы, объединенные в одно целое (ибо, вообще говоря, машина может быть построена таким образом, что в ней имеется несколько связанных друг с другом обратных связей), способны образовывать *сложную* детерминированную систему. По сути дела, такие структуры используются при решении задач автоматизации.

Но очень важно понять, что эти же принципы применимы для любых систем, в том числе вероятностных, а также систем, лежащих вне области техники. Это соображение можно развить значительно дальше. В пределах детерминированных систем существует много эффективных способов управления, так что обратная связь является только одним из них. Наиболее надежным способом для таких систем является непосредственное воздействие, которое можно использовать лишь при отсутствии случайных возмущений. Для вероятностных же систем обратная связь является единственным действительно эффективным механизмом управления.

Рассмотрим самым беглым образом роль обратной связи в живых организмах, которые по изложенным выше причинам представляют особый интерес для кибернетиков. В данном случае наиболее важно рассмотреть физиологические функции живых организмов, ибо в простейших формах (исходя из самой приближенной гипотезы) их можно считать детерминированными. Только тогда, когда входные и выходные величины начинают

проявлять значительные изменения, мы вынуждены рассматривать их как параметры статистических распределений, а следовательно, считать порождающие их системы вероятностными.

По существу, механическая обратная связь такого типа, который используется в регуляторе Уатта, встречается нам, к примеру, в работе сердца улитки. При сокращении желудочка кровь выталкивается в открытую кровеносную систему, в которой отсутствуют эластичные связи с наружным скелетом улитки (имеющиеся, к примеру, у крабов), могущие заставлять сердце вновь открыться для заполнения кровью. Было высказано мнение, что при сокращении желудочка в околосердечной сумке улитки, т. е. в пространстве, где помещается сердце, возникает вакуум, под влиянием которого очередная порция крови автоматически нагнетается в предсердие. Если это объяснение механизма кровообращения улитки является правильным, то мы имеем детерминированную систему с обратной связью, в которой выход определяет не только величину, но и само действие входа. Аналогичные, но менее явно выраженные механизмы обратной связи управляют пищеварением даже более низших животных. Так, раздражение кишечника дождевого червя увеличивает выделение пищеварительных энзимов, что является примером положительной обратной связи. Этот же цикл можно проследить даже в простейших и микробах.

Переходя к рассмотрению пищеварительных систем у более высоких форм живых организмов, а именно у позвоночных, мы обнаруживаем весьма сложные связи, вызывающие выделение пищеварительных соков за счет обратной связи, реализуемой при помощи разнообразных механизмов: непосредственных физических и химических стимуляторов, гормонов и нервных импульсов, связанных в единую систему, дающую требуемый результат. Выше мы упоминали об условных рефlekсах как примерах сложных вероятностных систем. Прототипом таких систем, безусловно, является павловская собака, у которой выделение слюны обусловлено искусственным раздражителем. В данном случае мы наблюдаем обратную связь, весьма близкую к знакомым нам электриче-



ским обратным связям, ибо слюнные железы управляются исключительно нервной системой.

Эти простейшие физиологические примеры открывают путь к пониманию сложных биохевиористических обратных связей, управляющих положением тела посредством мышечного тонуса, а также всех прочих гомеостатов, функционирующих в теле животного. Когда мы подходим к рассмотрению сознательных действий, как в приведенном выше примере с поимкой мяча, мы начинаем понимать зависимость живого организма от огромного разнообразия и числа взаимосвязанных положительных и отрицательных обратных связей. Первостепенная роль некоторых крупных систем с обратной связью, обнаруживаемых в биологических объектах, уже получила признание в кибернетических исследованиях. Так, например, существует явная аналогия между моей способностью преследовать убегающего преступника, делающего обманные маневры, и способностью управляемого снаряда поражать цель. Однако есть еще очень много подобных примеров, которые до сих пор не исследованы. Каждому, кто хоть немного знаком с функциями эндокринных желез в человеческом организме, должно быть ясно, что жизнь без них была бы невозможна и что огромное число различных заболеваний проистекает из-за нарушения правильной работы этих желез. Более того, обладая знаниями в этой области, можно ясно усмотреть, что промышленному предприятию очень не хватает чего-либо подобного этому чудесному механизму. При этом только ограниченность воображения может помешать распознаванию аналогии между нарушением функций эндокринных желез и некоторыми нарушениями, наблюдаемыми в сфере производства. Таким образом, мы сталкиваемся с иной кибернетической моделью, практическое использование которой уже назрело, пожалуй столь же эффективной, как и модель для поражения цели.

Однако на этой предварительной стадии изложения материала нам не хотелось бы тратить больше времени на физиологические обратные связи, так как вопрос о них уже, очевидно, достаточно ясен. Более целесообразно перейти к двум специфическим иллюстрациям систем с обратной связью, заимствованным из других областей,

в которых важность принципа обратной связи, пожалуй, не осознана. Первый, хотя и простой, из этих примеров позволяет ознакомиться со взглядами, развитыми профессором Тастином, который исследовал экономические системы с позиций признания первостепенной роли обратной связи. Второй пример представляет собой краткое изложение существа работ доктора фон Ферстера, применившего принцип обратной связи для решения проблемы памяти. Этим двум примерам совместно с уже изложенными общими соображениями о роли обратной связи в механических и биологических системах отводится так много места в надежде, что все богатство и универсальность принципа обратной связи, представляющего важнейшее понятие в общих кибернетических взглядах, станут достаточно ясными.

#### ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Можно построить модель даже столь сложной системы, как экономика целого государства, если принять ряд упрощающих допущений. Некоторые кибернетические методы позволяют надеяться, что в конечном счете окажется возможным построение такой модели без существенных упрощений. Однако в настоящее время нас интересует только роль и универсальность принципа, получившего название обратной связи. Экономическая модель, в которой Тастин (Tustin) применил этот принцип [4], является простой системой, предложенной Кейнсом (Keynes). В первой части своей «Общей теории» Кейнс предложил модель, изображающую экономику производства и потребления. Он выразил ее в виде ряда уравнений, поставив перед собой цель продемонстрировать различные виды зависимостей, связывающих рассмотренные им факторы. Последуем примеру Тастина и представим эти зависимости в виде модели.

Общая сумма всех доходов ( $Y$ ) состоит из денег, затрачиваемых на производство товаров. Все эти деньги расходуются на потребление товаров. Разделим деньги, затрачиваемые в сфере производства, на две категории: деньги, затрачиваемые на производство товаров широкого потребления ( $P$ ), т. е. товаров, которые могут быть

непосредственно потреблены, и деньги, затрачиваемые на производство средств производства, т. е. собственно капиталовложения ( $I$ ). Аналогичным образом мы можем разделить деньги, расходуемые в сфере потребления, на две категории: деньги, истраченные на покупку товаров ( $C$ ), и сбережения ( $S$ ). Теперь для того, чтобы эта мо-

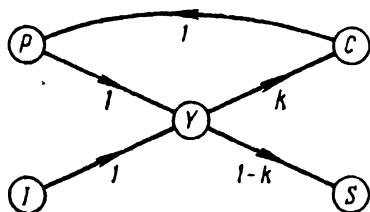


Рис. 1.

дель была устойчивой, другими словами, чтобы вход и выход национального дохода были в среднем уравновешены, необходимо наличие регулирующей обратной связи от потребления к производству. В нашей простой модели не учитываются акционерный капитал и про-

чие побочные факторы. Она ограничивается только основными статьями расходов и доходов. При этих условиях можно утверждать, что уровень потребления непосредственно регулирует производство. На рис. 1 приведена диаграмма, соответствующая нашей модели. Способность непосредственно потреблять ( $Y = C$ ) составляет  $k$ -ю долю от  $Y$ . Следовательно, сбережения равны остатку  $1 - k$ . Прочие факторы можно принять равными единице.

Предположим теперь, говорит Тастин, что мы имели бы такую же техническую систему с обратной связью. Какие выводы можно сделать в таком случае? Наличие замкнутого контура в системе позволяет немедленно обнаружить некоторые специфические свойства. Посмотрим прежде всего, в чем они состоят.

В системе, связывающей  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  соединениями  $x$ ,  $y$  и  $z$ , единственным воздействием на  $B$  является  $x$ , порождаемый  $A$ . Однако при включении цепи обратной связи  $f$  от  $C$  к  $B$  воздействия на  $B$  принимают более сложный вид (рис. 2). В этом случае мы имеем  $B = xA + fC$ . Но  $C = yB$ , и поэтому  $B = xA + fyB$ , что дает

$$\frac{B}{A} = \frac{x}{1 - fy} = x \frac{1}{1 - k} \quad \text{при} \quad k = fy.$$

Аналогичные соображения можно применить к замкнутому контуру нашей экономической модели. Уровень

потребления воздействует по цепи обратной связи на  $Y$ . Это приводит к тому, что влияние капиталовложений ( $I$ ) на доход ( $Y$ ) более не равно единичной величине,

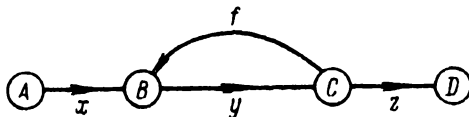


Рис. 2.

которую мы приняли вначале. Эта величина умножается на коэффициент обратной связи  $\frac{1}{1-k}$ , полученный нами выше. Этот коэффициент представляет собой не что иное, как *множитель капиталовложений*, введенный Кейнсом, т. е. коэффициент, на который следует умножить любое приращение капиталовложений, чтобы определить его влияние на доход.

Далее можно легко получить следующий результат. Если

$$Y = I(1/1 - k), \quad \text{то} \quad I = (1 - k)Y = S.$$

Последнее уравнение совпадает с выводом Кейнса о том, что капиталовложения равны сбережениям.

Ценность такого подхода можно выяснить даже из столь беглого рассмотрения примера. Тастин в своей книге разработал гораздо более детальную модель, учитывающую много других факторов и содержащую гораздо более разветвленные цепи воздействий. Однако никто не решится утверждать, что и такая модель полностью отражает реальную экономическую систему. Тем не менее этим путем, бесспорно, достигнуто понимание механизмов, действующих в экономике, и появилась перспектива, правда еще не совсем ясная, строго научного подхода к решению некоторых ограниченных экономических задач (которые до настоящего времени, пожалуй, считались неразрешимыми, или неопределимыми, или даже проявлением десницы божьей). Для кибернетика особенно ценным является то, что обоснован взгляд на экономические системы любых масштабов (фирмы или

целого государства) как на гомеостатические системы, включающие механизмы управления с обратной связью, которая может быть выявлена и измерена. Поэтому колебательное поведение экономики может быть в определенном смысле предсказуемо и управляемо. Отсюда с помощью методов математического моделирования, развитых в теории исследования операций, должна появиться возможность построения модели экономики, которая позволит решать по крайней мере некоторые реальные задачи. Далее, используя технику электронного моделирования, можно будет провести эксперименты на модели, т. е. использовать ее в качестве подопытной морской свинки. Если все это становится достижимым, то экономика, превращаясь тем самым в объект кибернетического управления, перестает быть областью догадок и словоизвержений политических теоретиков.

#### ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Мы называем устройство для хранения информации электронной вычислительной машины «памятью», однако эта метафора весьма наивна. В кибернетических машинах нас прежде всего интересует создание эффективного аналога памяти, который отвечал бы нашему субъективному представлению о ней. Это, безусловно, устройство для хранения, но хранения избирательного. Более того, оно не только хранит информацию в течение неопределенного времени, но и забывает. Часто это создает большие неудобства для мозга, которому принадлежит данная память, однако существует много причин, в силу которых несущественная информация, хранящаяся как в мозгу, так и в кибернетической машине, должна постепенно исчезать. Мы можем поставить перед собой задачи реализации такого механизма памяти при помощи машины, имитируя память живых организмов, так как у них она развилась до такого состояния, которое обеспечивает рациональную «скорость забывания». Один из возможных кибернетических подходов к решению этой задачи развит фон Ферстером (von Foerster) в его книге «Теория памяти, построенная на принципах квантовой

механики» [5]. Эта работа дает хорошую иллюстрацию кибернетического метода исследования и служит также заключительным примером более сложных форм, в которые может воплощаться идея обратной связи.

Отметим, прежде всего, что органы чувств, через которые информация попадает в мозг, состоят из огромного числа крошечных дискретных элементов. Так, например, сетчатка каждого глаза состоит из ста миллионов рецепторов (колбочек и палочек). Предположим, что наблюдаемое событие создает ряд элементарных впечатлений (по одному в каждом рецепторе), и примем это действительное число равным  $N_0$ . Спустя время  $t$  забывчивость приведет к потере памяти. Применяя принципы, которые ученые обычно применяют к процессу «распада» в физике и химии, мы можем согласиться, что это явление эквивалентно уничтожению части элементарных впечатлений (или потере доступа к ним), которые уже перешли из рецепторов в устройство памяти мозга. Далее, естественно предположить, что скорость изменения числа существующих в данный момент впечатлений пропорциональна числу исчезающих впечатлений, которое примем за  $N$ .

Формально это можно записать аналитически в виде

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Решив это дифференциальное уравнение, мы получим:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Короче говоря, из указанных рассуждений было выведено понятие кривой «забывания», или, другими словами, была высказана гипотеза об уровне, на котором мы можем надеяться сохранить произвольную информацию в нашей памяти во времени. Мы можем построить график, выражающий «долю запомненной информации» ( $N/N_0$ ) в функции времени, из которого видно, что кривая быстро спадает и скоро приближается к нулю. Однако это противоречит наблюдаемым фактам. Точная память действительно быстро ослабевает, но мозг сохраняет достаточно хорошее воспоминание в течение длительного времени. Какова же причина этого расхождения между

предлагаемой кибернетической моделью и реальной действительностью?

В ходе исследований фон Ферстер понял, что его кривую забывания можно привести в гораздо более точное соответствие с реальностью за счет введения в приведенное уравнение, помимо  $\lambda$ , других «коэффициентов забывания». Работая в этом направлении, он пришел к выводу, что некоторые коэффициенты забывания должны быть *отрицательными*. Но что такое «отрицательное забывание»? Оно не может быть не чем иным, как обучением. Таким образом, чтобы объяснить вид кривой забывания, которую действительно получают психологи при исследовании памяти, кибернетик вынужден привлечь элемент обучения или, точнее, как это выяснено, переобучения или заучивания.

Вид процесса, который мы описываем, сводится к периодическому обновлению памяти. Сознательно или бессознательно, либо, наконец, обоими путями память усиливается за счет процесса воспоминания, без которого она неуклонно слабеет. Анализ памяти любого человека в любой данный момент времени позволяет обнаружить некоторую долю  $N/N_0$  элементов, еще несущих информацию. Эта доля подается по обратной связи в свободные участки памяти, образующиеся в результате процесса забывания. Она и составляет «заучиваемую» информацию. Итак, теперь мы видим, что память содержит часть сохраненных впечатлений, определяемую приведенной формулой, плюс некоторые дополнительные впечатления, поступающие по обратной связи.

Число «свободных участков» такой памяти составляет  $(N_0 - N)$ , т. е. оно равно числу элементов, утративших свои впечатления. Часть этого свободного пространства заполняется по цепи обратной связи. Первым фактором, определяющим «объем» этого пространства, естественно, является число элементов, все еще сохраняющих информацию, т. е. число  $N$ . Однако на него влияет нечто вроде к. п. д. процесса заучивания. Этот коэффициент должен воплощать в себе как эффективность передачи информации, так и частоту сканирования памяти, которая обуславливает собой эту передачу. Таким образом, обратная связь «отрицательного забыва-

ния» представляет собой коэффициент обучения, который можно выразить в виде  $\mu N(N_0 - N)$ .

Теперь мы можем получить другую форму «кривой забывания», отражающую весьма тонкий вид отрицательной обратной связи. Математически она описывается просто путем добавления к первому выражению второго, т. е. коэффициента обратной связи. В результате мы имеем:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + \mu N(N_0 - N).$$

Фон Ферстер, приняв отношение  $N/N_0 = n$ , а произведение  $N_0\mu = k$  и назвав первую величину долей запомненных впечатлений, а вторую «заучиванием», получил из этого уравнения выражение для  $n$  в виде

$$n = \frac{k - \lambda}{k - \lambda e^{-(k - \lambda)t}}.$$

Кривая, описываемая этим уравнением, не только не спадает быстро до нуля, но показывает, что и при  $t \rightarrow \infty$  всегда сохраняются остаточные запомненные впечатления или факты. В дальнейшем было установлено, что эта кривая в действительности очень близко совпадает с результатами экспериментальных исследований памяти человека.

В нашем беглом описании работы фон Ферстера мы не давали никаких пояснений относительно изложения его теории при помощи аппарата квантовой механики и не касались также вопроса о виде обучения и принятых статистических допущениях. Однако мы надеемся, что это изложение достаточно для иллюстрации общего подхода и что читатель не удивится, если узнает, что, опираясь на эту основу, фон Ферстеру удалось объяснить такие явления, как галлюцинации и странные ощущения типа «я здесь уже был» (называемые иногда по-французски «déjà-vu»).

Какие дальнейшие результаты даст описанное исследование, пока еще не ясно. Но если по существу вдуматься в современное общепринятое представление о «памяти» электронных вычислительных машин, то



становится ясным, как оно наивно и насколько неразборчива и негибка эта «память» по сравнению с памятью живых организмов. Рано или поздно кибернетики будут создавать машины с такой емкостью и таким алгоритмом памяти, которые будут более жизнеспособны, чем машины, просто фиксирующие всю перерабатываемую информацию без всякого разбора. Подобно присущему мозгу механизму памяти, такая система должна обладать лучшей приспособляемостью, должна быть более экономичной и более полезной, чем система, запоминаящая бесконечное множество некоррелированных, неупорядоченных фактов.

## Глава 5

### ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИЯ

Мы уже определили системы как комплексы взаимосвязанных элементов и машины — как целесообразные системы. Другими словами, «машина, предназначенная для выполнения некоторых функций», представляет собой не что иное, как систему, организация которой с определенной точки зрения подчинена осуществлению поставленных перед ней задач. При этом сложная система может одновременно представлять собой несколько машин. Автомобиль, например, обычно вполне обоснованно рассматривается в качестве машины, предназначенной для перевозки людей. И действительно, именно для этой цели он и был создан. Однако если бы мы исследовали износ металлов, то могли бы с полным правом назвать автомобиль машиной, предназначенной для износа поршневых колец. С другой стороны, экономист мог бы назвать его машиной, предназначенной для прибыльной эксплуатации гаражей. Этот перечень можно продолжить значительно дальше, но он уже достаточен, чтобы сделать важный вывод о том, что, когда ученый хочет изучить данное явление  $E$ , ему следует выявить и точно определить некоторую конкретную систему в качестве «машины, предназначенной для реализации данного  $E$ ».

## МАШИНЫ КАК ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

Если явление *E* вообще обладает какой-либо протяженностью во времени или пространстве, то должна существовать машина, реализующая его. Такая машина может быть сложной и вероятностной по своей природе; ее иногда трудно распознать, так как на первый взгляд ее невозможно выделить из другой системы или вследствие того, что цель машины не совпадает с *действительной* целью системы. Итак, та машина, которую мы исследуем, является организмом, обладающим своей собственной целью и своим собственным единством. Следовательно, метафору «машина» можно присваивать описаниям механических, биологических, социальных или формальных систем. Эта концепция во всем ее разнообразии лежит в основе исследований теории операций, и она определяет понятие «кибернетической модели».

Исходя из такого кибернетического подхода к теории исследования операций, ученые, очевидно, должны изменить свои взгляды на проблемы, возникающие в промышленности. Рассмотрим промышленное предприятие, на котором планирование запутано, производительность низка и которое не выполняет своих обязательств по поставкам. Это предприятие, безусловно, является машиной, предназначенной для выпуска определенной продукции. Ортодоксальные эксперты, приглашенные с целью устранения недостатков в работе предприятия, очевидно, приступили бы к его исследованию с целью выявления какого-либо дефекта, т. е. обнаружения, «что испортилось» и «что можно исправить». Такой подход обычно приводит только к частичному исправлению положения, иными словами, принимаются меры, которые, будучи сами по себе вполне целесообразными, все-таки не дают должного эффекта. Но вернемся к исходным позициям. Мы сказали, что предприятие представляет собой машину, предназначенную для выпуска определенной продукции. При условии, что принятая технология и применяемое оборудование соответствуют стандартам, эту конкретную машину можно считать в полном порядке. Постараемся теперь обнаружить вторую машину, живущую внутри первой как паразит, т. е. *машину*,

*предназначенную для снижения темпа производства и полной остановки предприятия.* Ведь и в самом деле, должна существовать машина, которая вносит помехи в производство. Поэтому задача эксперта состоит в том, чтобы обнаружить эту машину во всех ее проявлениях и перестроить ее таким образом, чтобы она превратилась в машину для облегчения процесса производства.

Прежде чем показать практическую ценность изложенных только что взглядов, нам необходимо расширить наш кибернетический словарь, дальнейшее ознакомление с которым, собственно, и составляет цель настоящей главы. Мы исследуем природу систем такого типа, который назван нами машинами, и рассматриваем задачи управления ими. Если не сформулировать точные определения ряда терминов, то строго рассуждать далее о таких машинах будет затруднительно, ибо эти рассуждения примут расплывчатый характер. Ниже приводится краткое объяснение тех терминов, которые представляются наиболее существенными для последующего изложения, однако мы отсылаем читателя к книге английского кибернетика У. Росс Эшби (W. Ross Ashby) [6], в которой содержится подлинно исчерпывающее описание терминологии «систем», принятой в кибернетике.

Коль скоро машина является целесообразной системой, то ее описание определяется картиной последовательности ее состояний в процессе движения к стоящей перед ней цели. Эта последовательность состояний задается множеством *переходов* одних элементов (операндов) в другие (образы). Это множество получило название **преобразования**. Если образы, полученные в результате преобразования, не содержат элементов, отличных от операндов, а представляют собой только новую комбинацию одних и тех же элементов, то мы имеем *замкнутую систему* (т. е. множество операндов, замкнутое относительно данного преобразования). Если каждый операнд обращается только в один образ, то такое преобразование называется *однозначным*. Этот случай, в свою очередь, можно подразделить на два. Если в однозначном преобразовании каждый операнд не только дает

единственный образ, но и каждый образ указывает (обратно) на единственный операнд, то преобразование является *взаимно однозначным*. Когда же несколько операндов дают один и тот же образ, преобразование называется *однозначным лишь в одну сторону*.

То, что мы называем машиной, должно представлять собой замкнутую систему, ибо если бы в состоянии  $S + 1$  присутствовал какой-нибудь элемент, которого не было (в определенном смысле) в состоянии  $S$ , то наша целесообразная система совершенно не обладала бы ни единством, ни связанностью. Поэтому мы и стремимся дать такое определение машины, чтобы она *действительно* была замкнутой системой, так как только при этом условии ее поведение будет иметь смысл. В такую машину должны с самого начала входить и такие элементы, которые играют важную роль только на последующих стадиях ее работы. В начальной стадии они испытывают *тождественное* преобразование, т. е. с ними не происходит никаких изменений и каждый образ совпадает со своим операндом. Эти элементы можно считать находящимися в покое, или латентными, в течение некоторого промежутка времени.

Мы будем рассматривать только однозначные преобразования, так как машина, соответствующая неоднозначному преобразованию, вносит нечто новое в систему извне. Большинство машин соотносятся с *взаимно однозначными* преобразованиями. Примером таких машин может служить двигатель внутреннего сгорания. Некоторые машины реализуют *однозначное лишь в одну сторону* преобразование. Такой машиной является, например, вагранка, которая преобразует восемь разновидностей чугуна в единственный однородный литейный чугун.

Машины, о которых мы только что говорили, рассматриваются в абсолютном смысле, т. е. считается, что они не взаимодействуют ни с чем, выходящим за их рамки. Однако мы можем определить более важный класс машин, которые не являются в этом смысле абсолютными, а имеют входы и выходы. Машины этого класса могут представлять собой замкнутую систему, реализующую однозначное преобразование каждого из возможных

состояний ее входов. Полученное в результате множество образов составляет выход машины. Машина такого типа названа **Шенноном преобразователем** или **машиной со входом**. Так, например, электрическое взвешивающее устройство, работающее от проволочных датчиков, преобразует свои собственные внутренние состояния, определяемые входом, имеющим форму механического напряжения, в особый выход, например в набор отверстий на перфоленте. Каждое последующее состояние преобразователя определяется его данным состоянием и значениями, которые принимает вход в последующем состоянии. Слово «преобразователь» в этом смысле отлично известно специалистам по автоматике. С формальной точки зрения система планирования производства также является преобразователем.

Рассмотрим понятие *соединения* двух машин, когда вход преобразователя сам по себе является выходом какой-то другой машины и эта причинная связь обуславливает взаимодействие двух систем. Отметим, что здесь мы употребляем слово «взаимодействие», так как обычно при соединении двух машин они влияют друг на друга, хотя, на первый взгляд, мы должны были бы говорить о воздействии одной машины на другую. Однако даже в случае, когда машина со входом представляется чисто пассивным регистратором, сам процесс регистрации может оказывать влияние на оценку наблюдаемого явления. Применяя кибернетическую классификацию, мы воспользуемся формальным определением обратной связи, которая обсуждалась выше. Поведение машины *A* определяется состоянием машины *B*, так как выход *A* является входом машины *B*, в которую вложен определенный критерий, оказывающий соответствующее влияние на *A*. Такое соединение двух машин при помощи обратной связи позволяет осуществить простейший из всех возможных типов эффективных регуляторов (в отличие от простого ограничения).

На уровне простых систем регулятор такого типа, как правило, основан на **изоморфизме** регулируемой машины и самого регулятора. «Изоморфный» означает «имеющий аналогичную форму». Говорят, что одна система изоморфна другой, если по крайней мере формально они

эквивалентны и взаимозаменяемы. Построение моделей, при помощи которых наука изучает природу, сводится к созданию изоморфных машин. Так, например, математическое описание какого-либо физического или производственного процесса должно быть моделью того процесса, который оно ставит целью отобразить, ибо только в этом случае экспериментирование над моделью позволяет предсказать поведение реальной системы. Степень изоморфности математической модели «реальной» системе определяет достоверность получаемых при помощи модели предсказаний. Следовательно, простой регулятор, например регулятор Уатта, включает вторичную машину (в данном случае систему шарнирно подвешенных рычагов с грузами), которая изоморфна первичной машине (т. е. самому паровому двигателю).

В заключение нам потребуется несколько более широкое понятие, а именно **гомоморфизм**. Построение моделей сложных систем редко приводит к полному изоморфизму, а в случае очень сложных систем, как следует из самого их определения, степень изоморфности модели реальной системе даже нельзя проверить. Поэтому исследуемую систему необходимо, прежде всего, упростить, применив к ней однозначное лишь в одну сторону преобразование, примером чего может служить модель экономики Кейнса, исследованная Тастином. Эта модель *гомоморфна* реальной системе. Очень часто в теории исследования операций и в самой кибернетике мы изучаем изоморфную машину, которая не является (как бы мы этого ни желали) точным отображением взаимодействия двух сложных систем, а представляет собой модель этого взаимодействия, исследуемую через гомоморфизм каждой системы.

Все, что говорилось в этом разделе, относится к понятиям, при помощи которых можно исследовать кибернетические машины. Здесь на нескольких страницах мы ввели около десятка новых специальных терминов, которые будут использованы в последующем изложении. Несмотря на сжатость пояснений, мы надеемся, что их смысл является теперь достаточно ясным.

## ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ

Мы установили три основных свойства кибернетических систем, а именно, что они являются очень сложными, вероятностными и саморегулирующимися (гомеостатическими). Последнее свойство мы уже отчасти рассмотрели при анализе механизма обратной связи. Обратимся теперь ко второму свойству — вероятностной природе этих систем.

В ходе первого знакомства и классификации систем мы проследили неопределенность в системах различной сложности. На уровне простых систем для их исследования достаточно простейших понятий статистики. При переходе к исследованию сложных систем мы вынуждены заменять эти элементарные статистические представления более сложными понятиями теории исследования операций. Выражаясь языком статистики, эти понятия охватывают широкий круг **стохастических** процессов. Кратко стохастический процесс можно описать как ряд последовательных событий, разделенных случайными интервалами времени, для которых тем не менее можно определить среднюю длину интервала, а также некоторую частоту появления интервалов определенной длины, к которой в конечном счете стремится отношение числа интервалов данной длины к общему числу наблюдаемых интервалов. Однако на уровне очень сложных (кибернетических) систем мы сталкиваемся с новой научной дисциплиной, носящей название *теории информации*, создание которой связано прежде всего с именами Шеннона (Shannon) [7] и Винера [1], а истоки — со статистической механикой Гиббса (Gibbs). Теория информации нашла особенно широкое применение для построения систем связи, однако, как будет показано ниже, она имеет общее значение для кибернетики.

Рассмотрим какую-нибудь большую систему, которая с кибернетической точки зрения представляет собой машину. По определению эта система является очень сложной. Степень сложности измеряется разнообразием системы. Термин **разнообразие** достаточно наглядно определяет число различных элементов в системе. Рассмотрим теперь нашу кибернетическую систему *как маши-*

*ну для переработки информации.* По существу, очень часто это именно то (даже прежде всего то), чем кибернетическая машина и является. Даже в том случае, когда в нее входит какой-либо физический механизм (например, как в экономику или мозг), совершенно очевидна роль, которую играет способность хранить, передавать и преобразовывать информацию в работе этого механизма. Такая машина для переработки информации обладает большим разнообразием, а следовательно, характеризуется большой неопределенностью. Здесь следует напомнить, что системы очень сложного типа, как уже было указано, описываются при помощи аппарата теории вероятностей. Таким образом, с увеличением разнообразия увеличивается число возможных состояний системы и усложняется ее математическое описание.

Машина в первоначальном состоянии полна неопределенности, ее поведение хаотично. Однако, как только машина начинает работать, в ней появляется *упорядоченность*, которая начинает уничтожать царящую неопределенность. Эта особенность — появление *информации* — и позволяет нам управлять кибернетическими системами. Информация уничтожает разнообразие, а уменьшение разнообразия является одним из основных методов регулирования, и не потому, что при этом упрощается управляемая система, а потому, что поведение системы становится более предсказуемым. Наличие «шума» в системе ведет к увеличению разнообразия (а следовательно, и неопределенности), не увеличивая содержащейся в ней информации.

Но мы все еще имеем дело с вероятностями, а не с непосредственно измеряемыми величинами. Информацию в кибернетических системах можно обсуждать только в терминах статистических распределений, поскольку все факторы, которые требуются для построения изоморфной модели, являются неизвестными. Исторически на этой стадии развития излагаемых взглядов возник логический тупик. Вероятности, которые требовалось исследовать в статистической механике, приходилось выражать в терминах бесконечной последовательности опытов. Эффективный математический аппарат для строгого рассмо-



трения этой области теории вероятностей (т. е. интеграл Лебега) отсутствовал в течение многих лет. Впоследствии открытие Лебега подтвердило блестящие догадки Гиббса. Однако тем временем в теории вероятностей возникло новое направление.

Важнейшим результатом, достигнутым в этом направлении, является создание **эргодической теории**, которая рассматривает условия установления в вероятностных системах определенных предсказуемых форм поведения, не зависящих от начальных условий. Другими словами, существуют некоторые интересующие нас вероятностные характеристики систем, которые инвариантны по отношению к определенным видам преобразований. Об этих характеристиках стоит упомянуть здесь (хотя для их полного рассмотрения и потребовалось бы гораздо больше места), ибо именно они обеспечили возможность создания единой теории информации, не зависящей от частного вида системы связи. В этом смысле они способствуют выделению самой кибернетики в самостоятельную науку.

Наша цель состояла только в том, чтобы показать возможность существования общей теории информации. Эта теория должна рассматривать вероятности, при помощи которых могут быть упорядочены состояния машины. Другими словами, мы должны получить возможность обсуждать содержащуюся в машине информацию, а для этого нам требуется какая-то мера.

Рассмотрим формальную «машину», предназначенную для того, чтобы люди не высывались из окон. Эта «машина» имеет вид сообщения: «Не высывайтесь из окна» («Do not lean out of the window»).

Количество информации, содержащейся в этом сообщении (на английском языке), можно измерить, приняв, что каждое из двадцати девяти мест (считая пропуск между словами за место) должно быть заполнено одной из двадцати семи букв (считая пропуск за букву). По существу, вероятность того, что данное место будет занято данной буквой, не равна одной двадцать седьмой, так как каждая буква алфавита имеет различную частоту повторяемости в английском языке, которая точно установлена. Кроме того, даже с учетом этого обстоя-

тельства вероятность появления данной буквы зависит от сочетания букв, занимающих предшествующие места. Однако с целью упрощения и наглядности предположим, что на вероятность появления каждой буквы указанные факторы не влияют, а следовательно, она равна  $1:27$ .

Таким образом, первая буква сообщения содержит достаточно информации, чтобы обеспечить единственность выбора из двадцати семи элементов. Аналогичную информацию содержит вторая буква и т. д. Чтобы измерить количество информации, содержащейся во всем сообщении, мы стремимся подсчитать суммарную неопределенность, устраняемую на каждом месте. Выбор каждого элемента из двадцати семи, по сути дела, уничтожает разнообразие неорганизованной машины, которая как бы состоит из двадцати девяти пустых мест и ящика, содержащего двадцать девять алфавитов. Но хоть мы и стремимся найти общее количество информации, рассматривая последовательно каждое место, мы не получим удовлетворительной модели машины, если будем просто суммировать вероятности, равные  $1:27$ . Любая буква (место) может сочетаться со всеми другими возможными группировками, т. е. общие вероятности являются *мультипликативными*. Следовательно, если мы хотим просуммировать вероятности от места к месту, то мы должны складывать их *логарифмы*. Для этой цели подходят логарифмы с любым основанием, но в теории информации принято основание 2. Выбор такого основания существенно упрощает наши рассуждения, так как при этом ставится задача выбора решения вида «да — нет» при наличии всего пары альтернатив. Это двузначное решение, очевидно, может быть выражено числом, принимающим только два значения (а не десять). Такие числа носят название «двоичных» («binary digit», по-английски сокращенно «бит», «bit»). Бит принят в качестве стандартного термина для определения единицы информации. Этот принцип особенно удобен при построении машин, ибо бит можно просто представить в виде возбужденного или невозбужденного реле, прохождения или отсутствия тока и т. п.

Таким образом, количество информации  $H$ , содержащейся в рассматриваемом нами примере словесной

машины, предназначенной для запрещения высываться из окон, можно записать в виде

$$H = 29 \log_2 27 \text{ битов (всего)}$$

или

$$H = \log_2 27 = 4,75 \text{ бита (на место).}$$

Обобщая, мы можем выразить число возможных выборов (в данном случае двадцать семь) на место в виде дробной вероятности (в данном случае одной двадцать седьмой, обозначаемой  $p_i$  для  $i$ -го места). Отсюда общее выражение для среднего содержания информации на место имеет вид

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i.$$

Это выражение носит название *энтропии* выбора. Оно используется для определения понятий, аналогичных  $H$ , в статистической механике, однако подлинное происхождение этого понятия, как было указано в главе 3, восходит к термодинамике. Заимствование из термодинамики не должно приводить к заблуждениям. Энтропия термодинамической системы максимальна, когда содержащееся в ней тепло распределено равномерно, т. е. в системе отсутствует энергия, которая может производить работу. В теории информации  $H$  принимает наибольшее значение, когда все вероятности равны, что имеет место при максимальном разнообразии. При этих условиях отдельные элементы системы неразличимы и она не содержит никакой информации.

Отсюда следует, что если энтропия системы имеет тенденцию к возрастанию, то машина «деградирует», т. е. становится менее дифференцированной. Исходя из данных здесь определений, это положение справедливо как для термодинамических систем, так и для кибернетических машин. (Может возникнуть некоторое недоумение относительно знака  $H$ , но это вопрос чисто практического удобства.) Если же требуется, чтобы машина не деградировала, то необходимо внести в нее дополнительную информацию, ибо естественным поведением любой системы, обладающей способностью изменять свои

вероятностные характеристики, является увеличение энтропии, а следовательно, потеря информации.

Эти взгляды играют в кибернетике фундаментальную роль, так как они позволяют вывести стандартные меры для обсуждения любой машины в терминах ее семантической структуры. Это означает, что появляется возможность определения тенденций поведения на различных интервалах времени, а также возможность сравнения эффективности машин, выражаемой через число двоичных переключателей, которое требуется для построения каждой машины с учетом их разнообразия. Рассмотрим конкретный пример, сравнив число переключателей, которое необходимо для определения нашего сообщения на пяти различных языках. Применим формулу для  $H$ , чтобы определить энтропию на каждое место (используя все то же упрощающее предположение, что вероятности появления любой буквы на данном месте одинаковы), и умножим полученную энтропию на число мест. В результате получим следующую картину.

Сообщение		Число битов, требующееся для определения
Английский язык	Do not lean out of the window	137,75
Немецкий язык	Nicht hinauslehnen	85,5
Французский язык	Ne pas pencher au dehors	128,25
Итальянский язык	E pericoloso sporgersi	104,5
Шведский язык	Livsfar ligt att luta sig ut	128,25

Поскольку в каждом из этих сообщений используется различное количество двоичной информации для передачи одной мысли, очевидно, что языки в отношении эффективности отличаются друг от друга. Другими словами, они содержат различные количества избыточности, определение которой зависит от того, какой язык мы примем в качестве абсолютного стандарта. Если бы существовало только пять языков, указанных в таблице, то избыточность четырех из них можно было бы выразить, исходя из абсолютной эффективности немецкого языка. Но предположим, что выработано международное соглашение, в силу которого все окна должны маркироваться  $O$  или  $X$  в зависимости от того, безопасно или нет высо-

вываться из соответствующего окна. При этом вероятности выбора окон обоих типов были бы примерно равны. Тогда энтропия нашей машины, предназначенной для запрещения высываться из окон, была бы равна всего одному биту. По сравнению с таким стандартом даже немецкий вариант этого предостережения был бы весьма избыточным.

С помощью такой меры можно сравнивать кибернетические машины в смысле эффективности, с которой они выполняют возложенные на них функции «быть машинами для достижения той или иной цели». Промышленные системы управления, к примеру, отличаются большой избыточностью. Ряд других систем, имеющих одинаковое разнообразие, обладают тенденцией к увеличению (относительной) энтропии вследствие того, что они плохо запроектированы и не способны сохранять вложенную в них дифференциацию, которую система как бы теряет. Это не означает, что такие системы обогащаются информацией, так как их структура при этом не становится более совершенной. Напротив, теряя информацию, они просто становятся все менее и менее дифференцированными.

## Глава 6

### «ЧЕРНЫЙ ЯЩИК»

Свойства саморегулируемости кибернетических систем раскрываются через обратную связь и гомеостазис. Вероятностные свойства этих систем исследуются при помощи статистики и теории информации. Остается третье основное свойство кибернетических систем: очень большая сложность — которое изучается методом **«черного ящика»**.

Очень сложная система была нами ранее определена как такая система, которую мы вынуждены были принять не поддающейся детальному описанию. Для решения возникающей в связи с этим проблемы применим теперь основной метод построения моделей, принятый в теории операций. Мы стремимся построить модель очень сложной системы, модель, которая во всем существенном

ведет себя так же, как реальная система, но в то же время более доступна для экспериментирования. Рассмотрим небольшую и принципиально определимую систему, внутренняя структура которой совершенно недоступна для наблюдения. Такая система как будто заключена в непроницаемый футляр, в который никаким способом нельзя проникнуть. Мы видим провода, входящие в футляр и выходящие из него, которые представляют собой входы и выходы машины. Этот небольшой «ящик», будучи принципиально вполне определимым (ибо он весьма невелик), практически совершенно нельзя описать, так как он выполнен недоступным для наблюдения. Поэтому его и называют «черным ящиком». «Черный ящик» гомоморфен кибернетической системе, поскольку последняя подвергнута упрощающему однозначному лишь в одну сторону преобразованию (вследствие чего ее можно исследовать), которое в то же время не приводит к потере основной особенности системы (т. е. неопределимости в деталях). Следовательно, такой гомоморфизм является полезной и адекватной моделью очень сложной системы.

Возникает вопрос: насколько же, по существу дела, следует упрощать задачу, если для решения привлекается «черный ящик»? Прежде всего необходимо установить, сколько разнообразия содержится в таком «ящике», ибо разнообразие является отличительной особенностью очень сложной ситуации, которая нас сейчас интересует. Насколько разветвленной должна быть система вход — выход преобразователя «черного ящика», чтобы внутри машины могло содержаться достаточно информации для моделирования разнообразия, характеризующего практические задачи, с которыми сталкиваются, например, в промышленности?

Рассмотрим «ящик», упоминаемый Боуманом (Bowman) [8], который имеет всего восемь входов и один выход и может показаться на первый взгляд достаточно простой машиной. Приняв обычное ограничение в том смысле, что каждый вход и выход могут принимать только два значения, выясним, сколько возможных машин может представлять такой «ящик». При этих условиях мы имеем  $2^8$  состояний входов. С учетом двух

возможных состояний выхода число возможных машин, которые можно смоделировать при помощи нашего «ящика», составляет  $2^n$ , где  $n$  является числом различных состояний входов. Таким образом, число различных машин равно  $2^{2^8}$ , или  $2^{256}$ . Насколько велико это число, можно ясно представить, если сравнить его с «космическим числом» Эддингтона. По Эддингтону (Eddington) [9], общее число протонов и электронов во вселенной составляет  $1,5 \cdot 136 \cdot 2^{256}$ . Следовательно, наш примитивный на вид «черный ящик» обладает настолько большим разнообразием четко различимых состояний, что его можно сравнить (естественно, в одном ограниченном смысле) с разнообразием вселенной.

Значение метода «черного ящика» в кибернетике нельзя переоценить. Перед нами стоит задача управления очень сложной системой, обладающей большим разнообразием, которое невозможно не учитывать. Это разнообразие необходимо каким-либо образом воспроизвести и гомеостатически исследовать. Часто можно услышать оптимистический призыв: «Создайте *простую* систему управления, которая не может ошибаться». Беда заключается в том, что такие «простые» системы не обладают достаточным разнообразием, чтобы справиться с разнообразием окружающей среды. Таким образом, они не только не способны не делать ошибок, но и вообще не могут правильно работать. Успешно справиться с разнообразием в управляемой системе может только такое управляющее устройство, которое само обладает достаточным разнообразием. Этот фундаментальный вывод должен быть принят в качестве аксиомы, если мы стремимся к уничтожению разнообразия сложных систем (т. е. хотим управлять ими). Этот принцип назван Эшби [6] *законом необходимого разнообразия*.

«Черный ящик», являющийся удовлетворительной моделью кибернетической системы, должен содержать такое количество информации, которое было бы способно отразить разнообразие системы. При этом, естественно, эту способность «ящика» можно измерить. Если имеется достаточное комбинаторное разнообразие, обеспечивающее взаимно однозначное преобразование управ-

ляемой системы в управляющий «ящик», то очевидно, что выполняется закон «необходимого» разнообразия. Таким образом, задача сводится к обеспечению соответствия энтропии выбора управляющего «ящика» с энтропией выбора управляемой системы. Наличие такого изоморфизма, наряду с множеством взаимосвязей между системами, представляющими окружающую среду и модель, является формальным требованием, предъявляемым к управлению.

После этого формального ознакомления с принципом «черного ящика» нам остается рассмотреть его практическую ценность как метода исследования систем. Первое обстоятельство, на которое следует обратить внимание, заключается в том, что большинство научных исследований с первого шага связано с рассмотрением самых различных «черных ящиков».

Когда Гарвей впервые выдвинул свою гипотезу кровообращения, он не имел возможности непосредственно наблюдать всю кровеносную систему. Из того, что было доступно для непосредственного наблюдения, ученые до Гарвея сделали поразительно неверные выводы. Теория Галена сводилась к тому, что кровь отливает от сердца и течет далее между печенью и правым желудочком. Была выдвинута теория аналогии системы кровообращения с системой орошения, в соответствии с которой считали, что ткани впитывают кровь. При отсутствии необходимых приборов, например средств увеличения, с помощью которых можно было бы рассматривать капиллярные сосуды, ученые столкнулись с «черным ящиком». Они обладали некоторой информацией о нем, так как знали, что он содержит односторонние клапаны. Гарвей также имел эту информацию, и, кроме того, на основании собственных экспериментов он установил, что после сокращения сердца всегда расширяется аорта. Исходя из такой ограниченной информации, Гарвей должен был предугадать модель системы, и он построил ее, заимствовав идеи из совершенно другой области современных ему знаний, как в наши дни поступает специалист по теории исследования операций. В семнадцатом веке важнейшим направлением технического прогресса была гидравлика. Так перед Гарвеем возник образ модели насоса.



Многие научные открытия сделаны по такому же образцу. «Черный ящик», с которым сталкиваются ученые, действительно «темен», ибо он недоступен для наблюдения. В наше время наука получила доступ к кровеносной системе, и поэтому никаких «черных ящиков» для исследований этой системы больше не требуется. Однако так легко рассуждать теперь. В момент научного открытия неизбежно рассмотрение некоторой загадки. В противном случае нечего было бы открывать. Загадка и делает ящик «черным». То же самое происходит с ребенком, которому приходится разгадывать тайны окружающей его среды. Став постарше, ребенок ясно поймет, каким образом сделана боковая сетка его кровати, чтобы ее можно было опускать. Однако в раннем возрасте эта система является для него недоступной из-за свойственных ребенку умственных ограничений. Поэтому он вооружается стратегией «черного ящика», т. е. манипулирует входами. В результате он обнаруживает, что, тряся сетку, он может получить желаемый выход, т. е. сетка кровати упадет.

Итак, «черный ящик» известен каждому как в повседневной жизни, так и в науке. Речь всегда идет о недоступной для наблюдения системе, иногда в буквальном смысле из-за отсутствия необходимых технических средств для проникновения в нее, в других случаях фигурально, что объясняется сравнительно невысокими возможностями интеллекта, а подчас и просто из-за лени. Так, радиоприемник может оставаться «черным ящиком» для того, кто вполне мог бы разобраться в имеющихся в нем соединениях и в его *modus operandi*<sup>1)</sup>, если бы только захотел приложить для того усилия. Кибернетика оперирует с этим общеизвестным понятием только для того, чтобы описать с его помощью *абсолютно* недоступную систему. Ярким примером необходимости привлечения этого понятия может служить человеческий мозг.

Современные знания о мозге быстро развиваются, но попробуем на секунду задуматься о его сложности. Мозг является машиной с большим числом входов, со-

<sup>1)</sup> Способ действия (лат.). (Прим. перев.)

стоящих из чувствительных волокон, допустим из десяти миллионов двоичных каналов, и несколько меньшим числом выходов, состоящим, допустим, из миллиона двоичных каналов (здесь следует обратить внимание на необходимое разнообразие входов, обеспечивающее координированное поведение выходов). Так, обращаясь вновь к работам Боумана, мы видим, что существует огромное число «возможных мозгов». Можно найти перестановки входов, соответствующие всем перестановкам выходов. Число различных комбинаций поистине фантастично. Оно составляет

$$2^{10^6 \cdot 2^{10^7}}.$$

Как отмечает Боуман, это число, несомненно, является самым большим целым числом, имеющим подлинно научный смысл. Теоретически можно предположить, что в каком-то отдаленном будущем все эти машины будут исследованы. Однако в пределах нашей эры этот «ящик» всегда будет оставаться абсолютно «черным». То же самое можно с уверенностью утверждать в отношении других систем, которые могут быть в принципе научно исследованы, например экономики или промышленной фирмы.

Такое иллюстративное изложение идеи «черного ящика» было дано с тем, чтобы легко можно было понять суть заложенного в нем метода. Все сказанное выше можно обобщить, указав, что для управления очень сложными системами необходимо применять такие методы манипулирования входами и классификации выходов, которые не связаны с анализом «причин и следствий». На данном этапе изложения это может показаться очевидным. В таком случае предшествующее обсуждение не было бесполезным. В самом деле, рассмотрим современные классические методы управления, применяемые в промышленности, которые, хотя и в неявном виде, основаны на анализе причинно-следственных связей. До некоторой степени такой подход целесообразен, так как он позволяет исследовать необычные процессы, снизить неоправданно высокие расходы и т. п. Однако с точки зрения кибернетического управления этот подход органически порочен, ибо он основан на рассмотрении гомоморфизма реальной ситуации исходя из предположения,

что причинно-следственные связи выполняются, хотя в самом деле это не так. Рассмотрим следующий пример. Принято считать, что стоимость любого изделия связана с уровнем его производства определенной обратно пропорциональной зависимостью. Любой экономист изложит вам эту теорию, но в то же время любой руководитель предприятия объяснит, что этот «закон» не действует. Система слишком сложна, а действующие в ней связи слишком «темны», чтобы утверждение « $x$  является определенной функцией  $y$ » имело смысл. Когда мы определяем систему как абсолютно «черный ящик», мы, по существу, утверждаем, что  $f(x, y)$ , в соответствии с определением, является неопределимой, т. е. остается полной загадкой. Соображения, изложенные в этом разделе, имеют фундаментальное значение.

Такой подход позволяет нам развить понимание проблемы управления. Но посмотрите, нельзя ли извлечь из идеи «черного ящика» нечто большее. На этот вопрос можно ответить утвердительно. «Черный ящик» дает нам ключ к овладению практическим методом, который следует использовать для управления огромным разнообразием очень сложных систем. Выбор какого-либо элемента из такого большого числа представляет собой логическую операцию. Способность производить правильный выбор является, по существу, основным атрибутом интеллекта. Разнообразие, содержащееся в «черном ящике», в соответствии с законом необходимого разнообразия должно быть равно разнообразию управляемой системы, ибо только в этом случае он будет обладать «умственными способностями» производить правильный выбор. При этом наиболее эффективным методом поиска нужного элемента является такой метод, который дает наибольшую энтропию при каждом выборе. Предположим, например, что имеется всего десять элементов, из которых должен быть выбран один нужный элемент. Если принят метод, при котором производится поочередный анализ каждого элемента, то энтропия выбора составит

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i = - (0,1 \log_2 0,1) - (0,9 \log_2 0,9) =$$

$$= 0,469 \text{ бита.}$$

Чтобы увеличить эту малую энтропию до максимума, мы должны принять вероятности одинаковыми (как уже показано в главе, посвященной теории информации). Тогда

$$H = (0,5 \log_2 0,5) - (0,5 \log_2 0,5) = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ бит.}$$

Таким образом, показано, что наиболее эффективный метод выбора состоит из ряда дихотомий (последовательного деления на две части). Такая стратегия поиска основана на наиболее рациональном использовании разнообразия. Математическая логика формально обосновывает, почему «черный ящик» в том виде, в котором он упоминался выше (одно состояние выхода, которое нас интересует, например «успех или неудача», и ряд состояний входа), в сочетании с указанным методом поиска является одним из наиболее перспективных орудий управления. Пользуясь ранее определенными нами терминами, можно сказать, что космически огромное разнообразие состояний «черного ящика» может быть сведено к поддающемуся обработке объему исследований методом случайного поиска, основанного на принципе максимизации энтропии путем дихотомического деления. Это объясняется тем, что можно установить множества преобразований входа, относительно которых состояния выхода являются инвариантными. Рассмотрим один-два примера, иллюстрирующих возможности управления с помощью такого устройства.

Промышленный город в часы пик наводнен автомашинами, все эти машины следуют по различным маршрутам с различными скоростями; их движения обусловлены различными механизмами, цели которых не имеют никакой связи, и подвержены воздействию огромного числа случайных переменных. Другими словами, перед нами очень сложная система, содержащая очень большое разнообразие. Почему же не происходит ужасной катастрофы и машины умудряются не сталкиваться друг с другом? Возможность такого столкновения представляет одно состояние выхода, а его отсутствие — другое. Таким образом, мы имеем «черный ящик» с двоичным выходом, описываемым как «сохранение (или гибель) системы», и большим числом входных переменных,

которые комбинируются различным образом, создавая окружающую среду системы и определяя отношение каждой автомашины к ее соседям.

Система частично определяется тем, что она состоит из дорог, по которым можно проехать двумя основными способами: по левой стороне и по правой (по ходу движения). Наложив на систему одно простое ограничение — «правило движения», заключающееся в требовании двигаться по левой стороне (не двигаться по правой), мы вводим огромный объем управления. При отсутствии этого правила в системе, очевидно, воцарился бы хаос и выход перешел бы в состояние, соответствующее гибели системы. Здесь мы наблюдаем эффективность дихотомического метода выбора. Закон необходимого разнообразия соблюдается, ибо информация распространяется на *каждую* машину. Однако преобразование, которое переводит «все машины, движущиеся произвольно между правым и левым потоками», во «все машины, движущиеся в левом потоке», является однозначным лишь в одну сторону. Именно это уничтожает разнообразие и устраняет связанные с ним опасности.

Итак, пока что мы успешно решили задачу: движение организовалось в два главных левосторонних потока. Следующая трудность возникает, когда мы рассматриваем перекресток двух дорог. Здесь снова мы сталкиваемся с принципом дихотомического выбора. Светофоры или регулировщики используются для реализации правила «можно — нельзя». Таким образом, в этой очень сложной системе применяется элементарное управление, которое обеспечивает по крайней мере инвариантность выхода всей системы в смысле ее «сохранения». Безусловно, такой механизм управления весьма несовершенен, главным образом вследствие отсутствия полной информации, единства и обратной связи. Я могу с уверенностью предсказать, что когда-нибудь кибернетика добьется очень многого для улучшения регулирования движения. Тем не менее пока что этот пример регулирования движения транспорта может служить наглядной иллюстрацией применения теории «черного ящика» для решения конкретной задачи. Если бы мы могли только вообразить движение автотранспорта при отсутствии

привычных средств управления, то оно представляло бы собой картину жуткого хаоса.

Применим теперь эти принципы для рассмотрения таких промышленных систем, задачи управления которыми мы, по-видимому, очень мало понимаем. Применение теории «черного ящика», несомненно, поможет справиться с огромным разнообразием, присущим любой задаче планирования производства. Рассмотрим предприятие, осуществляющее  $(n)$  производственных процессов. План может предусматривать распределение поступающего сырья между любым числом  $(r)$  этих процессов в любой последовательности, а также продажу продукции на любой стадии производства. Естественно, что реальное предприятие, по-видимому, внесет в этот план определенные ограничения, установив, что целые области возможных перестановок являются технически неосуществимыми. Однако это замечание несущественно, ибо мы можем не учитывать этих ограничений, рассматривая в качестве примера лишь небольшое предприятие. Сколько же возможностей имеется у плановика, разрабатывающего план для такого предприятия? Ответ на этот вопрос выражается формулой

$$\sum_{r=1}^n \frac{n!}{(n-r)!} \cong n! e.$$

Это означает, что для предприятия, осуществляющего не более десяти производственных процессов, существует почти *десять миллионов* возможных планов. Конечно, можно вообразить, что оптимальное решение можно найти, исходя из опыта, однако подлинно точное решение может быть найдено только с учетом данного множества заказов, состояния самого предприятия, положения с рабочей силой и т. п. Другими словами, перед нами возникает динамическая задача, которая на идеальном предприятии требует непрерывного решения. В одной из работ [10] я показал, как можно использовать один из методов, применяемых в теории исследования операций, называемый линейным программированием, для получения абсолютно оптимального решения такого класса задач. Но рассмотрим вместо этого нашу задачу в

терминах теории «черного ящика», при помощи которой можно непрерывно анализировать эффективность планов при меняющихся условиях.

Предположим, что все десять миллионов возможных планов анализируются по отдельности со скоростью один план в минуту. Чтобы найти оптимальный план, непрерывно работая по круглосуточному графику, для решения поставленной задачи потребуется девятнадцать лет. Однако, используя метод, поиска, основанный на максимизации энтропии, и применяя машину, работающую с такой же скоростью (одно сравнение в минуту), можно решить аналогичную задачу примерно за двадцать минут. Вполне вероятно, что эта цель будет достигнута при условии применения эффективных логических методов. Мы для решения такой задачи сформулировали метод минимального выбора; поэтому для успешной его реализации «черный ящик» необходимо построить соответствующим образом. Он может выполнить стоящую перед ним задачу, если ввести в него критерии успеха для оценки тех сравнений, которые он должен производить. Он стремится к гомеостатическому поведению в пределах разнообразия задачи и критерия существования, используя регулятор, максимизирующий энтропию, на вход которого подается необходимое разнообразие и который производит эксперименты, преобразуя состояния системы. В реальной обстановке машина будет выполнять точно те же функции, которые осуществляет мозг плановика, мыслительный аппарат которого позволяет исключать целые множества нереальных возможностей, не подвергая их сознательному анализу. Итак, кибернетическая машина, выполняющая эту работу на предприятии, где осуществляется десять производственных процессов, должна выполнить такую же программу, как плановик. Более того, на крупном предприятии, осуществляющем тысячи производственных процессов, на которые наложены тысячи конкретных ограничений, машина все же должна получить наилучшее решение. В этих условиях работа несчастного плановика сводится только к догадкам. Его мозг достаточно вместителен (в смысле содержания информации), чтобы сформулировать задачу, однако, чтобы решить ее, он недостаточно

специализирован в отношении метода выбора, основанного на максимизации энтропии и охватывающего огромное множество возможностей и сложные подмножества критериев.

В заключение этого первого ознакомления с кибернетическим подходом к очень сложным системам следует отметить, что изложенные принципы являются простой формализацией тех способов, при помощи которых сама природа решает подобные задачи. Во всех областях естественных наук мы обнаруживаем, что важнейшие законы, управляющие действиями основных природных гомеостатов, имеют вид «черного ящика». Входы бесконечно комбинируются, разнообразие бесконечно увеличивается, и существует поразительная расточительность, которая отражает комбинаторное богатство всей системы. Однако при этом вступают в действие простые, понятные всем процессы решения (например, такие, как правила игры в шашки или правило «кошки едят мышей»), которые предназначены для уменьшения нежелательного разнообразия. Эти процессы представляют собой однозначные лишь в одну сторону преобразования, которые до сих пор в целом поддерживают выход системы, называемой природой, в состоянии «выживания».

Более того, природная система *обучается* этим правилам, даже не сознавая, в чем они заключаются. Рассмотрим природную аналогию транспортной системы, о которой мы говорили выше. Забудем об автомашинах на мостовых и обратимся к людям на тротуарах. На людей не действует преобразование «левостороннее движение разрешено, правостороннее — запрещено», и поэтому они движутся по тротуарам самым причудливым и неопределенным образом. Однако по мере увеличения густоты пешеходного движения его вероятностный характер становится все более определенным. Формируются определенные образцы движения, которые распространяются сначала на небольшие участки, подверженные собственным приливам и отливам, и, таким образом, начинают выполняться локальные правила движения, заключающиеся в том, что люди передвигаются направленными потоками. Формирование таких закономерно-



стей представляет собой огромное уменьшение разнообразия возможных систем «толпа на тротуаре». Однако уменьшение разнообразия осуществляется не за счет применения формальных правил и не за счет сознательного взаимодействия. Оно возникает естественным образом в результате взаимодействия элементов случайной системы, обладающих информацией (на бессознательном уровне) и обратными связями.

Овладение этой способностью обучаться оптимальному поведению и представляет собой первостепенную задачу промышленной кибернетики. Однако, чтобы решить эту задачу, мы должны прежде всего выяснить, как построить систему в виде самообучающейся машины. В такой машине должны протекать строго определенные потоки информации по строго определенным каналам, она должна обладать богатыми внутренними связями и способностями к развитию обратных связей и цепей однозначных лишь в одну сторону преобразований и т. п. Таким образом, очень сложная система должна строиться в виде «черного ящика».

Я считаю, что мы начинаем понимать, что структура такой машины, возможно, очень проста: она должна воспроизводить свое собственное необходимое разнообразие. Аналогичную картину мы наблюдаем в природе. Открытия науки обнаруживают все более возрастающее количество разнообразия, все более расширяющиеся его границы и все более важные детали. В то же время в результате открытий науки все более широкие классы явлений сводятся к все меньшему числу принципов, получающих все более общее значение. Любая кибернетическая система, начиная от вселенной и кончая мозгом, является бесконечно сложной и в то же время изящной и простой, подобно многоугольнику с бесконечным числом сторон.

## Часть II

# ЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КИБЕРНЕТИКИ

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой части были введены основные понятия, на которых построена кибернетика. В этой же части были рассмотрены природа систем и существо понятия управления, а также изложен важнейший принцип обратной связи. Далее, были затронуты основные методы исследования, применяемые кибернетикой, и прежде всего теория «черного ящика», играющая среди них первостепенную роль. На этой основе можно теперь приступить к изложению содержания этой новой науки. Однако прежде всего нужно решить вопрос: является ли кибернетика действительно наукой?

В начале второй части (глава 7) приводятся соображения, дающие право называть кибернетику наукой. Кратко обсуждается место кибернетики в истории развития науки, и формулируются требования, которым должен удовлетворять любой предмет, претендующий на роль самостоятельной науки. Согласно этим требованиям, каждая наука включает в себя следующие аспекты: теорию, или «чистый» аспект, описательный аспект, или рабочий метод, и, наконец, «прикладной» аспект, т. е. практическое использование теории и метода в их сочетании. В этой части рассматривается главным образом первый аспект. Остальные два составляют содержание частей III и IV.

В главе 8 показывается, на фоне истории логики, что ряд проблем кибернетики вытекает из античной философии. Кибернетика оперирует категориями познания. В связи с этим вечные проблемы механизма познания истины и объективной оценки полученных знаний

рассматриваются в новом свете. Прослежена судьба исторического парадокса, привлекавшего умы философов в течение 2000 лет, и показано, как он был решен в наше время. Это решение, являющееся основой метода «черного ящика», используется для управления в промышленности (глава 9). Исторический анализ основ кибернетики проводится прежде всего для того, чтобы показать сущность и оригинальность такого применения этого решения.

Однако анализ роли логики дает еще более ценные результаты. Кибернетика как в теории, так и в практических приложениях использует двоичную систему счисления (глава 10). Это система описания решений и стратегий, а также вычислительных операций в виде ряда дихотомий, т. е. двух взаимно исключающих друг друга альтернатив (0 и 1). Эффективность двоичной системы счисления вытекает из ее сущности, ибо эта система выбрана не только потому, что она легко реализуется при помощи электрических сигналов: в десятой главе излагаются четыре принципиальных соображения, обуславливающих использование такой системы счисления в качестве основы математического аппарата кибернетики.

Эти логические концепции получают наиболее полное развитие в теории автоматов (глава 11), т. е. машин, имитирующих поведение других систем, в том числе биологических. Изложены две теории, разработанные для построения таких автоматов, и показано, что ограничения, которые обычно приписывают таким машинам, на самом деле не существуют. Можно построить машины, имитирующие некоторые виды поведения, которые до сих пор считались присущими только живым существам. Их можно наделить свойством приспособляемости, заставить выполнять функции, аналогичные функциям мозга, заложить в них способность к самовоспроизведению и даже к созданию в ходе этого процесса более сложных машин.

Итак, во второй части рассматриваются логические основы кибернетики. Материал этой части сугубо теоретический, однако это не означает, что он представляет собой заумные абстракции. Развитие в науке об управ-

лении совершенно новых идей, восходящих к очень древним истокам, безусловно, чрезвычайно увлекательно. Более того, не поняв хода этого развития, нельзя понять поразительные теоретические перспективы, которые были очерчены. К этим перспективам, упоминавшимся в предыдущей части и целиком изложенным в заключение настоящей, часто относятся скептически. Однако это происходит из-за новизны идей, а также потому, что сами скептики почти всегда не имеют достаточной логической подготовки, чтобы понять, что речь идет не о фантастических догадках, а о строгих научных предвидениях.

## Глава 7

### КИБЕРНЕТИКА КАК НОВАЯ НАУКА

До сих пор мы стремились показать, чем занимается кибернетика, а также пояснить некоторые фундаментальные понятия, которыми она оперирует, иллюстрируя их на примерах, взятых из области промышленного производства. Однако любая работа по кибернетике, даже чисто ознакомительного характера, была бы непростительно поверхностной, если бы в ней не учитывалось настойчивое требование кибернетики на признание ее в качестве самостоятельной новой науки. Это очень смелое требование, но, о каком бы круге идей ни шла речь, вряд ли подобное требование можно было бы поддержать, не рассмотрев, пусть в самом сжатом виде, основные черты, которыми должна обладать любая наука, чтобы получить право считаться подлинно самостоятельной наукой. Эта книга не является трактатом по философии науки, и поэтому здесь мы не будем пытаться дать достаточно строгое определение науки. Но мы можем, по-видимому, все-таки исходить из того, что любая наука представляет собой некоторую систему знаний, которую можно рассматривать с точки зрения трех излагаемых ниже критериев.

Прежде всего, выделим в этом определении слово *система*. Тем самым мы подчеркиваем, что всякая наука всегда имеет теоретический остов, на который наращи-

вается живая плоть фактов. Чистая теория ничего непосредственно не говорит о конкретных выводах науки, но определяет, что является правомерным в данной науке и что нет. Так, например, современная физика построена на основе теории статистической механики. Из этой теории, в частности, следует, что нельзя одновременно достичь повышения точности измерения как скорости электрона, так и его массы. Или другой пример: из теории относительности вытекает, что в астрофизике бессмысленно говорить об удалении тела от наблюдателя со скоростью, превышающей скорость света. Можно было бы привести еще много примеров такого рода. Именно наличие единой теоретической основы является одним из отличительных признаков любой науки. Так, например, развитию психологии как подлинной науки в настоящее время все еще сильно мешает очень медленное формирование «чистой» теории. Кроме того, одна из характерных черт такой теории, по-видимому, заключается в том, что в течение длительного времени она развивается, не ставя перед собой какую-либо конкретную цель. Например, изучение конических сечений в геометрии для греков было всего-навсего интеллектуальным развлечением и продолжало сохранять, как говорится, чисто «академический интерес» вплоть до 1609 года, пока Кеплер не сформулировал свой первый закон движения планет, утверждающий, что орбиты планет представляют собой эллипсы. Таким образом, в дальнейшем Ньютон получил возможность применить геометрию конических сечений к другим небесным явлениям и заложить тем самым основы современных знаний о вселенной.

В отношении кибернетики можно с уверенностью сказать, что, хотя она еще только зарождается как наука, тем не менее она строит свою чистую теорию, пользуясь «бесполезным» философствованием, имеющим по крайней мере двухтысячелетнюю историю. Это утверждение справедливо во многих отношениях. В теории познания (или эпистемологии), в изучении умственной деятельности (или психологии), в науке о законах мышления (или логике), в исследовании количества (или математике) — во всех этих областях существуют про-

блемы, которые сейчас можно было бы назвать кибернетическими, но которые восходят еще к временам античной Греции. Что же касается огромного числа последующих направлений развития различных наук, то в настоящее время, очевидно, они имеют непосредственное отношение к кибернетическим исследованиям. Это, конечно, отнюдь не означает, что в середине двадцатого века мы вдруг оказались в состоянии ответить на бесчисленные загадки, которые озадачивали умы человечества на протяжении всей его истории. Однако вполне вероятно, что именно этот длительный путь развития привел наконец к такой интеллектуальной атмосфере, в которой появилась возможность сделать новый шаг вперед и создать новую науку. В связи с этим следующая глава посвящена изложению основной теории, на которой базируется кибернетика. Хотя на первый взгляд может показаться, что излагаемый в ней материал не имеет отношения к проблемам промышленного производства, необходимо понять, что мы имеем дело не с одним из преходящих «модных» веяний в промышленности, а исследуем хорошо обоснованный и богатый внутренним содержанием подход к решению задач управления и связи в очень сложных системах.

Возвращаясь к определению науки как системы знаний, рассмотрим, далее, само понятие *знания*. Помимо основной теории, наука должна обладать описательным элементом, т. е. языком, на котором можно обсуждать объекты ее исследования, правилами, при помощи которых сделанные наблюдения можно привести в стройную систему, и методами, позволяющими оценивать результаты наблюдений. В кибернетике, которая ставит перед собой цель исследования с единых позиций свойств больших систем, столь различных с общепринятой точки зрения, как элементы машин, экономика и человеческий мозг, в настоящее время возникает такой описательный раздел, получивший название «математической биофизики». На первый взгляд это название кажется устрашающим, но, расчленив его на составные части, можно усмотреть, что оно содержит как раз те элементы, которые явно необходимы. Действительно, существительное «биофизика» указывает на то, что этот раздел зани-

мается в равной степени живыми и неживыми системами, в то время как прилагательное «математическая» подразумевает, что бесстрастный и объективный язык математики можно использовать для научного обсуждения систем обоих классов.

Уже на первоначальном этапе развития этого второго «столпа», на котором зиждется кибернетика, получено много существенных результатов. Как будет показано далее, в этой области разработаны функциональные модели таких процессов, которые до сих пор считались присущими только живым организмам. В число этих моделей входят математические, статистические, механические и электрические модели. Конечно, никто не утверждает, что биофизические модели достигли уровня машин, имитирующих функции мозга. Однако они уже дают достаточное основание для подтверждения общих теоретических положений, исходя из которых кибернетики в свое время усомнились в целесообразности сохранения традиционного жесткого деления на живые и неживые системы.

На этом стоит остановиться несколько более подробно. В классификации наук с незапамятных времен существовала тенденция подчеркивать различие между двумя типами систем — живых и неживых, что и по сей день неизменно находит свое отражение во всей организации современных научных работ. В сфере производства это проявилось в том, что мы сосредоточили все наши усилия на создании и последующем усовершенствовании машин, расширяющих *физические* возможности человека. В наше время машины могут перевозить человека быстрее, чем он сам может передвигаться, машины увеличивают точность, с которой человек может выполнять порученную ему работу (например, при обработке куска дерева), но прежде всего такие машины являются усилителями его физической силы. Современная промышленность в общем дает нам картину того, как в области техники человек, затрачивая ничтожные физические усилия, совершает поистине великие подвиги. Таким образом, человек для повышения мастерства и производительности труда может усилить отпущенную ему природой незначительную мощность, со-

ставляющую всего какую-то долю лошадиной силы, занимствуя тысячи лошадиных сил у машин. Недоверчивость, с которой за пределами научных кругов было встречено появление таких средств, как электронные вычислительные машины, свидетельствует лишь об узости нашего общего кругозора. Дело в том, что в этом случае мы сталкиваемся не с чем иным, как с машиной, которая точно, быстро и, по существу, безотказно имитирует способность человека, не имеющую чисто физического характера. Такая машина реализует условный рефлекс и является ассоциативным устройством. Она принадлежит, как было показано выше в нашей классификации, к сложным детерминированным системам. Вычислительная машина отнюдь не моделирует умственные способности человека, а лишь расширяет его способности связывать одни численные и логические понятия для образования других. Однако и этого, оказывается, достаточно, чтобы, с одной стороны, напугать людей, а с другой — принести огромные блага для науки и промышленности.

Если же мы перейдем в область подлинно кибернетических машин на уровне очень сложных вероятностных систем, то увидим, что плоды, которые они могут принести, соответственно гораздо богаче. Достоинство кибернетики как науки даже на том уровне ее понимания, которого мы пока что достигли, заключается в том, что она усматривает возможность такого перехода. Для кибернетики проблемы, возникающие при создании машин, представляющих собой модели мозга, сводятся к отысканию методов, необходимых для перехода от одной области изучаемых систем к другой. Она считает, что эти две области не являются более принципиально отличными в определенном отношении. По существу, нет никаких оснований утверждать, что, если наука может удовлетворять нужды производства, расширяя физические способности человека, она ничего не в состоянии сделать, чтобы расширить возможности того, что обычно называют его умственными способностями. Очевидно, нет никаких сомнений в том, что ей под силу и это. В то время как для демонстрации такой возможности на абстрактном уровне мы будем опираться на



логические основы кибернетики, назначение биофизической теории сводится к тому, чтобы описать и показать эту возможность на эмпирическом уровне.

Наконец, в-третьих, новая наука должна содержать прикладной элемент. Ее структура как системы знаний определяется лежащей в ее основе чистой теорией, содержание этих знаний определяется более описательной и практической теорией, которую можно непосредственно использовать при исследовании предмета. Однако для того, чтобы новая наука имела определенное отношение к производству, она должна опираться на третий «столп», т. е. уметь строить машины.

Для того чтобы внедрить науку в производство, чтобы применить ее на конкретных предприятиях и в реальных производственных процессах, она должна быть облечена в какую-то техническую форму. Но если при этом мы хотим учесть весь комплекс систематизированных знаний, вытекающих из логического и биофизического аспектов кибернетики, то ее техническая форма будет иметь довольно непривычный вид. Уже здесь возникает некоторое недоразумение. Системы автоматического регулирования и контроля, системы обработки данных, электронные вычислительные машины — все это виды технических средств, разрабатываемых той областью техники, которая лишь примыкает к чисто кибернетическим исследованиям. Следует, однако, помнить, что эти отрасли техники (даже в случае, когда в соответствующих устройствах применяется обратная связь) связаны со сложными детерминированными системами. В их современном виде они не могут быть использованы для реализации подлинно кибернетических систем. До тех пор, пока это обстоятельство не учитывается на практике, мы будем продолжать создавать на предприятиях системы, аналогичные тому, что физиологи называют «спинальной собакой». Другими словами, в систему закладываются рефлексy и она достигает затем уровня организма с автономной нервной деятельностью. Хотя в ряде случаев все это вполне может нас удовлетворить, ни одна из целей кибернетического управления не будет достигнута без создания моделей (пусть даже на самом низком и приблизительном

уровне) некоторых частей живого мозга. Основываясь на логической теории, можно точно определить, до каких пределов мы можем двигаться в этом направлении. При этом имеющиеся в настоящее время данные свидетельствуют о том, что нам предстоит пройти еще очень большой путь. Биофизическая теория в состоянии исследовать возможные методы подхода к решению задач о построении машин-аналогов мозга и создавать абстрактные модели таких машин. Однако для того, чтобы воплотить все эти исследования в конкретную форму, которую можно использовать в промышленности, новая наука должна обратиться к технике моделирования. Пожалуй, самой неудовлетворительной стороной современного этапа развития кибернетики является то, что специалисты, непосредственно занимающиеся автоматизацией в промышленности, очевидно, часто не сознают, что их нынешняя сфера деятельности очень далека от подлинной кибернетики. Это касается как степени сложности систем (не учитывая, что переход от любой сложной системы к неопределимой системе представляет собой нечто большее, чем простое количественное изменение), так и глубины логических выводов, ибо переход от дедуктивного метода, удовлетворяющего существующим детерминированным системам, к индуктивному методу, связанному с вероятностными системами, требует совершенно иного образа мышления.

Указанные только что различия признают далеко не все, однако есть основания полагать, что они в неявном виде входят в анализ всех свойств систем с точки зрения связи и управления. Поскольку может возникнуть явная двусмысленность, целесообразно в дальнейшем ограничить значение термина «автоматизация», относя его к машинам, которые принадлежат к классу сложных детерминированных систем. Моделирующие системы, основанные на новых принципах (например, на принципе обучения), т. е. системы, принадлежащие к очень сложному вероятностному классу, будут называться просто «кибернетическими машинами». Это название придает одному из произвольных различий, введенному ранее в нашей классификации систем, смысл

строгого определения. Использование различных терминов для названия этих двух классов машин, которые, как было показано, принципиально отличаются друг от друга по своей природе и имеют, кроме того, совершенно различное значение для промышленности, является весьма плодотворным.

После этого краткого введения в круг идей, характеризующих кибернетику как новую науку, мы можем теперь перейти к рассмотрению логической теории, лежащей в ее основе. Всякий, кто при чтении книги пропустит следующую главу, при условии, что он уже знаком с терминами, которые в ней вводятся, убедится, что связность изложения от этого не пострадает. Если этот читатель принадлежит к разряду «практически мыслящих людей», то он может спокойно пропустить эту главу, не подвергая испытанию свое терпение и не тратя времени на то, чтобы одолеть материал, который может показаться ему набором чрезвычайно абстрактных идей. Однако читателю, который действительно стремится понять все возможности кибернетики и который подходит к этой книге с подлинно научных позиций, следует попытаться усвоить теоретические основы, не задаваясь пока что вопросом о том, стоит ли тратить на это время.

## Глава 8

### ЛОГИЧЕСКИЕ НАЧАЛА

Какова природа наших знаний? Этим вопросом занимается та область философии, которая называется эпистемологией. Пытаясь на него ответить, философы сформулировали ряд задач, которые считаются неразрешимыми и стали в сознании человека вечными загадками. Одной из таких загадок является проблема «тела и разума». Тело, как утверждается, является протяженным и материальным, т. е. представляет собой субстанцию в пространстве. Разум же представляет собой нечто, чего нельзя обнаружить даже с помощью хирургического и микроскопического исследования, т. е. психическое явление, не обладающее протяженностью. Возникает про-

блема: каким же образом может осуществляться взаимодействие тела и разума, которое, как нам представляется, имеет место?

Некоторые философы подошли к решению этой задачи, отвергнув само существование разума. Действительно, если разум является плодом воображения, то и проблема снимается. Другая философская школа, напротив, утверждала, что не разум, а материя есть чистая иллюзия, ибо она является лишь отражением разума. Тогда задача снова исчезает. Поскольку обе эти точки зрения вопиюще неправдоподобны, заявляли представители третьей школы, и поскольку эти две формы бытия, очевидно, не могут взаимодействовать, то они и не взаимодействуют. Другими словами, именно само взаимодействие представляет собой иллюзию. Процессы в теле и в разуме развиваются параллельно под воздействием некоторой естественной гармонии. Различные разновидности этих взглядов излагались в течение многих столетий. Однако большинство современных мыслителей вообще потеряло всякий интерес к этому вопросу, считая, что ответ на него сводится к тому, что сама проблема является иллюзорной.

Эти идеи (которые мы здесь так примитивно изложили) отражают глубочайшие мысли ряда лучших умов, порожденных человечеством. От них нельзя так просто отмахнуться. Если бы на поставленный вопрос можно было дать прямой ответ, то какой-нибудь из этих великих умов наверняка бы его нашел. Но только в наш век стало достаточно ясно, в чем заключается трудность разоблачения этого древнего эпистемологического мифа. Эта ясность появилась в результате замены неудовлетворительной формы описания проблемы более рациональной. Дело в том, что природа тела и разума, а также характер их взаимодействия были недостаточно известны для того, чтобы утверждать, что они «действительно обладают тем или иным свойством: протяженностью, отсутствием протяженности или каким-либо иным». Для подобных утверждений у нас и сейчас нет достаточных оснований. Но теперь мы имеем иной, более совершенный метод описания проблемы, который не содержит никаких утверждений о

действительных состояниях тела и разума и в равной степени не оперирует терминами «причин и следствий». Этот метод описания является *функциональным*.

По существу, вопрос взаимодействия тела и разума является принципиально кибернетическим. Это именно тот вопрос, который касается связи и управления в очень сложных системах. Что происходит, когда человек пользуется своими высшими центрами управления? Пытаясь ответить на этот вопрос, психологи в настоящее время измеряют происходящие явления и выражают их на языке статистики такими методами, которые в промышленности мы назвали бы методами теории исследования операций. Психологи пользуются такими понятиями, как оценка способностей и скрытого интеллекта, кривые усталости, скорость обучения и забывания и т. п. Они разрабатывают математические теории, которые определяют изучаемые процессы просто как некоторые операции, результаты которых можно предсказать в терминах теории вероятностей. Психиатры исходят при этом из данных, характерных для ненормально работающей системы. Физиологи подходят к этому вопросу совершенно аналогичным образом, но ограничиваются только процессами в коре головного мозга. Невропатологи же регистрируют электрические сигналы, связанные с различными видами мозговой деятельности, при помощи электроэнцефалографов.

Этот научный подход к проблеме управления в человеческом организме по своему методу, операционному описанию и прежде всего по самому принципу явно аналогичен подходу к проблеме управления в промышленности, которая обсуждается в настоящей работе. При этом в обоих случаях принципы теории исследования операций являются с логической точки зрения наиболее эффективными. Кроме того, в обоих случаях рассмотрение системы в виде «черного ящика» позволяет устранить опасность чрезмерного упрощения природы системы, которая может возникнуть как следствие какой-либо случайной и неверной аналогии. Далее, существует формальное логическое соответствие между двумя множествами результатов исследования управления в человеческом организме, с одной стороны,

и в промышленном предприятии, с другой. Таким образом, для решения проблемы управления промышленным предприятием появляется возможность использовать знания, накопленные в результате многовековых размышлений о проблеме тела и разума, а также результаты, полученные в биологии за последние годы. Это, очевидно, весьма целесообразный шаг, который вносит в наши исследования промышленных систем всеобъемлющий принцип единства управления. Чтобы проиллюстрировать плодотворность этого принципа, удобно проследить одно конкретное направление развития теории, которое лежит в основе построения кибернетических машин. Именно с этой целью мы обратимся теперь к 350 году до нашей эры, но не для ссылок на авторитеты, а исходя из глубокой убежденности в преимуществах развития философской мысли.

«То, что я утверждаю сейчас, ложно». Если это высказывание истинно, то оно ложно, и в то же время, если оно ложно, то истинно. Считают, что этот «парадокс лжеца» был сформулирован Эвбулидом<sup>1)</sup>. Вплоть до сегодняшнего дня он рассматривается в различных формах и с различных точек зрения большим числом поколений логиков. Ему были посвящены десятки книг, но даже Аристотель не сумел правильно понять его. Непреходящее значение этого парадокса заключается вовсе не в том, что он привлекает ум попробовать свои силы. Он, по существу, лежит в основе всего вопроса о том, какие высказывания имеют смысл и какие бессмысленны. В связи с этим он освещает нам принцип работы мозга, а следовательно, позволяет выяснить возможности и ограничения кибернетических машин, которые могут быть построены. Не теряя времени на подробное изложение истории развития взглядов различных логиков на «парадокс лжеца», рассмотрим работу одного из современных последователей Эвбулида, которым является Гёдель (Goedel). Эта работа появилась только в 1931 году.

<sup>1)</sup> Эвбулид — древнегреческий философ, современник Аристотеля, по преданию, учитель Демосфена. Знаменит приписываемыми ему неразрешимыми парадоксами. (*Прим перев.*)

Гёдель решил рассмотреть парадокс, содержащийся в рефлексивном высказывании, в форме, несколько отличной от «парадокса лжеца». Он взял высказывание, которое утверждало о себе самом (посредством импликации), что оно не является доказуемым. Так же как все наши представления о способности относить высказывания к истинным или ложным оказываются несостоятельными перед парадоксом лжеца, так и идея о доказуемости оказывается несостоятельной перед предложением Гёделя. Это предложение представляет собой лишь один экземпляр из большого множества высказываний, иногда весьма сложных, которые все являются рефлексивными в отношении доказуемости. «То, что говорится в этом предложении, не может быть доказано». Если это предложение можно доказать, то его действительно нельзя доказать, но если его можно опровергнуть, то в конечном счете это означает, что его можно доказать.

Вывод, который следует сделать из такой нелепой ситуации, сводится к тому, что предложение такого рода принципиально не может быть ни доказано, ни опровергнуто в пределах того языка, на котором оно изложено. А ведь люди, гордящиеся своим здравым смыслом, часто говорят, что единственным мериллом того, заслуживает ли какое-либо предложение внимания, является то, выполнимо ли это предложение так, как оно утверждает. А что, если это предложение является предложением Гёделя?! По существу, вполне вероятно, что некоторые на первый взгляд безупречные рассуждения, которые «практически» мыслящий человек считает выражением «здорового здравого смысла», в терминах логики являются громадными, разветвленными предложениями Гёделя. Но эта крамольная мысль высказана здесь нами лишь попутно. Практическая иллюстрация значения предложения Гёделя для сферы производства дана в начале следующей главы.

Хотя я пытался обычным языком пояснить понятие, получившее у логиков название «неразрешимых предложений», эта попытка представляла собой всего лишь несколько видоизмененное изложение работы Гёделя,

ибо последний работал не в области *грамматического* синтаксиса естественного языка, а в области *арифметического* синтаксиса. Этот синтаксис основан на преобразовании словесных высказываний в числовые выражения путем построения арифметической модели логической структуры предложения. Каждому лингвистическому символу в предложении присваивается число, по которому он может быть опознан, и в дальнейшем эти числа используются в качестве показателей степени последовательности простых чисел. Следовательно, простые числа представляют собой содержание предложения. В результате перемножения всех членов последовательности получается одно большое число, соответствующее данному высказыванию. Следует подчеркнуть, что из этого числа, содержащего целое высказывание в неявном виде, всегда можно получить развернутое высказывание, ибо само это число сформировано таким образом, что его разложение на множители является однозначным. Аналогично, если множество высказываний, составляющих аргумент, выразить в виде последовательности простых чисел и использовать в качестве показателей степени ее членов числа этой последовательности, соответствующие отдельным высказываниям, то, перемножив между собой члены последовательности, мы можем выразить весь аргумент одним числом. Гёдель и его последователи развили эти идеи гораздо дальше. Они хотели создать полностью «арифметизированный» язык, в котором все результаты могут быть получены путем вычислений, производимых над такими логическими числами.

Замечательное следствие, вытекающее из этой работы, трудно наглядно проиллюстрировать, ибо люди привыкли представлять себе математику как такую науку, в которой все подчинено идеальному порядку и ничего не требуется дополнительно объяснять. Но если к этому словесному объяснению того, каким образом предложение может оказаться недоказуемым, читатель отнесся достаточно внимательно и если теперь ясно, что аналогичный ход мыслей можно применить в логическом суждении, преобразованном в число, то в последующем выводе нет ничего особенно удивительного.



А этот вывод сводится к тому, что в большинстве формальных языков, примером которых является математика, всегда будут содержаться неразрешимые предложения. Естественно, что ни один обычный язык не может быть полным и замкнутым. Это положение, следствие которого нам потребуется в следующей главе, известно как теорема неполноты Гёделя. (Попутно следует отметить, что логикам удалось разработать высоко специализированные языки, являющиеся сами по себе алгоритмически разрешимыми. Однако это достижение относится только к их формальной структуре. Если понятие «языка» расширить от логической структуры до вопросов семантики, т. е. до *смысла* терминов, то возникают новые порочные круги, связанные в этом случае с определениями.)

В то же время следует указать, что Гёдель является лишь одним из представителей большого числа ученых, которые изучали проблемы, связанные с попытками переноса словесных сообщений и их анализа в область точных и строгих категорий, из которой можно полностью исключить двусмысленность, эмоции и ложные выводы. Изложение логических начал современной кибернетики мы заключим весьма кратким обзором развития подобных идей, ибо они отражают то направление мысли, которое непосредственно ведет к построению кибернетических «мыслящих машин». Мы еще раз возвращаемся к античной Греции, где наиболее четко сформировалось понятие о том, что аргумент можно проанализировать и придать ему строгое, «научное» содержание. Формальная логика в идеальном виде была бы аппаратом рассуждений, где все аргументы выражались бы в виде символов, которыми можно было бы манипулировать, как в алгебре. Это позволило бы получать ответы на любые вопросы с гарантированной точностью, не вынуждая манипулятора при этом думать.

Родоначальником формальной логики обычно считают Аристотеля. Он жил в четвертом веке до нашей эры и был первым философом, который сформулировал правила строгого мышления и формальные законы, определяющие, что можно и чего нельзя утверждать, а также исчерпывающе исследовал все эти проблемы. Он

ввел абстрактные понятия аксиом и переменных и установил основные принципы дедукции. Развита им теория модальной логики была настолько сложна, что в отдельные периоды ее толковали совершенно неправильно, а некоторые, наиболее сложные логические выводы Аристотеля до последнего времени не могли понять и привести в стройную систему. Все эти замечания адресованы тем, кто, никогда не изучая логики, не может понять, почему из всех ученых древности именно Аристотеля столь высоко почитают и почему его так часто цитируют. По существу, гений Аристотеля влияет на интеллектуальное развитие Западного мира и по сей день. Спустя полторы тысячи лет после его смерти логика была все той же, какой он ее оставил, и средневековые европейские философы восприняли его формализованные методы рассуждений в качестве приемлемых и образцовых средств спора. Если мы обратимся уже к четырнадцатому веку нашей эры, то увидим, что английский францисканский монах Оккам, который был, пожалуй, наиболее крупным логиком средних веков, все еще широко толкует Аристотеля. Таков был огромный и монолитный фундамент, на котором в дальнейшем развивалась идея о возможности формализации мышления и построения машин, предназначенных для переработки соответствующих формальных образов.

Далее, в семнадцатом веке мы встречаемся с философом, логиком и математиком Лейбницем (следует отметить, что он был также родоначальником психологии). С именем Лейбница более, чем с чьим-либо иным, я склонен связывать первый ускоренный этап развития кибернетических идей. Наконец, в царстве логики начали появляться новые мысли и, в частности, появились зачатки символической логики. Были заложены общие представления логического исчисления, принадлежащие тому же самому человеку, который развил дифференциальное исчисление в математике в той форме, какая сохранилась до наших дней. Лейбниц живо интересовался машинами и автоматами и выдвинул взгляды о логической осуществимости построения машин, воспроизводящих весьма сложное поведение. В отличие от своего великого современника Ньютона, Лейбниц

считал, что пространство и время являются абстракциями, и определял эти понятия в терминах логики как соответствующие порядки совместных и несовместных вероятностей. Я лично считаю, что такая трактовка дает современному специалисту по кибернетике ключ к более глубокому исследованию проблемы памяти, которая рассматривается в этой книге в другом разделе. Далее, хотя Лейбницу не удалось создать релятивистскую логику, его философские взгляды на проблему восприятия (являющуюся одним из важнейших вопросов кибернетики) примерно на три столетия опередили его эпоху. Ведь только с появлением работ Уайтхеда (Whitehead) в нашем веке был обоснован взгляд, что некоторый объект, не обладающий сам по себе сознанием, в состоянии реагировать в определенном смысле на связанные с ним события. Это воззрение привело Лейбница к типично современным представлениям о бессознательных функциях и желаниях. Наконец, особенно характерно то, что в своих исследованиях всех этих связей Лейбниц стоял на принципиальных позициях теории исследования операций. Он гораздо меньше интересовался причинно-следственным истолкованием связей, чем динамическим, и считал, что часть является выражением целого, а не просто содержится в нем. Такой подход хорошо согласуется с «гештальт-проблемами» в современной психологии, с подходом к решению всех задач промышленной кибернетики с позиций «органического единства», а также с современными кибернетическими исследованиями проблемы распознавания образов.

После Лейбница в истории науки наступил новый перерыв в развитии кибернетических взглядов, пока в девятнадцатом веке в этом отношении не начался быстрый прогресс. Джордж Буль (George Boole) написал свой труд «Математический анализ логики», который имел подзаголовок «Очерк исчисления дедуктивного мышления». Де Морган (De Morgan) опубликовал работу примерно аналогичного содержания. Вскоре эти идеи начали развивать Пирс (Peirce), а за ним главным образом Шредер (Schroeder). Тем временем Бэббидж (Babbage) создавал свою «логическую машину».

К концу века Фреге (Frege) еще теснее связал логику и математику, и появился капитальный труд «Формальная математика» под редакцией Пеано (Peano). Переходя теперь к двадцатому веку, мы прежде всего обращаемся к Расселлу (Russell) и Уайтхеду и их гениальной книге «Принципы математики». В дальнейшем появляется слишком много имен, чтобы их можно было упоминать в столь сжатом очерке. Однако сам этот факт является наглядным свидетельством того, насколько плодотворной стала та область знаний, в которой мы можем проследить развитие кибернетических идей. Это отнюдь не означает, что ученые, работающие в области математической логики и топологии, признают себя кибернетиками. Это далеко не так. Однако эти чисто теоретические, абстрактные и «бесполезные» предметы являются тем источником, из которого черпаются почти все основные теоретические положения кибернетики. Богатство, заключенное в этом источнике, накопленное за две тысячи лет его подспудного развития, неоспоримо.

В двух последующих главах мы обратимся к теоретическим результатам, полученным современными специалистами по кибернетике из этого исторического материала. Сделанный выше обзор должен помочь в освоении этих новых идей.

## Глава 9

### ПРИНЦИП ВНЕШНЕГО ДОПОЛНЕНИЯ

Работы таких ученых, как Гёдель, над проблемами типа проблемы неполноты формальных языков велись в совершенно новой области. Ибо, действительно, разве можно говорить о математике в прежнем смысле, если она занимается уже не *просто* математическими операциями, а стремится выяснить, что она может и чего не может утверждать. Один из первых создателей этой новой области — Гильберт (Hilbert) назвал ее метаматикой или теорией доказательств. Второй термин полностью объясняет содержание предмета, само возникновение которого связано с постановкой вопросов о

«доказуемости». Термин **метаматематика** подразумевает, что язык, на котором мы обсуждаем, например, неразрешимость предложения, не является тем же языком, которым это предложение написано, а представляет собой язык высшего порядка, называемый **метаязыком**.

Необходимо подчеркнуть, что систематическое рассмотрение этих проблем в логике в настоящее время тесно переплелось с математической теорией множеств, которая сама по себе имеет непосредственную связь с кибернетикой. Теория множеств дает многие средства, необходимые для описания систем и их преобразований, а также для исследования таких вопросов, как изоморфизм, о котором упоминалось выше. Кибернетики широко воспользовались как той частью теории множеств, которая рассматривает множество *точек* и входит в топологию, так и другой, которая исследует *абстрактные* множества в чистой алгебре. Здесь мы вплотную подходим к работам современных математиков, в числе которых следует назвать такие имена, как Бурбаки (Bourbaki) во Франции (общий псевдоним группы ученых) и Клини в США, внесших существенный вклад в обе части теории множеств.

В этой главе мы хотим изложить основную идею нового принципа, получившего название принципа внешнего дополнения. Эта идея связана как с метаматематикой, так и с теорией «черного ящика». Я хочу проиллюстрировать эту идею на конкретном примере из моего собственного опыта. На одном металлургическом заводе методами теории исследования операций была проведена научно-исследовательская работа, охватывающая ряд производственных процессов, целью которой была разработка приспособляющейся системы управления производством. Эта работа была выполнена в рамках программы исследования производства методами теории исследования операций, отчет о работе опубликован в журнале «Applied Statistics» [11]. Здесь же мы намереваемся рассмотреть структуру этой системы с кибернетической точки зрения. Первоначально была принята схема для анализа производства, приведенная на рис. 3. В основу построения этой схемы были положены следующие соображения.

На реальное производство влияет сложная окружающая среда, обозначенная на схеме прямоугольником, названным «действительные факторы». На основании изучения окружающей среды была построена в виде формулы математическая модель, отображающая факторы, влияющие на производство. На схеме связь модели с действительными факторами представлена пунктирной линией со знаком  $A$ , указывающим на приближенное соответствие модели и реальной действительности.

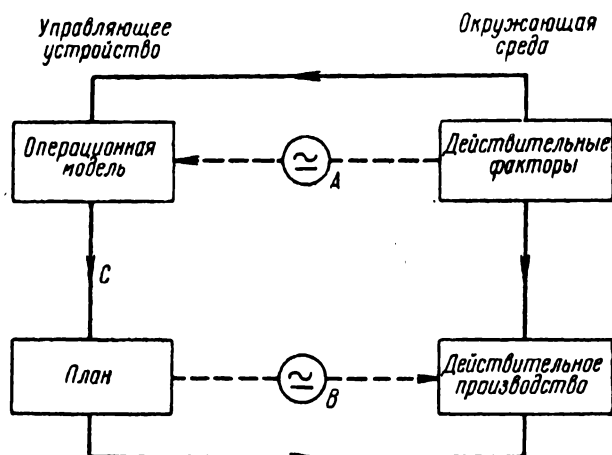


Рис. 3.

Далее, были разработаны методы составления производственного плана на основании этой модели. При этом, естественно, предусматривалось, что план может быть реализован в действительном производстве. Эта связь представлена пунктирной линией со знаком приближенного соответствия  $B$ . Таким образом, в той части схемы, которая соответствует реальной действительности, показаны факторы окружающей среды, влияющие на производство, а в части схемы, изображающей управляющие устройства, представлено аналогичное отношение, т. е. операционная модель, влияющая на план. Далее, план воплощается в производстве, что обозначено жирной сплошной линией в нижней части схемы. Итак, пока что как будто все обстоит благополучно. Однако если бы факторы окружающей среды, влияющие на

производство, существенно изменились, то возникла бы необходимость соответственно изменить операционную модель. Предусмотренный с этой целью механизм представлен в виде обратной связи в верхней части схемы.

Такая система планирования, очевидно, обладает способностью управления. Действительно, если приближенное соответствие, обозначенное *A*, в среднем отображает реальную действительность, то и план, рассматриваемый как аппроксимация *B* действительного производства, также в среднем будет вполне осуществим. Более того, такая ситуация является устойчивой, поскольку любое серьезное возмущение в окружающей среде, которое влияет на производство, будет через цепь обратной связи подстраивать операционную модель, что, в свою очередь, повлечет соответствующее изменение плана, восстанавливая приближенное соответствие *B*. Поскольку имеется механизм обратной связи, соединяющий реальные факторы с операционной моделью, то, предполагая, что этот механизм является достаточно действенным, можно выразить устойчивость самого управляющего устройства через эффективность перехода от модели к плану по линии, обозначенной *C*. Таким образом, управляющее устройство можно считать устойчивым тогда, когда переход *C* выполняется идеальным образом.

Предположим, что условие устойчивости управляющего устройства всегда соблюдается. Рассмотрим теперь, что произойдет, если вмешается руководство предприятия и, исходя из конъюнктурных соображений, потребует внесения изменения в план. В этом случае измененный план также может быть реализован в производстве, но уже благодаря внутренним ресурсам самого производства и его хорошей организации непосредственно в цехах. В результате соответствие *B* сохраняется. Вся система продолжает безотказно работать, и вследствие того, что в факторах, непосредственно влияющих на производственные процессы в цехах, не произошло никаких изменений, на схеме совершенно справедливо не отражено влияние реального производства на реальную окружающую среду, а следовательно, отсутствует и обратная связь к операционной модели. Даже предположив, что такое вмешательство руководства в план

происходит постоянно, мы видим, что система остается устойчивой и никаких недоразумений не возникает. Однако беда заключается в том, что переход  $C$  уже не является прежним, а ведь устойчивость управляющей части определялась как раз через постоянство именно этого перехода. Получается, что на языке управляющей части системы наличие и отсутствие управления одно и то же, так как в пределах этого языка изменение во всей системе установить невозможно, оно неопределимо.

Можно указать много других видов возмущений, затрагивающих всю систему в целом, которые приводят к тому же результату: все продолжает обстоять благополучно с точки зрения управляемых процессов, но обнаруживается, что язык самого управляющего устройства страдает неполнотой. Опасности, скрытые в такой ситуации, достаточно очевидны. При проведении экспериментальных исследований на этой стадии в действительности наблюдалось, что при некоторых возмущениях, влияющих на производство, модель на него не реагировала, поскольку эта модель является абстракцией реальной действительности. Предполагалось, что рассматриваемая система может реагировать на такие возмущения, поскольку при инвариантности перехода  $C$  план производства должным образом не изменится, нарушится приближенное соответствие  $B$  и реализация плана не сможет быть осуществлена. Однако, поскольку одновременно на план влияли внешние для системы воздействия, обусловленные вмешательством руководства и возмущениями со стороны окружающей среды, возникли очень сложные и запутанные взаимодействия. Таким образом, оценить с какой-либо определенностью поведение системы стало совершенно невозможно. Система перешла в состояние, для которого язык управления стал совершенно неопределенным. Более того, развитая в метаматематике теория показывает, что любая попытка исправить положение за счет усовершенствования языка управляющей системы обречена на провал. Можно добиться того, что усовершенствованный язык даст лучшее описание системы, но нельзя гарантировать, что при использовании этого языка никогда не возникнет неразрешимой задачи.



На схеме (рис. 4) показано, как решается задача. Если язык управляющего устройства не может быть адекватным в силу теоремы неполноты, то его необходимо подчинить управлению извне, выражаемому языком высшего порядка, или метаязыком. В таком случае язык, при помощи которого выражается устойчивость управления в переходе  $C$ , можно непрерывно контролировать *извне* по отношению к самому управляющему

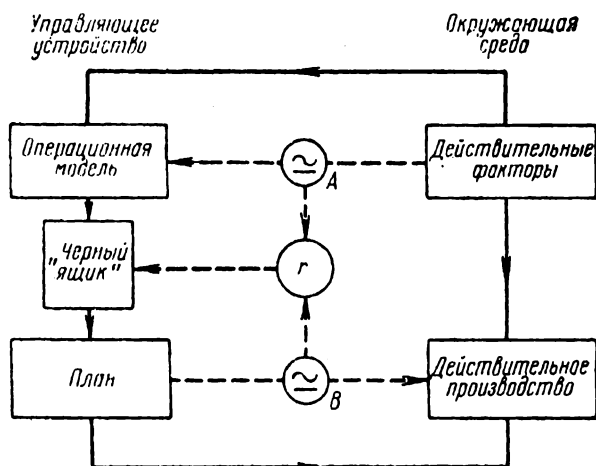


Рис. 4.

устройству. Чтобы выйти за рамки этого языка, но в то же время не оторваться от реальной системы, очень существенно привязаться к такому свойству системы, которое неразрывно связано с ее действительным существованием. Следовательно, бесполезно просто разрабатывать другой язык для описания реальной ситуации, ибо он в силу теоремы Гёделя также может содержать неразрешимые предложения. Совершенно очевидно, что решение проблемы заключено в примерном соответствии  $A$  и  $B$ , ибо эти звенья являются непосредственными мерами того, каким образом язык управления связан в обоих направлениях с реальными процессами производства, происходящими в цехах. Если система действительно устойчива, то  $A$  и  $B$ , как меры эффективности языка управления, применяемого для описания ситуа-

ции, будут коррелированы. При действии на систему возмущения эта корреляция, обозначенная на рис. 4 буквой  $r$ , будет изменяться. Если в системе управления предусмотрен контур обратной связи, обеспечивающий изменение перехода  $C$  от фиксированной операционной модели к вырабатываемому плану в соответствии с изменением корреляции  $r$ , то язык управления не будет более неразрешимым.

Необходимо сразу подчеркнуть, что корреляция  $r$  сама по себе не может быть описана в терминах каких-либо параметров системы, так как она описывает поведение самой управляющей части. Таким образом, с полным основанием можно считать, что информация, поступающая в план по этому новому контуру обратной связи, представляет собой выход «черного ящика». Язык управления, в который вводится эта новая информация, очевидно, не способен оценить поведение  $r$ , ибо  $r$  относится именно к тем элементам всей системы, которые неразрешимы для языка управления. В практическом исследовании, пример которого здесь приводится, было принято именно такое решение, т. е. был разработан метод измерения  $r$  и введения результатов этих измерений в переход  $C$ . Только после этого задача была успешно решена.

Приведенные рассуждения, а также рассмотрение практического примера позволяют сформулировать один из принципов прикладной кибернетики. Этот принцип сводится к тому, что в силу теоремы неполноты Гёделя любой язык управления в конечном счете недостаточен для выполнения поставленных перед ним задач, но этот недостаток может быть устранен благодаря включению «черного ящика» в цепь управления. Назначение «черного ящика» состоит именно в том, чтобы формулировать решения, выражаемые языком более высокого порядка, которые по определению, конечно, не могут быть выражены в терминах управления. При этом указанные решения призваны устранять недостатки первоначально созданной машины, принимающей решения. Насколько мне известно, этот принцип в прикладной кибернетике до сих пор еще никем не формулировался и, кроме того, он вообще использовался только в экспериментальных

(ручных) моделях систем управления, о которых шла речь выше. Однако я глубоко убежден, что для построения истинных кибернетических машин, предназначенных для выработки стратегических решений, затрагивающих все производство, этот принцип будет необходим. Я называю его **принципом внешнего дополнения**, ибо он представляет собой практический метод преодоления следствий теоремы неполноты. Для того чтобы подобрать «ключ» к реальной действительности, которую мы стремимся описать неразрешимым языком, необходимо дополнить этот язык принципиально неопределимым «черным ящиком».

Если такая трактовка трудна для понимания, то ее можно пояснить аналогией из элементарной логики. Предположим, что я не понимаю значения слова «сфера». Я справляюсь в словаре и нахожу, что в нем дается значение «шар». Но я не понимаю и этого слова и смотрю теперь словарь на слово «шар». На этот раз я нахожу значение «сфера». Таким образом, получается порочный круг. Этот язык мне ровно ничего не сообщает. Порочный круг необходимо где-то разорвать. Кто-либо показывает мяч, говоря: «Вот вам шар, или сфера». Мы называем такое определение демонстрационным. «Ключ» к языку найден в реальной действительности. Аналогичным образом принцип «внешнего дополнения» вводит факты промышленной жизни в неполный язык управления, который ее описывает. Но в этом случае следует ожидать, что сам новый элемент не поддается точному определению. Другими словами, следует ожидать, что этот новый элемент будет не чем иным, как «черным ящиком».

## Глава 10

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

В последней главе рассматривалось одно из направлений развития логики, имеющее значение для кибернетики. Второе направление, которому посвящена настоящая глава, связано с двоичной системой счисления.

В настоящее время уже общеизвестно, что арифметические действия, обычно производящиеся в десятичной системе счисления (т. е. при основании десять), можно столь же успешно производить при *любом* основании. Число единиц, накапливающихся в каждом значащем разряде числа до переноса единицы в следующий разряд, определяется в конечном счете традицией. В кибернетике применяется двоичная система счисления, т. е. в каждом разряде могут стоять только 0 и 1. Это представление усвоить очень просто, но идея, заложенная в двоичной системе счисления, гораздо более глубока, плодотворна и обоснована, чем это обычно принято считать. Поэтому целесообразно остановиться на ней более подробно.

Многие, в том числе и некоторые специалисты, освоившие двоичное счисление для программирования электронных вычислительных машин, считают, что единственная причина использования этой системы счисления заключается в ограничениях вычислительной техники, ибо проще построить вычислительную машину, которая распознает два состояния, чем машину, распознающую десять состояний. Если для ввода информации в машину применяют перфокарты или перфоленту, то они образуют слой изоляции между электрическими или фоточувствительными контактами. Изоляция нарушается отверстиями. В любой момент времени контакт либо замкнут, либо нет, что соответствует условию «все или ничего». Очевидно, такой принцип очень удобен. Возможно, это и было единственным соображением, которым руководствовались изобретатели аппаратуры для перфокарт. Однако в этом принципе скрыто гораздо более глубокое содержание. Если можно признать, что удобство явилось первым существенным соображением, обусловившим применение двоичного счисления, то следует рассмотреть по крайней мере еще четыре других.

Одно из них уже было разъяснено при рассмотрении «черного ящика». При создании кибернетических машин, от вычислительных до мыслящих, нас интересует переработка информации внутри машины. Этот процесс всегда связан с выбором одной возможности из целого

ряда, а энтропия выбора определяет к. п. д. машины (с точки зрения теории информации). Выше было показано, что процесс поиска на основе дихотомии обеспечивает максимизацию энтропии при заданном объеме поиска. Отсюда следует, что если машина предназначена для универсального использования, то ее описание в терминах двоичных операций является идеальным. Это соображение следует иметь в виду при рассмотрении возможности построения общей теории таких машин. Иногда, когда пишут о развитии кибернетики, утверждают, что описание, данное Тьюрингом (Turing) универсальному автомату (здесь мы отсылаем к примеру, рассматриваемому в следующей главе), является фантастичным или, во всяком случае, произвольным и не изящным, ибо Тьюринг пользуется исключительно двоичным счислением.

Однако такое утверждение не соответствует истине, а подходя с точки зрения энтропии, можно установить, что такое описание, во всяком случае, является экономичным.

Следующее обоснование использования двоичного счисления в кибернетике, тесно связанное с только что рассмотренным, принадлежит Винеру [1]. Однако на этот раз нас интересует не проблема выбора, а экономичность записи или регистрации. Хранение чисел в машине необходимо производить при минимальных затратах. Винер показывает, что если распределить информацию по  $N$  разрядам, то, определив

$$x = \frac{1}{N} \log 2,$$

мы получим минимальные затраты при

$$x = 1 - e^{-x}.$$

Этот критерий выполняется, когда  $x=0$ , что соответствует  $N=\infty$ . Таким образом,  $N$  должно быть по возможности большим. Располагая унитарной системой чисел, т. е. такой системой, в которой каждая цифра имеет только одно возможное значение, можно в соответствии с выводом Винера распределить информацию

по бесконечному числу разрядов. Однако поскольку в унитарной системе невозможно представить альтернативные состояния, то каждый разряд вовсе не будет содержать информации. Таким образом, естественной оптимальной системой с этой точки зрения является двоичная, в которой каждый разряд имеет всего два состояния, а следовательно, число разрядов является наибольшим из практически возможного. Следовательно, двоичная система счисления является наиболее экономичным средством записи чисел.

Мы начали с практических соображений, обусловивших принятие двоичной системы, а затем рассмотрели два теоретических положения, вытекающих из теории информации. Третье обоснование еще глубже и связано с чистой логикой, что возвращает нас к булевой алгебре. О Джордже Буле (1815—1864) мы уже упоминали, когда рассматривали развитие логических теорий, лежащих в основе кибернетики. Он был уроженцем Линкольна, и его блестящий, оригинальный ум был совершенно самобытным, ибо он не получил официального университетского образования. Сам Буль иногда жаловался, что из-за отсутствия руководства ему пришлось потратить много лет жизни зря, но, с другой стороны, над развитием его образа мыслей не довлела ни одна ортодоксальная школа, от чего наука только выиграла. Однако, как бы то ни было, за свою короткую жизнь Буль добился высших научных отличий. К концу жизни он уже возглавлял кафедру математики в Куинз Колледж в Корке.

Область интересов Буля, так же как и ряда других ученых, о которых мы уже говорили, была сосредоточена на математике и логике и в первую очередь на возможности сведения словесной логики к математической. Ему удалось построить алгебру с формальными правилами, с помощью которой можно выразить любое высказывание, облеченное в словесную форму. Так, например, можно принять, что  $x$  = «идет дождь», а  $y$  = «идет град». Тогда произведение  $xy$  будет означать, что «идет дождь и град». После перевода таких обыденных словесных выражений в математические символы алгебра полностью вступает в свои права и выводы получаются уже чисто

математическими средствами. В начальный период исследования перед Булем возникла следующая проблема. В логике существует закон тождества, который просто утверждает, что вещь является самой собой. Алгебраически этот закон выражается равенством  $x=x$  (тождеством), и никто против этого не возражает. Если в обычной речи мы повторяем одно и то же дважды, то *смысл* наших слов от этого не меняется. Этим мы можем лишь усилить высказывание, но формальные свойства утверждения «идет дождь, идет дождь» ничем не отличаются от свойств однократного утверждения «идет дождь». Однако в булевой алгебре закон тождества необходимо было преобразовать, чтобы учесть, что  $x=x$  и  $xx=x$ . Последнее выражение недопустимо в обычной алгебре, в которой  $x^2=x$  представляет собой бессмыслицу. Более того, словесное выражение не меняет смысла от бесконечного повторения утверждения «идет дождь», так что в общем виде в алгебре логики получается, что  $x^n=x$ . Эту аксиому необходимо было принять в логической алгебре, хотя для обычной алгебры она совершенно неприемлема. В этом и заключалась проблема, которую должен был решить Буль.

Однако Буль заметил, что это противоречие с классической алгеброй можно снять, если наложить определенные условия на численную интерпретацию всей построенной им алгебры. Поэтому он ввел необходимое ограничение, заключающееся в том, что все алгебраические переменные могут принимать только два численных значения: 0 и 1. При этом условии равенство  $x^n=x$  справедливо. Такое построение булевой алгебры полностью соответствует всей истории логики, начиная с Аристотеля, ибо логики всегда стремились сформулировать свои высказывания так, чтобы их можно было считать либо истинными, либо ложными, т. е. принять или отвергнуть. Нуль в алгебре Буля соответствует отрицанию, единица — утверждению. Следовательно,  $x=1$  означает «идет дождь», а  $y=0$  означает «града нет». Вскоре Булю удалось разработать весьма совершенный математико-логический аппарат, основанный на этом принципе. Так, например, выражение  $(1-x)y=1$  означает «град идет, но дождя нет», а  $(1-x)(1-y)=1$  выра-

жает суждение «нет ни дождя, ни града». Более сложное суждение «либо идет дождь и град, либо нет ни дождя, ни града» записывается следующим образом:

$$xy + (1 - x)(1 - y) = 1.$$

Мы вполне достаточно осветили общий метод Буля, и теперь, пожалуй, можно себе представить, что справедливость сложных рассуждений может быть, таким образом, исследована алгебраически. Этот же метод, по существу, можно использовать в промышленных исследованиях, проводимых при помощи теории исследования операций. Так, я с удовлетворением отмечаю, что Соупер (Soper) [12] использовал алгебру Буля в чистом виде для того, чтобы разобраться в целом ряде промышленных задач, связанных, например, с обоснованным применением чрезвычайно запутанных технических условий или с четким определением круга обязанностей руководителей производства на различных уровнях. Однако мы не можем, к сожалению, углубляться далее в эти общие вопросы, которые были затронуты только с единственной целью установить семантическую основу двоичного счисления. Теперь роль системы 0, 1 для кибернетики, очевидно, гораздо более ясна.

Наконец, в нашем заключительном замечании относительно двоичного счисления мы коснемся настолько сложной проблемы, что ее невозможно рассмотреть достаточно полно. Тем не менее о ней необходимо хотя бы упомянуть, во-первых, в силу ее прямой связи с двоичным счислением и, во-вторых, чтобы ответить на ряд вопросов, оставшихся после рассмотрения неразрешимых предложений. С этой целью нам следует вернуться к «парадоксу лжеца» или в общем виде к парадоксу о множестве всех множеств, не содержащих самих себя в качестве элемента. Мы надеемся, что значение этой проблемы для кибернетики теперь очевидно. В нескольких словах задача сводится к построению такой кибернетической машины, которая предназначена для воспроизведения или усиления умственных способностей человека путем моделирования какого-либо аспекта функций мозга. В основе такой машины должна лежать безупречная логика. Поэтому теорема неполноты для киберне-



тики представляет вовсе не чисто академический интерес, а таит в себе реальную опасность разрушения всей кибернетической системы. При этом, как мы видели на примере системы управления производством, эта опасность может даже остаться необнаруженной. Существует несколько путей, позволяющих обойти указанный парадокс.

Прежде всего, неполный язык может быть заключен в язык более высокого порядка — в метаязык. Этот путь был использован в приведенном нами примере, и, как и следовало ожидать, результат с точки зрения подхода изнутри языка управления был неопределимым и представлял собой «черный ящик». Такой подход основан на исчерпывающе развитой Расселом логической теории типов, в которой целые классы предметов, принадлежащие к одному типу, являются всего лишь членами класса, принадлежащего к другому типу. Эта теория имеет несколько разновидностей, но суть сводится к тому, что «коварный» парадокс стремятся обойти, ограничив круг допустимых в данном языке высказываний. Таким образом, неразрешимые предложения просто не высказываются, а то, что требуется сказать, говорится в форме высказываний *о языке-объекте* извне.

Второй, совершенно отличный метод заключается в том, чтобы изменить саму структуру парадокса, которая в конечном счете сводится к утверждению, что *либо* высказывание истинно (по отношению к самому себе), *либо* ложно. Такую структуру построения высказываний можно проследить во всей истории логики, в которой любое высказывание должно быть истинным или ложным. Но стоит нам согласиться, что могут существовать суждения, которые не являются ни истинными, ни ложными, а какими-то еще, как от парадокса ничего не остается. Этот метод лежит в основе так называемой интуитивной логики, связанной с именем Броувера (Brouwer). Он представляет значительный интерес для логиков, но играет гораздо менее важную роль в кибернетике, где, как было показано, весьма выгодно применение двоичного счисления, которое допускает только двужначную («истинно или ложно») логику. Трехзначная, или трехвалентная, логика потребовала бы исполь-

зования менее выгодной системы счисления, а  $n$ -валентная логика была бы еще менее целесообразна с точки зрения энтропии выбора и экономичности представления чисел в машине.

Теперь мы подошли к третьему возможному методу, связанному прежде всего с именем Сколема (Skolem), создателя теории рекурсивных функций. Представим себе, что словесный парадокс, который мы обсуждаем, преобразован в числовую форму одним из известных нам методов (например, посредством булевой алгебры, или метода Гёделя, или любым другим методом). Тогда парадокс будет уже представлять собой число, выраженное само через себя и содержащее внутреннее противоречие. Однако, пользуясь методами теории рекурсивных функций, можно дать новое определение числа, которое ни в коей мере не связано с парадоксом, ибо теория рекурсивных функций не признает существования числа в явном виде. Вместо числа вводится *процесс*, при помощи которого последовательно перебирается целый класс чисел, одним из экземпляров которого и является наше число. Таким образом, по сути дела (трудность словесного пояснения этого вопроса очевидна), предусматривается обоснованная процедура, которая обеспечивает нам то, что мы просто «натыкаемся» на нужное число, а не провозглашаем его существования. Такой динамический, операционный подход полностью выдержан в духе кибернетики. Логiku машины можно рассматривать как семантический континуум, и в ней попросту отсутствуют фиксированные детерминированные классы, принадлежащие или не принадлежащие самим себе.

Помимо того, что теория рекурсивных функций дает удовлетворительный метод для подхода к задачам неразрешимости в языках управления кибернетических систем, она обладает еще одной интересной особенностью. Определяя число при помощи рекурсивной формулы, мы, по существу, задаем процесс, в результате которого (как мы уже отметили выше) мы неизбежно наткнемся на это число. Чтобы реализовать этот процесс, мы начинаем с произвольного переменного  $x$  и многократно применяем к нему правило: заменить  $x$  на

$x+1$ . Таким образом, чтобы определить число 6 при помощи рекурсивной формулы, можно было бы задаться правилом  $x+1+1+1$ , приняв  $x$  за 3. Но число 3, в свою очередь, необходимо определить, возможно, как  $x+1+1$ , где  $x=1$ . Что же в таком случае представляет собой число 1? Очевидно, что это  $x+1$ , где  $x=0$ . Таким образом, операции теории рекурсивных функций сводятся к логической последовательности воспроизведения чисел путем многократного применения всего двух правил: заменяй  $x$  на  $x+1$  и в последнем шаге замени  $x$  нулем. Следовательно, весь математический аппарат сводится к двум символам: 0 и 1. (Особое значение этого процесса для кибернетических машин будет показано в следующей главе.)

Итак, мы снова показали, что двоичное счисление является наилучшим аппаратом для переработки как логической, так и математической информации. На этот раз наиболее очевидно выступает возможность обойти проблему неразрешимого предложения именно за счет использования двоичного счисления. На этом можно и закончить рассмотрение того круга идей, который возник в связи с «парадоксом лжеца», высказанным в глубокой древности и представляющим собой одну из сложнейших проблем современной кибернетики.

## Глава II

### ТЕОРИЯ АВТОМАТОВ

Что такое машина? В настоящей книге этот термин употребляется в особом значении. В кибернетике мы представляем себе машину вовсе не как систему рычагов, колес и прочих механических деталей. Машина есть система, предназначенная для достижения какой-либо цели, и поэтому кибернетики стремятся прежде всего выяснить, насколько полно машины могут выполнять такие присущие живым организмам функции, как, например, обучение или распознавание образов. Вполне закономерно, что прикладная кибернетика работает над созданием таких машин, но любая подлинная наука должна иметь в своей теоретической основе доказатель-

ства того, в каких пределах эта работа логически возможна. Чтобы вести исследования в этом направлении, необходимо прежде всего определить тип машины, который мы будем обсуждать. Мы уже согласились, что не будем подразумевать под машиной реальную конструкцию. Наша машина будет представлять собой операционное описание в логических терминах системы, способной осуществлять минимальный объем преобразований, необходимых для выполнения кибернетических функций. В настоящее время известно два типа таких машин, называемых автоматами; при их исследовании в кибернетике были доказаны теоремы, которые внесли ясность в проблему оценки возможностей машин вообще. Пожалуй, можно даже сказать, что эти теоремы показывают, насколько наивны и необоснованны были интуитивные представления о предполагаемых ограничениях возможностей машин, в то время как многие из этих ограничений на самом деле вовсе не существуют. И что самое главное, было доказано, что сложность и возможности машины в конечном счете не ограничены уровнем умственных способностей ее создателя. Этот вывод, по моему мнению, более убедительно, чем все другие доводы, свидетельствует, насколько велика роль кибернетики. Он вытекает из изучения автоматов первого типа. Изучение автоматов второго типа позволяет сделать выводы о пределах точности переработки информации по отношению к уже содержащейся в системе и по отношению к масштабу времени, в котором работает система. Таким образом, мы приходим к формальному анализу ошибок в машине. Кибернетика, пожалуй, впервые в истории науки рассматривает не «совершенную» модель, в отношении которой предполагается полное отсутствие ошибок, а исходит из того, что любой системе присущи ошибки, отказы и случайные возмущения, и показывает, каким образом все это можно учесть при построении машины. Отсюда вытекает другой поразительный вывод, имеющий огромное значение. Этот вывод сводится к тому, что можно построить машину так, чтобы она правильно функционировала при любом уровне помех. В настоящее время у нас есть строгое доказательство, что выход такой машины можно

сделать сколь угодно точным и надежным независимо от степени надежности элементов машины или схемы их соединения.

Столь глубокие и неожиданные выводы нельзя оставить без внимания, и, хотя их подробные доказательства мы привести здесь не можем, мы считаем необходимым изложить их суть, так как вряд ли можно требовать, чтобы читатель поверил нам на слово. Что же представляют собой автоматы, изучение которых играет столь существенную роль? К автоматам первого типа относятся так называемые машины Тьюринга, автоматы второго типа основаны на логических сетях. Одна из главных причин, в силу которых мы уделили так много внимания рассмотрению логических основ кибернетики, заключается как раз в том, что мы хотели достаточно полно ознакомить читателя с общим кругом идей и терминологией, чтобы перейти к изложению общей теории автоматов. При этом мы стремимся показать, почему эти необычные машины обладают столь большой общностью, что их анализ дает основу для построения такой теории, и дать возможность читателю усвоить смысл самих выводов этой теории (коль скоро мы не можем дать их строгих доказательств). Не ознакомившись со всем этим материалом, нельзя по-настоящему понять, почему эти два типа машин вообще представляют какой-либо интерес. Еще менее было бы понятно общее значение теорем, доказанных относительно этих машин. Таким образом, в этой главе мы и рассмотрим два упомянутых выше типа автоматов.

## МАШИНЫ ТЬЮРИНГА

Качественная информация, содержащаяся в словесных высказываниях, может быть сведена (как было показано выше при помощи булевой алгебры) к двоичной форме. Количественная информация, содержащаяся в математических выкладках, тоже может быть сведена (посредством скалярных преобразований) к двоичной форме. Короче говоря, пользуясь двоичным счислением (битами), можно всегда выразить любую информацию вполне адекватно и абсолютно эффективно (последнее

вытекает из соображения максимизации энтропии). Следовательно, нет ничего удивительного в том, что кибернетическая машина будет работать в битах. Функции такой машины должны осуществляться наиболее рационально, а мы уже знаем, что этого можно достичь, только построив машину, работа которой имеет форму двоичных решений.

После этого небольшого вступления приступим к описанию принципа нашей машины, руководствуясь изложенными ранее кибернетическими методами. Прежде всего, машина будет представлять собой физическую систему, а следовательно, будет иметь конечные размеры и конечное число элементов. Мы будем характеризовать ее способностью существовать в одном из ряда состояний. Этот ряд будет конечным, ибо состояния представляют собой различные комбинации конечного числа элементов. Работа машины будет заключаться в переходе из одного состояния в другое. Если такая машина предназначена для выполнения каких-либо полезных функций, а не для работы «вхолостую», то изменение состояния должно быть результатом каких-то внешних по отношению к машине событий, представляемых ей. Каким же образом должна узнавать машина о внешних событиях? Очевидно, их необходимо представлять в двоичной форме. Таким образом, если в машину вводится бесконечная лента, на которой в один ряд напечатана последовательность нулей и единиц, то любая окружающая обстановка может быть закодирована и представлена машине. Но машина должна также иметь устройство для «чтения» такой ленты, поэтому мы снабдим ее необходимыми средствами для определения того, является ли данный символ на ленте нулем или единицей.

Далее, внешние события должны определять работу машины; поэтому мы должны предусмотреть, чтобы, считав данный символ, машина изменила свое состояние. Но машина должна также, по существу, взаимодействовать с окружающей средой; поэтому, считав символ, она должна передвинуть ленту и предпринять сама какое-либо действие. Машина может сдвигать ленту только на одну клетку влево или вправо (необхо-

димости для более сложных движений нет, ибо такой выбор, характеризуясь высокой энтропией, является весьма экономичным и можно показать, что он вполне достаточен) и затем сама печатать символ. Это означает, что она может как бы подтверждать то, что уже имеется в новой клетке, или печатать единицу там, где ничего нет, или, наконец, стирать единицу, оставляя пустую клетку. Обработанная таким образом лента становится выходом машины. Естественно, что ее можно подать на вход машины как информацию об исходном начальном состоянии окружающей среды, с которого машина начала работать.

Такова машина Тьюринга. Она может служить прообразом любой машины, ибо совершенно очевидно, что любую машину можно свести к такой схеме. Подведем некоторые итоги: мы определили машину как устройство, которое способно обнаруживать событие, происходящее вне его, изменять свое собственное состояние, изменять свое положение, чтобы обнаружить другое событие, и предпринимать действия, которые влияют на то, что происходит вне его. Такому описанию может отвечать пишущая машинка, морская звезда, паровой молот или мозг. Но задумаемся в то, что же нам дает такое формальное описание. Машина представляет собой *множество* состояний, подвергающихся *преобразованиям*; она перерабатывает *информацию* исключительно в форме *двоичных символов*; ее собственное внутреннее поведение полностью описывается *двухвалентной логикой*, и, наконец, вся работа машины может быть определена в виде *рекурсивного процесса*. Я намеренно выделил эти ключевые слова, чтобы еще раз напомнить, каким богатством теории и методов, скрывающимся за этими понятиями, мы располагаем. Таким образом, это формальное представление автомата играет важнейшую роль. В нем заключено гораздо больше, чем представляется на первый взгляд.

Здесь уместно сказать несколько слов в порядке исторической справки. Машина Тьюринга названа по имени английского математика и логика А. М. Тьюринга. Он дал ее описание в знаменитой работе [13], опубликованной в 1936 году, в которой он ставил пред собой

непосредственную задачу доказать, что некоторые положения математической логики вообще недоказуемы. В такой постановке задачи есть очевидное сходство с теоремой неполноты Гёделя, хотя проблема, которую сформулировал Гильберт и решил Тьюринг, была значительно сложнее. Однако, начав с этой проблемы, Тьюринг, как теперь стало очевидным, достиг еще более важных результатов. Рассматривая эти результаты, мы должны обратить внимание на то, что Тьюринг занимался «вычислимыми числами», т. е. он исследовал возможность вычисления различных видов математических рядов. Кибернетика по-новому осмыслила эту работу, ибо бесконечный ряд 0 и 1 (который Тьюринг считал двоичным разложением действительных чисел) может, как нам известно, представлять информацию об окружающей среде. Исследуя свою проблему в терминах идеализированной машины, Тьюринг одновременно доказал, что машина с такими характеристиками действительно может быть построена.

Предположим теперь, что машине Тьюринга задается некоторый ряд, который вводится в нее на ленте в форме конечной последовательности двоичных символов, достаточной для определения бесконечного ряда. Может ли машина Тьюринга, пользуясь только теми операциями, о которых мы уже говорили, успешно «овладеть» таким рядом? Я употребляю выражение «овладеть», чтобы передать мысль, что машина должна настроить себя на этот ряд таким образом, чтобы продолжать печатать на ленте последующие члены ряда в течение неопределенного промежутка времени. Тьюринг показал, что его машина может выполнить такую задачу *для любого ряда, который может быть произведен любой другой машиной*. На основании этого вывода Тьюринг назвал свою машину «универсальным автоматом».

Полученные Тьюрингом результаты поистине удивительны. Его машина представляет собой простое и небольшое устройство, но если ввести в нее полное описание ряда, который произвела гораздо более сложная машина, ряда настолько сложного, что даже человеческий ум не может выявить закон его образования, то машина Тьюринга все-таки способна «овладеть» им и



продолжить его. Таким образом, она, по существу, способна «преобразовать себя» в более сложную машину, поскольку она может выполнять функции этой сложной машины. Мы уже обосновали высказанное выше утверждение о том, что возможности машины не ограничены, как обычно принято считать, умственными способностями ее создателей. Однако этого мало. Здесь мы должны перейти от Тьюринга к выдающемуся американскому математику Джону фон Нейману (John von Neumann). В 1948 году, поставив вопрос, почему все приведенные выше рассуждения ограничиваются только вычислительными машинами, он тем самым расширил сферу применения этих идей, осмыслив их с позиций кибернетики [14]. Джон фон Нейман распространил доказанные теоремы на машины, управляющие созданием других машин.

Мы уже говорили, что в машине Тьюринга имеется конечное число элементов. Дж. фон Нейман предложил поместить большое число таких элементов в резервуар и поставить в центре резервуара машину Тьюринга, которая на этот раз настроена на «овладение» не числовым рядом, предложенным ей, а рядом, образуемым ее собственными операциями, которые подробно указаны для каждого элемента. Выходом такого автомата в этом случае является лента, дающая описание самого автомата. Этот выход принадлежит, очевидно, к классу «вычислимых чисел» Тьюринга. Но если можно построить автомат, способный выполнять такие функции, а мы убедились в том, что это возможно, то тогда можно построить и такой автомат, который вместо ленты будет создавать *подобные себе машины*. Для этого необходимо только, чтобы процесс «овладения» был направлен не на печатание символов на ленте, а на элементы в резервуаре. Безусловно, для осуществления этой идеи требуется решить немало технических проблем. Но Дж. фон Нейман показал, что выводы, полученные Тьюрингом, означают, что логически можно создать самовоспроизводящую машину.

Однако этим не исчерпываются работы Дж. фон Неймана. Если в машину Тьюринга вводится описание гораздо более сложной машины, представляющее собой

выход этой машины, воспроизводящей свое собственное описание, то более простая машина может «овладеть» и этим описанием. Таким образом, если в резервуаре имеются элементы сложной машины, то машина Тьюринга может построить также и эту более сложную машину. В нашем изложении мы, естественно, опускаем подробные доказательства, но существо работ Дж. фон Неймана сводится к тому, что построить машину, способную воспроизводить более сложные машины, логически возможно.

Любопытно, что этот вывод, к которому пришли два выдающихся ума нашей эпохи, воспринимается с таким трудом. Тьюринга и Дж. фон Неймана уже нет в живых. То, что они сделали для науки, является объективным достижением, на значение которого уже не могут повлиять научный авторитет и личные качества: в нем заключены уже не догадки, а строгие доказательства. Нет никакого сомнения в том, что теоремы, лежащие в основе приведенных рассуждений, справедливы. Поэтому интересно рассмотреть вопрос: почему же так трудно согласиться с вытекающими из них выводами? Я считаю, что ответ на него достаточно прост, и излагаю его в терминах теории исследования операций.

Мы считаем идею, что машина может произвести другую машину, более сложную, чем она сама, столь необычной потому, что исходим в своих рассуждениях из неверной аналогии. Мы утверждаем, что машина является продуктом техники и подчиняется физическим законам. Невозможно получить от машины больше, чем в нее заложено. Нельзя даже получить и того, что заложено, ибо при преобразовании энергии неизбежны потери, обусловленные несовершенством конструкции и потерями тепла. Все это, конечно, справедливо. Очень может быть, что если рассматривать машину Тьюринга с точки зрения теплового двигателя, то она окажется весьма неэкономичной. Но кибернетика оперирует с машинами не как с механическими конструкциями, а как с системами для переработки информации, как с организмами в некоторой окружающей среде. Поэтому, когда мы говорим о «машине», совершенно неправильно проводить при этом аналогию с тепловым двигателем. Как

уже указывалось в начале этой части, посвященной логическим основам кибернетики, безоговорочное причисление всех машин к «неодушевленной» части дихотомии «одушевленные/неодушевленные системы» является чисто исторической случайностью.

Наиболее наглядную аналогию для ответа на поставленный вопрос можно найти в биологии. Вся история эволюции свидетельствует о наличии естественного процесса развития от простого к более сложному. В частности, развитие каждой отдельной особи является эволюцией единичной клетки к целому организму, состоящему из многих миллионов клеток. Если исходить из такой точки зрения, пользуясь в качестве аналогии живым организмом, то результаты, к которым мы пришли, перестают казаться непостижимыми. К ним начинают относиться так же, как и ко всем выдающимся открытиям, говоря: «Это же так очевидно, почему же я не замечал этого раньше?» Сопоставление машины с биологической моделью, которое отнюдь не следует интерпретировать как перенос на машину какой-то таинственной жизненной силы, дает нам ценный изоморфизм. Из работы Дж. фон Неймана видно, как он прослеживает аналогию между программой воспроизводства машины и программами генетического воспроизводства и выделяет ту часть программы машины, которая (здесь я цитирую его дословно) «в основном выполняет функцию генов».

Теперь следует вновь вернуться к машине Тьюринга (которая представляет собой пример логической машины, а не механической конструкции) и к ее роли в истории логики. Удивительная экономичность этого устройства, его простота и изящество, а также необычайная способность находить решения, которые даже нельзя было ранее себе представить, — все эти качества невозможно по достоинству оценить, если не подойти к ним с точки зрения чистой логики. Мы посвятили целую главу эффективности двоичной системы счисления, чтобы дать возможность читателю самому оценить способность машины Тьюринга переребатывать информацию, а также применяемый в ней метод поиска с максимизацией энтропии и прежде всего понять метод рекурсив-

ного определения, используемый для решения чрезвычайно сложных и трудно анализируемых задач. Машина Тьюринга обладает столь колоссальными возможностями именно потому, что она опирается на такой теоретический фундамент. Это изобретение можно рассматривать с таким же благоговейным трепетом и удивлением, как шедевр искусства.

Эти предварительные выводы относительно возможностей автоматов приводятся только с точки зрения их исторической роли для кибернетики. Мы отнюдь не хотим создать у читателя впечатление, что мы вводим его в какой-то кошмарный мир научной фантастики, в котором машины «размножаются» и развиваются, приобретая при этом какие-то все более и более устрашающие формы. Нам неизвестно, потребуется ли человеку когда-нибудь создавать машины такого типа, а также удастся ли ему преодолеть технические трудности, стоящие на этом пути, если он возьмется за эту задачу. Однако мы твердо убеждены в том, что выдающиеся работы, которые мы только что описали, являются лишь первыми результатами кибернетической программы исследования возможностей машин при помощи строго научных методов. Эти работы привели к тому, что были наконец разрушены преграды, в течение сотен лет стоявшие на пути развития научной мысли.

## КОНЕЧНЫЕ АВТОМАТЫ

Первый тип автомата, который мы кратко рассмотрели (машины Тьюринга), имеет конечное число элементов и является автоматом с конечным числом состояний, но, строго говоря, он представляет собой бесконечный автомат, так как длина ленты, с которой он оперирует, не определена и она может непрерывно вводиться в машину в течение неограниченного времени. В противоположность этому второй тип автоматов, к рассмотрению которого мы сейчас перейдем, является принципиально конечным. Начнем, как и в первом случае, с рассмотрения некоторой гипотетической машины, которая будет служить нам в качестве модели автомата второго типа.

Любая машина представляет собой систему, которая может быть схематически представлена в виде некоторого множества точек, связанных друг с другом посредством определенных, точно заданных соотношений. Поэтому в качестве модели нашей машины мы можем принять простую *сеть*. Каждая точка в этой сети представляет собой некоторое двоичное событие, иначе говоря, любая точка представляет собой элемент машины, который в любой момент времени может находиться только в возбужденном или невозбужденном состоянии. Линии, соединяющие все эти точки, изображают возможные виды преобразований в системе. Возбуждение одной точки мы будем рассматривать как указание на то, что некоторый импульс передается от этой точки по линии, соединяющей ее с другой точкой, и что при поступлении импульса на последнюю возможен один из двух случаев: возбуждение этой точки или прекращение возбуждения. Очевидно, что при таких условиях можно составить схему, которая описывает как внутренние взаимодействия в машине, так и ее связи с внешней средой. Такая схема будет иметь явное сходство со схемой любой электрической цепи.

Предположим, что машина, которую мы стремимся описать, является простым дверным звонком. Схема машины показывает, что как только окружающая среда (в данном случае палец, замыкающий контакт) начинает действовать на машину, имеют место определенные следствия, которые мы кратко определяем фразой «звонок звонит». Точно таким же образом можно описать большое число машин даже в тех случаях, когда они не содержат электрических цепей. Например, механическая система кулачков и муфт, составляющая основу конструкции любого станка, также может быть описана аналогичным образом, так как детали станка связаны друг с другом по строго определенной схеме и на любой стадии работы находятся в движении или состоянии покоя.

Очевидно, автомат подобного типа наиболее рационально использовать для представления такой машины, «ячейки» которой функционируют по принципу «все или ничего». Описание аналогового вычислительного устрой-

ства в таких терминах было бы связано со значительными трудностями, хотя, учитывая наше знакомство с двоичной логикой, такое описание, вообще говоря, вполне возможно. Существенным ограничением изложенного в таком виде принципа описания является, однако, то, что большинство машин (по крайней мере в кибернетическом понимании этого термина) функционирует *недетерминированным* образом. Это означает, что данное пока что описание применимо только к детерминированным системам, в то время как многие системы, которые нам требуется описывать, являются вероятностными. Это затруднение, очевидно, можно преодолеть, если приписать некоторую вероятность каждому событию в сети. При таком условии импульс, поступающий в ячейку, не обязательно произведет действие. Возбуждение или торможение ячейки произойдет только в том случае, если некоторое значение вероятности, приписанное импульсу в машине для данного момента времени, окажется выше определенного «порогового» значения, при котором рассматриваемая ячейка срабатывает. Такое рассмотрение сразу позволяет распространить нашу модель на гораздо более широкий класс машин. Теперь конечный автомат можно рассматривать как модель реальных механизмов, начиная от механизмов органов чувств и кончая механизмами процессов атомной физики.

История этого второго типа кибернетических автоматов представляет огромный интерес, ибо автоматы этого типа связаны с живыми организмами и, в частности, с описанием их нервной деятельности. В классической работе Маккаллока (McCulloch) и Питтса (Pitts) [15] для обсуждения поведения нейрофизиологической системы использовано понятие сети. Эти ученые открыли, что явления в нервных сетях и взаимоотношения между ними можно анализировать в терминах логики предложений, ибо нейроны характеризуются двоичным поведением. Они развили логическое исчисление для такого анализа и сразу же получили ряд важных результатов. Прежде всего, учитывая, что основной задачей чистой теории кибернетики является определение предельных возможностей машин, они доказали, что модель конечных

автоматов, имеющая вид сети, в принципе адекватна представлению любой логической системы. Для данной машины или кибернетической системы всегда можно найти изоморфную им по описанию сеть.

В результате проведенных исследований вскоре выяснилось, что общепринятое представление об универсальности идеи прямой *причинности* является весьма наивным. Поведение сети во времени определяется ее описанием как конечного автомата. Если задано полное описание состояния машины в данный момент, а также точно определено последующее событие, то можно определить состояние машины в последующий момент. Однако совершенно невозможно восстановить историю событий, прослеживая их обратный ход во времени. Это объясняется тем, что в сети реализуется много дизъюнкций (логических операций типа «или»). После реализации всего нескольких дизъюнкций нельзя определить, каким из многих возможных путей машина в действительности достигла своего нынешнего состояния.

Кроме того, более тонкое логическое рассуждение показывает (поскольку траектория движения к данному состоянию могла включать несколько замкнутых циклов), что при помощи ретроспективного анализа невозможно установить соответствие между состояниями машины и отдельными моментами времени. Следовательно, утверждают Маккаллоу и Питтс, знания человека об окружающем его мире обязательно являются неполными. Человеческий мозг вынужден регистрировать опыт в обобщенном, абстрактном виде и поэтому не способен совершенно идентично реагировать на одни и те же воздействия. Это свойство человеческого мозга отнюдь не является недостатком. Именно такая природа процесса мышления и позволяет нам систематизировать, кодировать и практически использовать наш опыт. Такой вывод представляет существенный интерес для всякого, кто весьма примитивно представляет себе, что процесс накопления и хранения информации в машине сводится к непрерывной регистрации любых данных без всякого разбора.

После «изобретения» такого типа машины, как конечный автомат, ряд ученых начал исследовать ее воз-

возможности. Клини, о котором мы упоминали выше в связи с его работами по метаматематике, применил эффективные логические методы для исследования представления событий в конечных автоматах. Именно в его работе [16] дано точное определение тех видов событий, которые могут быть представлены в конечных автоматах. Одним из английских кибернетиков, внесших вклад в развитие теории конечных автоматов, является Джордж (George) [17]. Кроме того, в этой области был проведен еще ряд исследований и сделаны важные открытия, так что в настоящее время теория сетей представляет собой развитую отрасль кибернетики, имеющую самостоятельное значение. Следует также отметить связь этой отрасли с теорией множеств (о которой говорилось ранее), ибо поведение сети может быть описано в виде связей между *множествами* составляющих ее точек.

Прежде чем перейти к иллюстрации полученных результатов на конкретных примерах, целесообразно сразу же ответить на одно из возможных возражений. У некоторых может возникнуть сомнение в том, что, несмотря на успешные работы по конечным автоматам, схема конечного автомата, построенная в соответствии с данным нами описанием, сможет служить удовлетворительной моделью для многих типов кибернетических машин, особенно для систем управления производством на стратегическом уровне или для исчерпывающего исследования человеческого мозга.

В своей замечательной книге [18] Шолл (Sholl), которому хорошо известны указанные здесь работы, с позиций анатома показывает, насколько эффективно эти новые идеи могут быть использованы в исследованиях, которые ведутся более традиционными методами. Он утверждает, что предпосылкой для исследования мозга является построение развитой статистической модели. Этот вывод основан на гистологических исследованиях, которые показывают, что любой вид нервной деятельности нельзя моделировать детерминированными цепями. Таким образом, нам, по-видимому, придется не только связать модель нервной сети с вероятностью, рассматривая внутренние связи системы в виде матрицы



вероятностей перехода, но мы будем вынуждены считать всю систему в целом неопределенной. В связи с этим тот вид схемы, который разрабатывается в настоящее время для представления конечного автомата, возможно, нужно будет рассматривать как подходящую статистическую оценку состояния системы в данный момент времени. Одна из наиболее замечательных черт кибернетики, обусловленных, возможно, тем, что она является новой наукой, заключается в том, что она всегда позволяет осуществлять новый, высший тип синтеза, казалось бы, несовместимых идей. В частности, о реальной возможности осуществления такого синтеза, на который мы только что указали, может, пожалуй, свидетельствовать конечный вывод, вытекающий из рассматриваемой работы. Но этот вывод сам по себе представляет огромный интерес для кибернетики. Чтобы оценить его, нам придется снова обратиться к гению Дж. фон Неймана.

Один из отличительных «признаков» кибернетики, как уже подчеркивалось выше, заключается в том, что она рассматривает сложность в системах, не останавливаясь даже тогда, когда сложность достигает уровня неопределимости. Кибернетика признает «реальную жизнь» такой, какой мы ее действительно наблюдаем, не подменяя ее «совершенной» абстракцией. Другим из отличительных признаков кибернетики является признание изменчивости, вероятности в системах. Оба эти понятия неразрывно связаны между собой во взглядах кибернетиков на проблему ошибок. Реальная действительность, в отличие от теоретических представлений о ней, как в области естественных и социальных наук, так и в экономике и промышленности может порождать ошибки. В отличие от чертежей, реальные машины, начиная от пишущей машинки до домны и конечного автомата, могут работать с отклонениями от нормы. В классических методах научных исследований существует тенденция рассматривать ошибки как отклонения от принятых в них представлениях об идеальном. В теории исследования операций на основе аппарата статистики выработан более рациональный подход к изучаемым явлениям. Эта теория рассматривает «ошиб-

ку» как нечто вполне естественное, нечто свойственное реальному поведению. Нетипичная реакция является не столько отклонением от нормы (само слово «ошибка» имеет излишне отрицательный этический оттенок), сколько членом статистического приближения к норме. Именно такой подход характеризует кибернетические взгляды на проблемы несовершенства, ошибочных расчетов, неисправной работы и отказов в разнообразных «машинах», которые изучает кибернетика.

Следовательно, ошибка не является каким-то бедствием, по поводу которого нужно сокрушаться и от которого нужно стараться полностью избавиться; она является естественной и важной частью постоянного поведения системы. Дж. фон Нейман принял эту точку зрения и в своей блестящей работе [19] заложил основы новой теории ошибок, которая в конце концов должна стать одним из основных методологических орудий кибернетики.

При представлении любой данной машины в виде сети, т. е. конечного автомата, возникновение ошибок может быть обусловлено двумя источниками. Прежде всего, основной элемент сети, изображаемый точкой, может оказаться неисправным, что соответствует нарушению какого-нибудь двоичного оператора: движения рычага, возбуждения нейрона, срабатывания реле. Во-вторых, передача информации, представляемая в сети в виде линий, по целому ряду причин может искажаться. Сюда относятся, например, высокий уровень помех в линии, вводящий ложную информацию, разрывы проводов или синапсов, заедание или поломка зубчатой передачи и т. п. Дж. фон Нейман исследует вероятности, связанные с этими ошибками, и предлагает методы их регулирования.

В отношении ошибок первого типа он указывает на очевидные ограничения способности цепей давать правильный ответ. Выход машины является непосредственным результатом работы ее «последнего» компонента (точки, нейрона, реле, рычага). Следовательно, совершенно очевидно, что в самом лучшем случае вероятность ошибки на выходе не может быть меньше вероятности ошибки в последнем компоненте. Однако это

ограничение можно устранить за счет двойного, тройного и многократного дублирования последнего компонента. Информация (которую мы в данном случае считаем правильной), возбуждающая этот компонент, будет дополнительно возбуждать ряд идентичных компонентов, и выход машины даст результат, «принятый большинством голосов». Совершенно очевидно, что если каждый из идентичных компонентов имеет одинаковую вероятность ошибки, то вероятность ошибки всего выхода в целом будет в этом случае меньше. Дж. фон Нейман строго доказывает это положение. Естественно, то, что может быть сделано для регулирования уровня ошибки «в последнем» компоненте, можно сделать также для регулирования ошибки в «предпоследнем» компоненте и т. д. Теория вероятностей позволяет нам количественно оценить все эти факторы и тем самым построить машину, выход которой имеет произвольно малую вероятность ошибки независимо от вероятности ошибок в каждом компоненте.

Метод регулирования ошибок второго типа, обусловленных передачей информации внутри системы, примерно аналогичен. Дж. фон Нейман называет его «многократным». Будем рассматривать автомат как «черный ящик», говорит Дж. фон Нейман, и заменим каждую линию на входе и выходе пучком линий. Теперь мы отбрасываем представление о том, что каждый вход или выход должен быть возбужден или не возбужден. Каждая линия будет теперь реагировать на двоичную логику в соответствии с общими представлениями кибернетики о переработке информации. Однако в этом случае каждая многократно дублированная линия в целом будет характеризоваться более сложной и тонкой реакцией, так как будет существовать порог реакции для самого пучка. Так, если некоторый критический (или доверительный) уровень  $d$  составляет менее 0,5, то возбуждение  $\geq (1 - d) N$  линий в пучке, содержащем  $N$  линий, будет означать, что весь пучок в целом возбужден. Однако при возбуждении  $\leq dN$  линий пучок следует рассматривать как невозбужденный. Между этими двумя крайними значениями лежит область неопределенности, в которой пучок еще факти-

чески не возбужден, но все более подготавливается к возбуждению. Дж. фон Нейман показывает, что число линий в пучке, передающих неправильную информацию, можно с произвольно высокой вероятностью удерживать на уровне ниже критического числа  $dN$ .

Таким образом, показывается, что при правильном построении логики кибернетических машин можно успешно справиться с любой ожидаемой вероятностью ошибок в компонентах и информационных цепях. Очевидно, в целом этот метод представляет собой умышленное введение избыточности. Здесь мы заимствуем опыт у живых организмов: избыточность в мозге имеет весьма высокий порядок. Однако с практической точки зрения доказанные Дж. фон Нейманом теоремы дают нам твердую уверенность в том, что в конечном счете мы сможем создать действительно совершенные кибернетические машины, отличающиеся подлинной надежностью. Сколь заманчива такая перспектива, если ясно представить себе испытываемые в настоящее время трудности, когда почти каждый элемент управляющей или вычислительной аппаратуры приходится тщательно контролировать. Необходимость непрерывного наблюдения за автоматами со стороны человека — это нелепость современного этапа развития техники, получившего название автоматизации, нелепость, от которой кибернетика, надо надеяться, со временем избавит промышленность.

Здесь уместно сделать два особо важных замечания относительно теории ошибок, развитой Дж. фон Нейманом. Прежде всего, каждого, кто занимается исследованием аналогии между нервными системами биологических объектов и электрическими цепями, применяемыми в промышленной аппаратуре автоматического управления, может поразить одна странная особенность. Чувствительные органы живого организма в основном по своей природе дискретны. Так, например, зрительные стимулы возникают в миллионе клеток сетчатки глаза, каждая из которых в любой момент времени возбуждена или не возбуждена. Тактильные стимулы также возникают в чувствительных нейронах, принимающих только два состояния. Эти чувственные восприятия перерабаты-

ваются в организме таким образом, что есть основания полагать, что к моменту, когда они начинают принимать участие в высшей нервной деятельности мозга, они уже преобразованы из дискретной формы в непрерывную. Так, например, даже на физиологическом уровне восприятия проприоцептивная информация (т. е. информация об относительном положении тела, о равновесии и т. п.), очевидно, имеет непрерывную форму. В технике, напротив, мы стремимся применять аналоговую чувствительную аппаратуру и перерабатывать полученную информацию до тех пор, пока в высшие управляющие центры она не поступит в дискретной форме. Нагрузку мельницы, температуру печи и другие измеряемые параметры окружающей среды обычно стараются представить в виде непрерывно меняющегося напряжения, т. е. используя аналоговые приборы. Далее, применяют преобразователи из аналоговой формы в цифровую, используя, например, кодирующие диски с фотоэлементами, выдающие информацию, которая поступает в цифровую вычислительную машину уже в двоичном коде. Таким образом, как правило, в технических системах автоматического управления применяют принцип, обратный принципу, используемому биологическими системами. Играет ли это существенную роль? Возможно, что и нет, но на начальной стадии развития кибернетики тщательное сравнение таких отклонений от биологических моделей может оказаться плодотворным. И в этом отношении в теории ошибок использован принцип, аналогичный принципу построения биологических систем, т. е. прямо противоположный принципу представления информации в технических системах автоматического управления. Действительно, многократно дублированный вход, предложенный Дж. фон Нейманом, является дискретным на уровне отдельных линий и непрерывным на уровне управления нейроном, так как возбуждение нейрона основано на доверительных вероятностях.

Второе замечание, которое мы считаем нужным сделать, касается реальной конструкции машин. Если взглянуть на автоматы, которые мы строим, глазами физиологов, то нам покажется довольно нелепым огромное число разноцветных проводов, тщательно припаян-

ных к соответствующим контактам. Если выразить это впечатление наиболее мягко, то неуклюжесть и высокая стоимость такого внутреннего устройства машины вызывает у меня лично чувство неудовлетворенности. Если же подойти к оценке этого устройства самым строгим образом, то можно утверждать, что оно не имеет ничего общего с физиологией, так как совершенно не похоже на устройство живого организма. Эта мысль, возможно, также не имеет большого значения, но мы снова должны проявить осторожность, и снова принцип, на котором построена теория ошибок, открывает новую перспективу. Действительно, если можно построить надежную машину из ненадежных компонентов и цепей, то должна существовать возможность построения надежной машины из произвольно соединенных компонентов. Другими словами, сеть, обладающая достаточным разнообразием, соединения которой носят более или менее случайный характер, может работать надежно, моделируя любую заданную машину при условии, что она содержит достаточную избыточность. Такое утверждение является просто иной формой выражения мысли о возможности построения машин на принципе условных вероятностей, но оно представляет собой заманчивую и, пожалуй, наиболее важную форму высказывания о возможности регулирования ошибок. Я лично уверен, что оно действительно важно и что придет время, когда отпадет необходимость в разработке и проектировании подробных, сложных и дорогостоящих монтажных схем. Это положение тесно связано с приведенными выше утверждениями о том, что кибернетик не обязательно должен понимать механизм и результаты работы созданной им самой машины. Теперь мы, пожалуй, можем к этому добавить, что ему даже и не нужно уметь действительно проектировать ее.

## Часть III

# БИОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КИБЕРНЕТИКИ

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В главе 7 мы указали на необходимость существования в любой науке трех аспектов: теоретического, описательного и прикладного. Вся вторая часть посвящена первому аспекту, при изложении которого мы охарактеризовали ту часть кибернетики, которую можно назвать «чистой» кибернетикой. При этом было дано формальное обоснование природы управления в том виде, в котором оно реализуется в очень сложных системах. «Чистая» кибернетика дает ученому эффективные и надежные методы познания, которые он стремится в дальнейшем использовать в своей практической работе. Его самые смелые мечты теперь переходят из области фантастики в область реальных свершений. Порукой этому являются возможности, которые открывает перед ним «чистая» кибернетика.

Описательный аспект кибернетики, которому посвящена данная часть книги, рассматривает системы любой природы. Эти системы могут быть психологическими, физиологическими, социальными и т. п., т. е. биологическими в широком смысле этого слова. Они могут быть механическими, электрическими, химическими и т. п., т. е., вообще говоря, физическими. Итак, описательный аспект кибернетики, который рассматривает все эти системы, был весьма выразительно назван «биофизическим». Объединяющим для всех этих систем является единый абстрактный, формальный аппарат, который представляет собой множество постоянных или меняющихся, статических или динамических количественных соотношений. В любой науке такое множество

количественных соотношений описывается при помощи классического математического аппарата или аппарата математической статистики. Так же как и в остальных частях книги, подробное математическое обоснование вопроса не приводится. Однако идеи, лежащие в основе математической трактовки, которые развивают кибернетики, должны быть представлены в достаточно ясной форме. Эти идеи излагаются в главе 12, озаглавленной «Математическая биофизика».

В трех последующих главах дается обзор работ в области описательной кибернетики. К настоящему времени достаточно точно установлено, что для подлинно жизнеспособных систем первостепенное значение имеет способность к адаптации. В главе 13 излагается содержание работ, выполненных учеными, которые впервые предприняли попытку исследовать эту способность приспособления к окружающей среде. Описаны машины, реализующие основные теоретические положения. В главе 14 приведено достаточно полное описание обучающихся автоматов. В главе 15 рассмотрены предельные возможности управления, которые определяются возможностями самого интеллекта. Решение вопроса о том, возможно ли построить машину для усиления умственных способностей, зависит от содержания, которое вкладывается в понятие интеллекта. Если отрешиться от весьма распространенного, почти мистического толкования разумного поведения, то оказывается вполне возможным охарактеризовать его основные черты, которые поддаются имитации и даже усилению.

В заключение (глава 16) рассматриваются возможности реализации этих идей в промышленности. В предшествующих главах мы иллюстрировали многие положения примерами из сферы промышленного производства. Все эти примеры относятся к реальным применениям кибернетических идей, с которыми автор встречался в своей работе. В отличие от примеров такого рода в главе 16 описывается гипотетическая структура целого кибернетического предприятия. Эта структура, так же как и приведенные ранее примеры, обсуждается весьма кратко. Так же как эти примеры, она является иллюстрацией применения в производстве новых идей



кибернетики. Однако в отличие от всех приведенных ранее примеров, эта структура еще физически не реализована. Следует подчеркнуть, что стремление заглянуть в будущее в такого рода книге является вполне закономерным. Приведенная схема, безусловно, не представляет собой плод воображения (больного или здорового). Основой для ее построения послужили результаты исследований, проводящихся в настоящее время на реальном предприятии. Некоторые элементы этой схемы уже воплощены в жизнь, но ее полное завершение, очевидно, является делом довольно далекого будущего.

Таким образом, в пяти главах третьей части излагается описательный аспект кибернетики. В них поясняется метод, которым пользуется кибернетика, и описываются многие результаты, полученные с помощью этого метода. Кроме того, в этих главах раскрываются широкие перспективы исследований в области кибернетики, целью которых является решение не только всяких отвлеченных загадок, но и весьма актуальных практических проблем. Представляется возможность с полной уверенностью в успехе разработать детальную программу дальнейших кибернетических исследований.

## Глава 12

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ БИОФИЗИКА

Мы уделили много внимания логической теории, являющейся одной из основ кибернетики, ибо для подтверждения заявки на роль самостоятельной науки необходимо показать саму возможность существования такой науки и обрисовать ее принципиальную структуру. Теперь мы перейдем, как было намечено ранее, к рассмотрению описательного аспекта кибернетики. В настоящее время во многих науках, к примеру в ботанике, можно выполнить очень много ценных исследований, основанных на наблюдениях и классификации. Первоначально физика также относилась к наукам такого рода: она имела возможность изучать поведение физических тел, исследовать поддающиеся измерению характеристики и на основе сделанных наблюдений

формулировать эмпирические законы. На этой ранней стадии развития все еще находится такая наука, как психология. Но кибернетика не может идти по такому пути, ибо ее специфика как науки состоит в том, что она исследует совершенно различные по своей физической природе системы. При непосредственном наблюдении представляется, что между этими системами (например, зенитными орудиями, почками живого организма и загрузкой производства) нет ничего общего и что поэтому не существует и общего языка (в обычном понимании) для регистрации и описания этих наблюдений. Это в значительной степени определило то обстоятельство, что кибернетика как единая наука сформировалась лишь недавно.

Поэтому, рассматривая развитие наук, мы должны сразу перейти к его более сложному этапу. Когда физика вышла за пределы своей элементарной, эмпирической стадии развития, она выработала новый язык для описания явлений, воспользовавшись аппаратом математики. Перейдя к методу исследования, основанному на построении математических моделей, физика не только сразу достигла нового состояния, отличающегося большей широтой обобщений и более глубоким проникновением в существо явлений, но и приобрела силу предвидения. Так, например, существование планеты Уран и элементарной частицы позитрона было теоретически предсказано еще до их эмпирического открытия. Кибернетика, как нам уже известно, в одинаковой мере связана с биологическими и физическими науками. Вследствие этого общая теория описания явлений, которая имеется в распоряжении кибернетики, получила название *математической биофизики*. Эта теория также стремится к всеобъемлющим обобщениям, которые позволяют не только описывать, но и предсказывать явления.

Родоначальником этой теории следует считать Д'Арси Томпсона (D'Arcy Thompson), который заложил ее основы в своем классическом труде «Рост и форма», изданном более сорока лет назад, но по сей день вызывающем интерес и восхищение. В этой работе мы обнаруживаем оригинальную попытку с помощью классиче-

ского аппарата математики описать такое всеобщее явление живой природы, как рост, а также определить на более строгом уровне, чем непосредственное наблюдение, общность структур живых организмов. Позже взаимоотношения между живыми организмами исследовались математическими методами такими учеными, как Лотка (Lotka) и Вольтерра (Volterra), а специфически статистические (скорее, чем чисто математические) идеи проникли в эту область благодаря великому Фишеру (Fisher) и его работам по генетике. Но все эти эпизодические начинания были обобщены в стройную систему, имеющую особенно важное значение для кибернетики, только в труде Рашевского (Rashevsky) [20]. Рашевский и его сотрудники провели широкое математическое исследование функций вегетативных клеток нервной системы. В той части работы, которая касается исследования периферийных нервов и, наконец, самой центральной нервной системы, можно ясно усмотреть ее связь с логической теорией сетей, о которой мы говорили выше. Рашевский и его последователи продолжают работать над созданием математических моделей, описывающих такие функции нервной деятельности живого организма, как обучение.

На протяжении последних десяти — двенадцати лет наряду с фундаментальными систематическими исследованиями, проводимыми этим крупным специалистом в области математической биологии, следует отметить целый ряд попыток многих пионеров кибернетики дать специфически кибернетическое истолкование большому числу изучаемых ими явлений в различных биологических и физических науках. В этой книге мы уже упоминали о квантовой теории памяти, разработанной фон Ферстером [5]. Как выяснилось еще на первых конференциях по кибернетике, проведенных в США, общие принципы математической биофизики были применены во многих областях науки: в физике, технике, психологии, анатомии, антропологии, зоологии, экологии и термодинамике. Для краткой иллюстрации успехов, достигнутых в этом направлении, полезно ознакомиться с докладом Куастлера (Quastler) [21], прочитанным в Нью-Йорке на девятой конференции по кибернетике,

состоявшейся в 1952 году. Этот доклад наглядно показывает, что уже в то время основной метод кибернетики был настолько хорошо освоен, что его можно было легко и точно применить в такой, казалось бы, далекой от кибернетики области, как цитология.

Куастлер применил теорию управления для исследования процесса каталитического действия энзимов, наблюдаемого даже в самых простейших биологических системах. При преобразовании химических веществ живые организмы используют катализаторы, получившие название энзимов. Химические реакции такого рода, очевидно, необходимо регулировать, иначе они протекали бы неопределенное время и наносили бы вред организму. Для регулирования этих реакций организм использует принцип обратной связи: конечный продукт катализа вступает вновь в реакцию, тормозя действие самого катализатора — энзима. Этот механизм, очевидно, представляет собой отрицательную обратную связь, но требуется также наличие контура положительной обратной связи, который используется для предотвращения появления в организме того исходного химического вещества, которое подвергается преобразованию. Если в результате действия этого контура появляется избыток конечного продукта реакции, то требуется еще один контур отрицательной обратной связи, чтобы приостановить стимуляцию выделения энзима контуром положительной обратной связи. Таким образом, мы наблюдаем весьма сложный механизм, включающий три обратные связи, регулирующие концентрацию энзима, а также исходного и конечного продуктов реакции.

Куастлер раскрывает этот механизм во всех его сложных проявлениях в терминах теории автоматического регулирования и прослеживает его влияние на развитие организма на примере *Paramecium aurelia*. Интересно отметить, что этот бесклеточный организм, являясь простейшим животным, обладает тем не менее весьма сложной системой управления, которую Куастлер в дальнейшем анализирует в терминах теории информации и других новейших математических теорий. Мы указываем на эту работу потому, что она дает наглядную иллю-

страцию описательного математико-биофизического аспекта кибернетики. Но в то же время мы не можем не отметить, насколько убедительно этот пример подтверждает высказанное в самом начале этой книги положение о том, что в современном обществе со всей его сложной структурой и в современной промышленности со всеми ее достижениями у нас принято настолько упрощенное представление об управлении, что оно не идет ни в какое сравнение с управлением даже в самых простых живых организмах.

В одной из своих работ [22] я в общем виде проанализировал широкую область научного метода использования аналогий для решения задач управления производством, не входящих непосредственно в сферу автоматизации. Но в математической биофизике, и прежде всего в работах Рашевского, этот метод доведен до строгого, исчерпывающего и конкретного изучения поведения во всех его проявлениях. Этот метод, в основе своей теоретико-множественный, сводится к использованию преобразований, которые Рашевский назвал биотопологическим отображением. Это дальнейшее расширение использования топологии, о которой уже говорилось в этой книге, предполагает, что можно построить «описание» простейшего из возможных организмов (независимо от того, существует в действительности такой организм или является только научной абстракцией), и предполагает, далее, что все реально существующие организмы могут быть топологически отображены в изоморфизмы этой изначальной системы. Нет никаких сомнений в том, что этот подход может быть непосредственно распространен и на решение проблем управления производством.

В заключение введения в биофизическую теорию кибернетики следует остановиться на ценности рассмотрения патологии систем управления, т. е. на тех явлениях, которые происходят в них, когда они неисправны. Прежде всего, в этом отношении представляет интерес сравнение живых и искусственных систем, находящихся, вообще говоря, в нормальном или слегка невротическом состоянии. Почти каждый, по-видимому, испытал случай столкновения с идущим навстречу прохожим. По мере

уменьшения расстояния между идущими навстречу друг другу пешеходами становится очевидным, что они должны столкнуться. Поэтому один из пешеходов делает шаг в сторону, но вполне вероятно, что и другой делает шаг в эту же сторону. Тогда оба пешехода корректируют свое движение, делая шаг в противоположную сторону. По мере дальнейшего уменьшения просвета между пешеходами такой процесс коррекции повторяется, пока они не сталкиваются нос к носу. Теперь не остается ничего другого, как извиниться и разойтись, испытывая легкое смущение. Такие знакомые почти каждому случаи рассматриваются в кибернетике как процессы «рыскания» в машине. На языке теории автоматического управления оба явления описываются совершенно аналогичным образом, причем обе эти легкие формы невроза в живом организме и в механическом устройстве обусловлены недостаточно совершенной конструкцией механизма обратной связи.

Сравнение становится еще более наглядным, если рассматривать действительно патологическую ситуацию. Некоторые люди страдают заболеванием, известным под названием атаксии. Иногда эту болезнь называют также мозжечковым тремором, так как она связана с повреждением мозжечка. Если больной неподвижен, то никаких признаков заболевания не наблюдается, однако если он хочет сделать какое-нибудь целенаправленное движение, например взять карандаш, то начинают проявляться отклонения от нормы. Его рука движется по направлению к карандашу, но если нормальный человек в состоянии точно и без рывков довести руку до цели, что достигается за счет непрерывности обратной связи между зрительным образом производимого им действия и его собственными двигательными нервами, то больной атаксией не в состоянии правильно корректировать движение руки при помощи контуров отрицательной обратной связи. Вследствие этого по мере приближения к карандашу его рука начинает дрожать с неуклонно растущей амплитудой, и в итоге вполне вероятно, что он коснется стола далеко от цели.

Близкую аналогию этой неприятной болезни можно обнаружить во многих случаях управления производ-

ством. Так, например, в достаточно устойчивой, хорошо отработанной системе управления производством неожиданная попытка отдать особое предпочтение выполнению заказа какого-либо одного потребителя (что требует перестройки всей системы) обычно приводит к возникновению именно такого рода колебаний. Причина этого явления та же, что и в первом случае: регулирующий механизм недостаточно чувствителен для достижения поставленной цели. Отдаются распоряжения ускорить темп некоторых работ, их выполнение как бы выпадает из общего ритма производства. В результате возникают заторы и задержки на тех участках технологического процесса, которые не могут справиться с неожиданно возросшим объемом работ собственными средствами. Большинству плановиков, работающих в промышленности, знакома такая ситуация. Чтобы успешно решить возникающие в этих случаях задачи, необходимо создать такую систему управления, которая обладает большой информационной емкостью всех каналов связи, высоким уровнем разнообразия в планирующих центрах и быстродействующей реакцией, обеспечиваемой оперативной системой цехового планирования (последняя задача обычно является наиболее сложной).

Рассмотрев с точки зрения кибернетики отдельные примеры, заимствованные из различных областей, перейдем теперь непосредственно к вопросу конструирования машин. Чтобы правильно оценить материал, излагаемый в двух последующих главах, необходимо подойти к нему с несколько особой точки зрения. Прежде всего, с самого начала следует совершенно ясно указать на то, что во всех работах, которые будут описаны, ученые не стремились изобрести оригинальные новые устройства, имеющие непосредственную практическую ценность, а ставили перед собой единственную задачу исследовать кибернетические свойства машин, что отнюдь не умаляет их заслуг. Не считая одного примечательного исключения, когда практический результат уже достигнут, все эти работы носят чисто поисковый характер, и создатели первых кибернетических машин склонны говорить о них как об «игрушках». Если читатель не способен увидеть, что скрывается за этими «игруш-

ками», то, вовсе не желая его обидеть, следует все же сказать, что его воображение просто не может подняться до уровня тех перспектив, которые заключены в этих работах. Точно так же многие бесстрастно наблюдали за первыми экспериментами на пути человечества к каждому новому великому открытию.

Во всех описываемых устройствах ученые стремятся имитировать при помощи технических средств отличительные свойства управления и связи, наблюдаемые в живых организмах. Это, конечно, отнюдь не означает, что машины могут быть уподоблены некоему роботу, достоинства и недостатки которого определяются степенью его внешнего сходства с живым существом. Идея заключается только в изучении определенного вида поведения в функциональном смысле безотносительно к внешнему облику машин. Приводимый перечень этих устройств, безусловно, не полон, но наша цель состоит лишь в показе основных направлений работ и основных сторон поведения живых организмов, которые в них исследовались.

## Глава 13

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ АДАПТАЦИИ

Как было установлено на основе довольно произвольной классификации систем, приведенной в самом начале книги, поведение животных всегда имеет вероятностный характер и, за исключением самых тривиальных случаев, обычно является сложным. Наиболее эффективным средством исследования для описания поведения такого рода является раздел математической статистики, называемый теорией стохастических процессов. Эта теория позволяет определить некоторые предельные усредненные вероятностные характеристики, учитывающие, что на коротких интервалах времени это поведение является чисто случайным, или непредсказуемым. Таким образом, мы, к сожалению, не можем точно определить, сколько голов забьет данная футбольная команда в завтрашнем матче, но в то же время



в состоянии с удовлетворительной точностью предсказать, сколько голов она забьет, например, за сто матчей.

Даже самое общее изучение наиболее примитивного поведения животных должно включать поэтому три операционных аспекта. Прежде всего, можно определить логическую область возможного поведения, иначе говоря, можно установить пределы изменения поведения животного в любой заданной ситуации. Далее, в описании поведения следует исходить из того, что в каждой заданной ситуации последующее действие животного не поддается точному предсказанию, хотя вероятности всех возможных действий могут быть неодинаковыми. Именно это обстоятельство и вводит элемент случайности в рассматриваемую ситуацию. Наконец, совершенно очевидно, что стохастический процесс можно точно описать с помощью вероятностных распределений, которые в конечном счете устанавливаются на некотором интервале времени. Простейшим методом изучения поведения животных является постановка эксперимента, при котором для подопытного животного создаются такие условия, которые можно точно описать и регулировать, подобно тому как это делается в обычном лабораторном эксперименте.

Первые эксперименты такого рода были проведены физиологами Павловым и Колером (Kohler), исследовавшими выработку условных рефлексов у животных в ситуациях, когда животное должно было найти выход из системы препятствий, ограничивавших свободу его передвижения. Перед животным ставилась, например, задача найти выход из лабиринта. Очевидно, что в основе поведения животного при решении этой задачи лежит случайный процесс проб и ошибок. Экспериментаторов в первую очередь интересовало, «научится» ли животное находить правильное решение в результате многократного повторения опыта в одних и тех же условиях. Целью этой главы не является подробное обсуждение природы процесса обучения, и поэтому на данном этапе мы только отметим, что если время, затрачиваемое животным на решение этой задачи, непрерывно уменьшается в статистическом смысле, то животное обучается. Такие эксперименты проводились многими

учеными. Наиболее современной и полной работой по данному вопросу является монография Буша (Bush) и Мостеллера (Mosteller) [23].

Чтобы получить представление о сущности и значении таких исследований, рассмотрим опыт, в котором крыса обучается находить выход из лабиринта, причем ее поведение дополнительно стимулируется при помощи системы поощрений и наказаний. Если крыса выбирает правильный маршрут, то ей дают кусочек сыра, а при выборе неправильного маршрута она испытывает удар электрического тока. Статистика по большому числу опытов позволяет определить распределение времени, требующегося для того, чтобы крыса безошибочно научилась находить выход из лабиринта. Далее, используя теорию стохастических процессов, можно построить математическую модель этого процесса обучения, после чего, пользуясь обычными методами теории исследования операций, можно смоделировать поведение крысы. В результате даже опытный экспериментатор не в состоянии обнаружить различие между алгоритмом поведения, вырабатываемым в ходе реальных опытов, и алгоритмом, получаемым на основании статистического моделирования. В США получено настолько эффективное операционное описание такого поведения, что физиологи не могут отличить «статистических» крыс, или, как их сокращенно называют по-английски, «stat-rats», от реальных животных. После того как с такой точностью были изучены некоторые аспекты целенаправленного поведения животного, появилась возможность построения машины, которая моделирует такое поведение, в частности устройства, обладающего характеристиками «статистической» крысы. Машины, отыскивающие выход из лабиринта, были построены рядом экспериментаторов, в том числе американцами Россом (Ross), Шенноном и Уоллесом (Wallace). Исследования общих свойств машин этого класса были проведены в Оксфордском университете в Англии.

Покажем, как такой, пусть весьма несовершенный, метод построения статистических моделей можно применить для решения практических задач в промышленном производстве. Предположим, что имеется техноло-

гическая установка, управляемая оператором, который в ходе своей работы должен все время принимать соответствующие решения. Из трех операторов, работающих на этом объекте в течение трех смен, двое более или менее успешно справляются со своими обязанностями, в то время как третий выполняет их намного эффективней, так что в его смену показатели работы установки существенно улучшаются. Исследование методами теории исследования операций приемов управления, применяемых этим оператором, а также проводимого им самоанализа его действий не позволяет выяснить существа стратегии управления, обеспечивающей достижение столь высоких результатов. Кибернетик вынужден рассматривать такую ситуацию как «черный ящик», на входы которого подаются обычные воздействия, определяющие поведение системы, а выходами которого являются результаты самого управления, полученные благодаря более высокой квалификации третьего оператора. При этом поведение самого оператора и представляет собой «черный ящик». Если при помощи методов математической статистики можно построить операционную модель поведения оператора, то в систему автоматического регулирования можно было бы включить управляющее устройство, реализующее характеристики такого «черного ящика», т. е. наиболее квалифицированного оператора. Таким образом, благодаря введению кибернетического элемента становится возможной полная автоматизация работы рассматриваемого объекта, которая ранее считалась неосуществимой, так как предполагалось, что оптимальный режим можно обеспечить только при непосредственном участии человека в процессе управления. Мне лично известно большое число ситуаций, в которых можно было бы успешно применять этот метод. Успешные опыты в этом направлении были проведены при обучении пилотов скоростных самолетов.

Мы рассмотрели класс машин, которые могут находить выход из лабиринта. В этой способности в неявном виде присутствует способность другого рода, более общего характера, а именно способность отыскивать цель. Например, Уоллес, который упоминался выше, по-

строил машину, находившую выход из лабиринта (или, иначе говоря, стремившуюся к определенной цели), двигаясь по рельсам, из которых обычно строят игрушечные железные дороги. Но подлинно целенаправленная машина должна обладать свободой передвижения, не ограниченного определенными проходами или рельсами. Устройством, которое обычно считают прототипом игрушек такого рода, является «черепаха» Грея Уолтера (Grey Walter), которую он называет *Machina speculatrix*<sup>1)</sup>. Эта небольшая машина действительно по внешнему виду напоминает черепаху. Она передвигается на трехколесной тележке, приводимой в движение электродвигателем, причем весь ее механизм закрыт со всех сторон защитным кожухом. *Machina speculatrix* имеет всего два чувствительных органа: один зрительный и один тактильный (осязательный). Зрительный орган представляет собой фотоэлемент, вращающийся сверху машины и отыскивающий источник света. Машина передвигается произвольным образом, исследуя окружающую среду. Когда достаточно сильный луч от источника света попадает на рецептор, машина направляется к этому источнику. Второй, тактильный рецептор представляет собой всего-навсего обычный электрический контакт, который замыкается, если машина сталкивается с каким-нибудь препятствием, мешающим ее движению. При этом зрительный орган с фотоэлементом прекращает работу в прежнем режиме и переходит в режим осцилляции, вследствие чего «черепаха» начинает делать короткие пробные движения в разных направлениях. *Machina speculatrix*, обладающая столь простой сенсорной системой, состоящей всего из двух чувствительных органов, своим поведением поразительно напоминает поведение животного. Она как будто с любопытством обыскивает комнату, подобно небольшому зверьку, и, когда обнаруживает подходящую цель (источник света), немедленно устремляется к ней. Два сенсорных входа позволяют машине обходить любое препятствие, которое встречается на ее пути, временно

<sup>1)</sup> Думающая машина (лат.). (Прим. перев.)

отступая от препятствия, а затем вновь устремляясь вперед под воздействием светового стимула и т. д.

Одна из особенностей поведения машины, на которой следует специально остановиться, поразила самого изобретателя Грея Уолтера. При разнообразии всего из двух чувствительных элементов поведение такой машины, не являющееся, строго говоря, непредсказуемым, в действительности оказалось совершенно неожиданным, что и вызвало удивление. Эта особенность выявилась следующим образом. Для контроля за работой механизма на машине была установлена сигнальная лампочка, по которой можно было видеть, когда привод ходовой части находится в действии: лампочка должна была автоматически гаснуть при получении световым рецептором достаточного возбуждения. Повторяем, что это сигнальное устройство было установлено просто для того, чтобы облегчить наблюдение за поведением машины. Что получилось в действительности, подробно описано в книге Грея Уолтера [24].

Когда *Machina speculatrix* сталкивалась с отражающей поверхностью, то луч света от сигнальной лампочки, отражаясь, попадал на фотоэлемент и в результате срабатывал механизм, вызывавший движение машины по направлению к источнику света. Эта реакция, в свою очередь, приводила к автоматическому отключению сигнальной лампочки, т. е. к исчезновению стимула, но при этом лампочка вновь загоралась, т. е. стимул вновь появлялся, и весь этот цикл повторялся сколь угодно долго. Таким образом, машина как бы совершала неуклюжий танец перед своим собственным отражением и, как указывает Грей Уолтер, казалось, в какой-то степени сознавала свое присутствие. Более того, аналогичная форма поведения наблюдалась, когда в контакт между собой вступало несколько машин. Две «особи» притягивались лампочками друг друга, но, пытаясь сблизиться, они гасили свои собственные «призывные» сигналы и т. д. Таким образом, создавалось впечатление, что машины знали о присутствии себе подобных, и наблюдалось то, что у реальных животных называется «брачным танцем».

В этих экспериментах как будто бы нельзя усмотреть непосредственного значения для промышленности, так же как и в экспериментах такого ученого, как Беркли (Berkeley) в США, которого машина Грея Уолтера вдохновила на создание других целенаправленных машин. Тем не менее, излагая историю кибернетики, нельзя не упомянуть о *Machina speculatrix*, на примере которой можно сделать поучительный вывод о том, как подобное, на первый взгляд бесполезное, экспериментирование стимулирует научные исследования, которые могут привести к неожиданным результатам. Она может наряду с этим служить наглядной иллюстрацией понятия «черного ящика», а также принципа, лежащего в основе теоремы Дж. фон Неймана о сложности. Здесь мы наблюдаем очень простую конструкцию, обладающую достаточным разнообразием и источником информации, поведение которой оказалось значительно более сложным, чем имел в виду изобретатель при ее создании.

Мы описали все эти устройства, руководствуясь задачами данной книги, и поэтому оценка самих устройств и проведенных с ними опытов является довольно одно-сторонней. Это еще в большей степени относится к следующему примеру — гомеостату Росса Эшби [25]. Его машина внешне не производит большого впечатления, но она построена на основе блестящей математической теории и в ней воплощены чрезвычайно важные принципы. Мы уже много говорили о гомеостазисе и проанализировали принцип, заключающийся в том, что любая эффективно управляемая система функционирует, как гомеостат. Гомеостат Эшби представляет собой именно такую машину, предназначенную для перехода в устойчивое состояние после того, как в нее были внесены возмущения. Отметим здесь также и то обстоятельство, что все эти устройства воплощают в себе основной принцип вероятности: все они имеют определенные «цели существования», для достижения которых они соответственно спроектированы, но методы, при помощи которых они достигают этих целей, сформулированы лишь в самых общих чертах и совершенно непредсказуемы в подробностях.

Машину Эшби можно описать как систему стрелок, на которые действуют случайные возмущения, но присущий машине гомеостазис заставляет стрелки возвращаться назад в устойчивые положения. Это явление может показаться тривиальным, ибо аналогичный результат можно получить при помощи скрытых магнитов, когда устройство вовсе не является гомеостатом. На самом деле механизм гомеостата гораздо сложнее. Устойчивое состояние машины определяется положением ее стрелок. Стрелки управляются внутренним устройством, представляющим собой систему обратных связей, так что все стрелки взаимодействуют между собой. Устойчивость системы нарушается случайным воздействием окружающей среды, и задачей машины является случайный поиск среди огромного числа возможных состояний такого состояния, которое в соответствии с поступающей из окружающей среды информацией обеспечит определение новых условий в системе, при которых снова достигается устойчивость. Различие между функциями такого рода и функциями обычного автоматического регулятора заключается в том, что последний в аналогичной ситуации для восстановления устойчивости просто формировал бы непосредственные сигналы обратной связи под влиянием неустойчивости, обусловленной воздействием внешней среды. Однако такое устройство стабилизировалось бы только в пределах разнообразия, содержащегося в явном виде в состоянии его стрелок, а это разнообразие может оказаться недостаточным, чтобы справиться с непредвиденными изменениями окружающей среды. В противоположность этому машина Эшби обладает огромным количеством дополнительного разнообразия, заключенного между воздействиями окружающей среды и требуемой устойчивостью стрелок. Это позволяет гомеостату справляться с непредвиденными изменениями окружающей среды, выбирая свои собственные внутренние состояния таким образом, чтобы наилучшая стабилизация стрелок достигалась наиболее прямым способом. Такой принцип представляет собой значительный шаг вперед в развитии идеи саморегулирования. Он связан с понятием, которое Эшби назвал *ультраустойчивостью*. Это свой-

ство может быть реализовано только кибернетической машиной, способной перерабатывать случайную информацию, поступающую из окружающей среды, и обладающей большим разнообразием. При этом внутри машины генерируется случайная информация, имеющая такое же большое разнообразие.

Короче говоря, мы вернулись к прежней задаче построения машины, способной приспосабливаться в своем поведении к обстановке, не предусмотренной конструктором. Обычный регулятор может обеспечить устойчивость управляемой им системы только в том диапазоне изменения внешних воздействий, который был предусмотрен при его проектировании. Гомеостат, прежде всего, настраивается в соответствии с внешними условиями, он превращает себя в машину для решения задачи, которая не была ранее сформулирована, и только после этого решает задачу, отыскивая обычную устойчивость. Мы снова сталкиваемся с машиной, очень похожей на живой организм. Она сама может приспосабливаться к окружающей внешней среде и продолжает непредсказуемым образом стремиться к такому приспосабливающемуся поведению в силу большого разнообразия, которым эта машина обладает.

Если кто-нибудь и посчитает, что это изложение сущности гомеостата не содержит ничего особенно замечательного, то ему следует учесть, что такое впечатление можно объяснить только совершенно необычной новизной и оригинальностью открытия Эшби. Достаточно указать только на открытие математической основы адаптации, чтобы продемонстрировать выдающееся достижение, которое навряд ли можно в полной мере оценить при первом чтении, особенно учитывая, что математические выкладки не приводятся. Однако основное содержание развитых Эшби идей мы изложили, и дальнейшая оценка его работ станет ясной еще до окончания этой книги.

В этой главе мы рассмотрели ряд первых попыток имитировать такой вид приспосабливающегося поведения, на исследовании которого сосредоточена вся кибернетика,



В следующей главе будет приведено описание работ в иной области. Модели, к созданию которых направлены эти работы, уже очень близки к промышленному применению.

## Глава 14

### ОБУЧАЮЩИЕСЯ И ОБУЧАЮЩИЕ МАШИНЫ

Рассмотрим прежде всего новый тип биофизической модели, совершенно непохожий на модели, описанные в предыдущей главе. Этот тип принадлежит к классу машин, предназначенных для исследования нейрофизиологии мозга. На чем основана способность мозга распознавать образы, ассоциировать один предмет с другим, или, короче говоря, классифицировать? Чтобы получить ответ на этот вопрос, связанный с построением машины, имитирующей такой вид поведения живых организмов, обратимся к работам таких ученых, как Ф. Г. Джордж (F. H. George) и А. М. Аттли (A. M. Uttley). Вполне естественно, что прототипами таких машин являются конечный автомат и описывающая его теория сетей, ибо сеть нервных тканей с ее нейронами, принимающими два состояния, способна каким-то образом осуществлять классификацию, а этот процесс, в свою очередь, должен поддаваться некоторому описанию в терминах статистического поведения логической сети, и, следовательно, можно, по крайней мере в принципе, построить машину, имитирующую эту способность.

Вышедшая сравнительно недавно работа Аттли [26], в которой он исследует эту проблему, уже успела стать классической. Любой образ, по существу, нетрудно описать с помощью совокупности двоичных индикаторов, так же как и представить себе, что при помощи той же совокупности индикаторов такой образ можно запомнить и сравнить со входом, представляющим собой случайно меняющуюся последовательность образов. Можно было бы определить распознавание образа как совпадение одного из образов меняющейся последовательности с запомненным образом. Однако такой принцип построения модели механизма распознавания образов живот-

ными содержит две основные неясности. Во-первых, сложный образ обычно не возникает в мозгу мгновенно, его формирование растянуто во времени. Простейшим примером этого является музыкальная мелодия. Совершенно справедливо, что каждая нота представляет собой мгновенный образ, но форма всей музыкальной фразы является образом, растянутым во времени. Во-вторых, для мозга любой образ «распознаваем» даже тогда, когда он не точно совпадает с запомненным оригиналом. Мы не ошибемся в распознавании стола именно как стола, если допустим, что одна ножка подпилена, точно так же как не ошибемся в распознавании первых аккордов из какой-нибудь известной всем симфонии, если одна нота взята фальшиво. Таким образом, способность классифицировать, очевидно, должна быть основана на механизме, который может распознавать систему, имеющую протяженность как в пространстве, так и во времени, а также может оценивать неполные образы.

Классифицирующая машина Аттли отвечает обоим этим требованиям. Прежде всего, она воспринимает образ как нечто, имеющее протяженность во времени, т. е. ее вход задается нажатием некоторой последовательности кнопок. При этом через линию задержки проходит последовательность сигналов, кодируемая в виде пространственного образа. Следовательно, информация представляется в такой форме, что эту информацию можно рассматривать как совмещенную во времени, т. е. как обычную картину. Но можно ли получить при этом два идентичных образа, создаваемых не совпадающими во времени последовательностями? При мгновенном представлении два индикатора могут одновременно фиксировать сигналы, и информация о том, который из них (в отношении исходной последовательности) зафиксировал сигнал первым, была бы потеряна. Следовательно, необходимо добавить другой образ, представляющий собой кодированное сообщение о моментах, когда каждый индикатор перешел из одного состояния в другое. Все эти функции машина Аттли может выполнять, снимая тем самым первое затруднение.

Далее, проблема неполноты также преодолевается благодаря использованию сети, способной сравнивать

неполные образы с полными. Именно здесь в систему проникает элемент случайности. Ответ на вопрос, «принадлежит ли действительно» неполное множество к полному «запомненному» множеству, безусловно, не может быть непогрешимым. Теория информации показывает, что количество информации, передаваемое неполным множеством носителей, является недостаточным, чтобы дать полностью детерминированный ответ на этот вопрос; математика доказывает, что в этом случае остаются такие степени свободы, на которые нельзя наложить ограничения, и, наконец, логика поясняет, что рассматриваемый процесс является индуктивным по самой своей природе, а следовательно, в определенном смысле произвольным. С какой бы точки зрения мы ни подходили к этому вопросу, результат всегда один и тот же: вполне определенного ответа дать нельзя. Субъективный опыт, полученный на основе непосредственных наблюдений, безусловно, подтверждает этот теоретический вывод. И действительно, как легко ошибиться при распознавании образов, например, радостно окликнув какого-нибудь совершенно незнакомого человека, идущего по противоположной стороне улицы, внезапно приняв его за своего приятеля. Однако, с другой стороны, я лично еще никогда не принимал книгу за бутылку вина. Таким образом, очевидно, что даже неполный образ обладает своими собственными вероятностными характеристиками, отличающими его от всех прочих образов. Классифицирующая машина должна обладать способностью оценивать вероятность принадлежности данного неполного образа к известному более полному. В этом случае она может классифицировать вход с большей или меньшей степенью уверенности. Именно так осуществляет свои функции мозг, именно эти функции выполняет также машина Аттли.

По мере того как такая машина накапливает опыт в отношении вероятностных характеристик объектов, с которыми она сталкивается, она приобретает все большую уверенность в своих собственных действиях. Она, естественно, будет классифицировать вход все более быстро и с меньшим риском ошибки в случае, когда вероятности принадлежности образов к данному классу

близки к единице, чем в том случае, когда она должна сама уточнять значение этих вероятностей по мере накопления опыта. Этот механизм, по сути дела, сходен с *закреплением* ассоциаций в живой нейрофизиологической модели. На вход системы поступает сигнал, который должен быть направлен в определенную ячейку памяти. Когда мы начинаем изучать латынь, нам может стоить больших усилий вспомнить, что вход «mensa» соответствует выходу «стол». В дальнейшем, по мере того как вероятности корректируются на основе опыта, необходимая цепь «закрепляется»: вход быстро и безошибочно направляется на возбуждение соответствующего выхода. Такой вид ассоциативного процесса обычно называют обучением.

Исследование машины Джорджа, представляющей собой именно такую ассоциативную, или обучающуюся, машину, показывает, что для того, чтобы обладать целесообразностью (т. е. способностью к обучению), машина должна быть селективной. Это означает, что машина не реагирует без разбора на все случайные факторы, которые может создавать окружающая среда. Рассмотрим такой пример: пусть температура в комнате непрерывно изменяется и информация об этом поступает ко мне через ощущения тепла и холода. Однако это не означает, что я тем самым принужден подстраивать все свое поведение в соответствии с этим входом или обучаться распознавать текущее состояние температуры в комнате. Два физиологических механизма защищают меня от такого бессмысленного образа действий. Один из них представляет собой механизм физиологического «порога». Маргинальные<sup>1)</sup> изменения температуры «не проникают» до уровня моего сознания. Их недостаточно, чтобы вызвать необходимый нервный процесс. Однако, если температура поднимется выше определенного порогового значения, это дойдет до моего сознания и я открою окно. Другим защитным механизмом является торможение. Если человек глубоко погружен в какую-нибудь работу, то он просто может не

<sup>1)</sup> Изменения в диапазоне между верхним и нижним допустимыми значениями какой-либо величины. (Прим. перев.)

услышать голоса, который в обычных условиях ясно различает, ибо нервный процесс, доводящий голос до сознания, заторможен. По существу, импульсы торможения изменяют обычный пороговый уровень нейрона. Они делают нейрон менее чувствительным, так что для передачи информации по нерву требуется более быстрый поток возбуждающих импульсов, чем обычно. Таким образом, животное защищает себя от нежелательной информации и избавляет себя от необходимости автоматически обучаться распознаванию образов в виде случайных и тривиальных «шумовых фонов», всегда присутствующих в окружающей среде. Машина Джорджа [27] снабжена механизмом для моделирования этого свойства обучения. Как и машина Аттли, она может оценивать вероятность появления некоторой конкретной ситуации, а также определять, какое решение следует принять при появлении данной ситуации на входе, чтобы получить максимальную вероятность требуемого выхода.

Мы пока что ничего не говорили о значении гомеостата Эшби и классифицирующих и обучающихся машин Аттли, Джорджа и других ученых для промышленности. Читатели, имеющие опыт работы в промышленном производстве, возможно, уже составили себе представление о перспективах практического применения этих экспериментальных кибернетических машин в будущем. Мы выскажем некоторые более конкретные соображения о промышленных возможностях машин этого класса в следующей главе.

Чтобы закончить наш обзор новых кибернетических машин, остается (в силу ограниченного объема, сжато) рассмотреть одну из самых замечательных машин этого класса, которая является, пожалуй, первым подлинно кибернетическим устройством (в полном смысле этого слова), поднявшимся выше уровня «игрушки». Это устройство получило практическое применение и выпущается в промышленном исполнении. Большая заслуга в достижении первого практического результата принадлежит Гордону Паску (Gordon Pask). Тот факт, что появление этой машины на рынке не было по достоинству оценено, ярко характеризует общую неосведомлен-

ность о возможностях кибернетики. Ведь, узнав о создании такой машины, очень легко сказать, что это всего лишь новое хитроумное электронное приспособление. Однако всякий, кто уже знает отличительные особенности кибернетических машин и может оценить их новизну и захватывающие перспективы использования, наверняка сумеет ясно представить себе подлинное значение работы Паска. Мы уже обсудили идею построения обучающейся машины, способной к непрерывному воспроизведению меняющейся вероятностной модели некоторой ситуации на входе системы. Предположим теперь, что ситуация на входе представляет собой человека, пытающегося чему-нибудь научиться. Построим машину, которая сама предоставляет информацию, подлежащую усвоению. Примем, далее, что обучающийся вводит свою реакцию обратно в машину. Теперь представим себе, что одно из обучающихся устройств, о которых мы уже говорили, установлено в машине, причем реакции обучающегося представляют собой его вход. Заданием обучающегося устройства в любой момент времени является та часть информации, которую должен усвоить в этот момент обучающийся. Затем после некоторого «раздумья», измеряемого некоторым интервалом времени, в это устройство вводится ответ обучающегося, который может быть правильным или неправильным. Машина по-прежнему в состоянии обучаться, но на этот раз, усваивая данные о самом обучающемся. Она может накапливать вероятностные характеристики реакций обучающегося и таким образом строить изменяющуюся вероятностную модель процесса обучения. Если в дальнейшем при помощи механизма обратной связи машина использует эту модель для приведения информации, которую она предоставляет обучающемуся, в соответствие с его способностями к обучению, то она становится *обучающей машиной*.

Паск построил машину, которая выполняет все эти функции. «Ученик» содержится в ней самой, так что одна часть машины обучает другую. Он назвал эту машину-ученика Эвкратом. На своей первой экспериментальной установке Паск решил основные задачи, связанные с его изобретением, которое породило целое

семейство обучающих машин, предназначенных для специальных целей. Мы упоминали выше в двух словах о машине для обучения пилотов скоростных самолетов обращению с радиолокационной аппаратурой. Эта машина также входит в число машин, созданных Паском. Но сейчас мы остановимся на другой машине из этого же семейства, которую легче понять, а именно на машине для обучения работе на клавиатуре, причем речь идет о навыке работы на перфораторе, используемом для приготовления перфокарт и имеющем двенадцать клавиш. Условимся теперь, что вы, читатель, никогда ранее не видели перфоратора и хотите научиться пользоваться им. Как же будет в данном случае проходить обучение?

Перед вами перфоратор с пустыми клавишами, так как вы должны научиться работать «вслепую». Перед вашими глазами также машина Паска, подсоединенная к перфоратору; на машине вы видите маленькое окошечко и ряд красных лампочек, расположенных в том же порядке, что и клавиши перфоратора. В окошечке появляется цифра «7». Для вас это является командой нажать на клавишу «7». Но ведь вы не знаете, какая это клавиша. Посмотрите на лампочки: одна из них ярко загорается, указывая вам положение клавиши «7», которую вы теперь находите и нажимаете. Далее в окошечке появляется другая цифра, загорается другая лампочка и т. п. Постепенно вы начинаете запоминать расположение цифр на клавиатуре, и таким образом ваши реакции убыстряются. Тем временем машина оценивает ваши реакции и строит свою собственную вероятностную модель вашего процесса обучения. Эта модель учитывает, например, что цифру «7» вы теперь печатаете без всякой задержки, а цифра «3» по какой-то непонятной причине постоянно вызывает у вас затруднения. Машина обнаруживает это и учитывает при построении модели, сообщая вам результат по цепи обратной связи. Цифры, которые представляют для вас затруднение, появляются с все увеличивающейся частотой среди случайного во всех остальных отношениях представления цифр. При этом они выдерживаются также в течение более длительного времени, как бы говоря

вам: «Не торопитесь». Напротив, цифры, не представляющие для вас затруднений, сменяются с гораздо большей скоростью, т. е. скорость представления цифр является функцией состояния процесса обучения. Аналогичным образом ведет себя и система красных сигнальных лампочек, ибо по мере того, как вы усваиваете, где находится на клавиатуре цифра «7», световой стимулятор постепенно ослабевает. Учитель как бы все меньше и меньше подсказывает вам правильный ответ. Вскоре при условии, что вы продолжаете улучшать свои знания относительно расположения цифры «7», сигнальная лампочка, соответствующая этой цифре, перестает загораться вовсе. Лампочка, соответствующая цифре «5», также загоралась все более тускло, по мере того как вы все лучше усваивали расположение этой цифры. Но неожиданно в ваших знаниях обнаружился полный провал — цифра «5» совершенно не угадывается вами. Ваш учитель замечает эти новые ошибки, и цифра «5» выдается вам вновь в замедленном темпе с особой настойчивостью, а красный оптический сигнал вновь загорается с прежней яркостью.

Таким образом обучение продолжается. При этом вы прикладываете минимум умственного напряжения, по существу, вы совсем не напрягаете внимания и отдыхаете. Информационная сеть этой системы, включающей вас в машину, проходит через диоды и емкости, из которых состоит схема машины, через перфоратор, ваши сенсорные нервы и замыкается обратной связью, проходящей через ваши моторные нервы, перфоратор и машину. Обратная связь непрерывно подстраивает все переменные по критерию, которым является достижение поставленной цели. Короче говоря, у вас вырабатываются условные рефлексы. Вскоре машина заменяет критерий в виде отдельных цифр критерием в виде коротких, а затем длинных сочетаний цифр. Вы уже знаете, где расположены отдельные цифры, и обучаетесь далее нажимать определенные последовательности клавиш, вырабатываете ритм ударов для своих пальцев.

Такова обучающая машина. Мне не составило труда изложить это наглядное описание машины, ибо оно



является свидетельством моего собственного опыта работы с аппаратурой Паска. Я начал обучаться, не имея ни малейшего представления о работе на перфораторе, и уже через сорок пять минут печатал со скоростью восемь ударов в секунду, т. е. со скоростью квалифицированной перфоратчицы. Конечно, приобретенный мной навык не сохранился, его необходимо было усилить, закрепить практикой. Однако в лице машины Паска я встретился с бесконечно мудрым и терпеливым учителем, который как будто понимает все трудности, возникающие перед учеником, и стремится довести его навыки до совершенства. Каковы же основные кибернетические свойства описанной аппаратуры?

Прежде всего, замечательным свойством является способность обработки большого разнообразия. Учеником машины является человек: его реакции, его затруднения определяются чрезвычайно сложными механизмами, тысячами взаимосвязанных переменных. Его затруднения в освоении одной клавиши обусловлены жесткостью сустава пальца, в освоении другой — излишней уверенностью в своих знаниях, третьей (как знать!) — какой-то фрейдовской ассоциацией, приобретенной с детства. Машину, способную проанализировать столь сложную ситуацию, вряд ли можно было бы построить. Тем не менее машина Паска может обрабатывать все это разнообразие. Каким же образом ей это удается? Машина рассматривает ученика как «черный ящик». Она может управлять входами и измерять выходы, но не принимает во внимание характера внутренних связей ученика. Она просто манипулирует входами на основе вероятностных характеристик, которые она сама обнаруживает. К этому и сводится механизм ее работы.

Во-вторых, сама машина представляет собой «черный ящик». Ее входы (реакции ученика) влияют на ее выходы (представление цифр), но опять-таки невозможно *точно* указать каким образом. Вероятности запоминаются на емкостях Паска, но если заряды не усиливаются (как должно быть при успешном обучении), то обучение не имеет места и заряды просто исчезают в виде утечек.

В-третьих, вся система, включающая ученика и машину, представляет собой один из видов гомеостата, так как один «черный ящик» постоянно предлагает новые состояния другому, изменяя свое поведение под влиянием реакций партнера. Вся система стремится к устойчивому состоянию, критерием которого являются быстрота и точность работы. Более того, состояние равновесия будет ультраустойчивым, а не просто устойчивым, ибо эта система обладает способностью находить устойчивое состояние, подстраиваясь при непредвиденных возмущениях, поступающих из окружающей среды. При проектировании или предварительном программировании этой системы нет необходимости заранее учитывать любую конкретную причину возмущения. Так, например, если ученик попытается перехитрить машину, давая противоречивые ответы, то ему все равно не удастся ввести ее в заблуждение. Машина будет продолжать обучение неопределенно долгое время, отыскивая закономерности в странном поведении ученика, и последний, очевидно, устанет раньше машины.

В-четвертых, машина реализует кибернетические решающие функции, которые, как было показано ранее, принадлежат к классу функций, описывающих только реальные ситуации. Действия обучающей машины, их следствия и выводы, к которым она приходит, никогда не оцениваются по критерию «правильно или неправильно». Они представляют статистические решения, основанные на неполной информации, описывающей конкретные условия, и не определенные заранее алгоритмом. На эти решения оказывают влияние практически безграничное разнообразие и значительные «шумы», вследствие чего полученные решения могут оказаться противоречивыми и бессистемными. Их нельзя заранее вычислить или подготовить, так же как и невозможно впоследствии определить, были ли они правильными. По существу, они подобны действительным решениям, принимаемым, например, руководителем предприятия. Таким образом, вполне можно представить себе, что решения, принадлежащие к такому классу, могут быть использованы для выработки стратегий поведения.

Наконец, в-пятых, система Паска, включающая обучающуюся и обучающую машины, наглядно иллюстрирует само понятие кибернетического управления. Система постепенно приходит в уравновешенное состояние, хотя к ней не прикладывают резких и радикальных воздействий, в ней не фигурируют категорические приказы и наказания. Мы наблюдаем только эволюцию — жизнеспособное развитие к зрелости. Таков колоссальный вклад Гордона Паска в теорию и практику кибернетики [28].

Обзор первых биофизических моделей, занявший целые две главы, теперь окончен. Не считая машин, отыскивающих выход из лабиринта, работы по созданию которых проводились в основном в США, остальные описанные машины английского происхождения. Возможно, аналогичные работы проводятся и в других странах, что наверняка имеет место в области медицинской кибернетики. Но даже из того, что сделано в Англии, далеко не все было упомянуто. Наш обзор был бы несколько более полным, если бы мы рассказали об известных работах Маккея (MacKay) по теории информации и о работах Дж. Янга (J. Z. Young) и У. К. Тейлора (W. K. Taylor) в области биологии. Вполне уместно также упомянуть о машинах-переводчиках, исследуемых Бутом (Booth), работающим в Лондонском университете, и миссис Брейтвейт (Braithwaite), работающей в Кембридже, хотя эти машины (наряду с подобными им, разрабатываемыми в России), пожалуй, не обладают всеми признаками кибернетических устройств, несмотря на их кажущееся сходство с биофизическими моделями.

Машины, отыскивающие выход из лабиринта, стремящиеся к цели, гомеостазису, классифицирующие, обучающиеся и обучающие машины — все эти кибернетические устройства охватывают, по крайней мере в зародыше, многие стороны поведения живых организмов. Отличительной особенностью машин всех этих классов является способность к обучению и приспособлению к окружающей среде. Это основные понятия, которые стремятся изучить и смоделировать кибернетики. И в частности, для управления в промышленности киберне-

тики стремятся найти аналогию в живой природе. Они всегда представляют промышленное предприятие в виде живого организма, взаимодействующего с окружающей средой и стремящегося к самосохранению. Это краткое описание самых первых представителей машин новых классов по крайней мере поможет читателю увидеть, в каких направлениях работает мысль кибернетиков в этой области. Возможно, оно также убедит его в том, что их цели в конечном счете достижимы.

## Глава 15

### РАЗУМНЫЕ САМОПРИСПОСАБЛИВАЮЩИЕСЯ МАШИНЫ

На протяжении книги мы неоднократно привлекали внимание читателя к тому факту, что далеко не все машины относятся к классу механических устройств, подобно тому как не все функции машин связаны с физической энергией. Обычные машины в общем случае осуществляют усиление энергии. В качестве примеров можно привести столь различные машины, как громкоговоритель, усиливающий слабый сигнал, систему блоков, используемую для усиления способности человека поднимать грузы, и менее явные усилители типа токарных станков, которые увеличивают способности человека направленно и точно прикладывать энергию к обрабатываемому материалу. Теперь мы уже близко ознакомились с представлением о совершенно иных видах машин, и это дает нам возможность начать рассмотрение машин, главным назначением которых является усиление *умственных способностей*.

Насколько правомерно утверждение о возможности построения таких машин? Ответ на этот вопрос зависит от того, какое содержание вкладывается в понятие умственных способностей. Люди часто применяют это слово почти в мистическом смысле, как будто человеческий разум бессмертен. Однако для настоящего ученого умственные способности представляют собой просто статистический фактор поведения, обозначаемый «*g*». Рассмотрим какое-либо совершенно произвольное испыта-

ние способностей человека. Очевидно, что результат испытания непосредственно обусловлен искусством рук испытуемого или его способностью манипулировать словами и числами. В каждом конкретном испытании психологи изучают такие явно выраженные качества при помощи статистических методов анализа факторов. Они учитывают сложность отдельного испытания в терминах того, до какой степени оно «нагружено» каждой из основных способностей, явно облегчающей решение задачи, предлагаемой испытанием. Нет ничего удивительного в том, что при применении таких методов анализа всегда что-то не учитывается, какой-то элемент не принимается во внимание. Этим элементом и является как раз «*g*» — нагрузка. Это отрицательно определяемое, но чрезвычайно ценное функциональное свойство и представляет собой то, что неточно называют «умственными способностями». Итак, способность, носящая это название, является, по существу, способностью разрешать различные задачи, это нечто, не связанное со специально полученным образованием и не равнозначное какой-либо конкретной квалификации. Она характеризует индивидум в целом, связывая отдельные конкретные способности в *общую интегральную способность*, которая, пожалуй (несмотря на попытки создания статистических моделей), в конечном счете является неразложимой.

Человеческий разум в таком понимании представляет собой именно тот фактор, который привел человека на вершину генеалогического древа животного мира. Этот фактор, позволяющий предвидеть, вооружающий силой воображения, связан с развитием мозга животных и прежде всего с развитием его лобных долей, с увеличением относительной продолжительности периода созревания до наступления половой зрелости. Физиологи, анатомы, психологи и т. д. по-разному подходят к объяснению владычества человека в животном царстве. Люди, не занимающиеся наукой, обычно судят о человеческом разуме по его наивысшим достижениям в искусстве и духовной жизни. Все это сказано для того, чтобы очертить круг проблем, связанных с вопросом умственных способностей, и чтобы следующее утверж-

дение не показалось необоснованным и даже обидным. Дело в том, что у любого индивидуума фактор «*g*» является, по-видимому, врожденным и неизменным. Человек не может развивать свои умственные способности так, как он может развить мускулы. Единственно, что он может сделать, — это усовершенствовать свое искусство в *применении* умственных способностей. Это важное различие, которое обычно неспециалист не замечает. Следует признать, что психолог также не в состоянии установить его настолько четко, насколько ему это хочется. Пожалуй, оно полностью выявляется только в идеальных условиях эксперимента, которые, однако, никогда не удастся целиком реализовать на практике. Тем не менее представление о врожденных умственных способностях как о константе «*g*» может служить по крайней мере аппроксимацией истинной способности человека, отличающей его от всех прочих животных. Кроме того, это представление оказывается весьма плодотворным для практической прикладной психологии.

Эта сторона вопроса очень существенна для применения кибернетических идей. Допустим, например, что перед человеком стоит задача извлечь меч Экскалибур из каменной глыбы<sup>1)</sup>. Этот подвиг *prima facie*<sup>2)</sup> лежит в пределах человеческих сил, и можно ожидать, что появится какой-нибудь новый король Артур и совершит его. Но если задача заключается в том, что требуется поднимать колоссальные каменные глыбы для постройки египетских пирамид, то такой подвиг явно вне пределов физических сил человека. В этом случае необходимо приложить разум, чтобы добиться усиления мускульной энергии. Фантастически сложные интеллектуальные задачи, например в математике, ожидают рождения гения, который в конце концов решает их. Но когда возникают интеллектуальные проблемы, явно выходящие за пределы возможностей человеческого ума, то такие надежды тщетны. Люди обычно ошибочно предполагают, что решения современных проблем управления в

<sup>1)</sup> Одна из средневековых английских легенд о подвигах короля Артура. (Прим. перев.)

<sup>2)</sup> На первый взгляд (лат.). (Прим. перев.)

социальной, экономической и промышленной сферах лежат в пределах человеческих возможностей или что существующие способности могут быть развиты до необходимого уровня путем образования и обучения. Кибернетика стремится в принципе рассеять это заблуждение. В действительности мозг не обладает достаточным объемом и специализацией, чтобы решить эти проблемы. Выход из этого затруднения может быть найден по аналогии с вышеприведенным примером. Необходимо приложить разум для усиления интеллектуальной энергии. Таким образом, мы приходим к понятию усилителя умственных способностей, возможность построения которого обоснована теоремами Тьюринга — Дж. фон Неймана, рассмотренными в главе 9.

Первым кибернетиком, который серьезно рассмотрел этот вопрос, является, по-видимому, Эшби [29]. Он указывает, что усиление умственных способностей в такой же степени, в которой человек достиг усиления физической энергии, имело бы весьма поразительные результаты. Одной из классических мер умственных способностей является мера, определяемая такими испытаниями «*g*», которые оцениваются по усредненной возрастной шкале так, что может быть установлен «умственный возраст» испытуемого. Этот возраст, выраженный в виде отношения к действительному (хронологическому) возрасту, дает меру, называемую «коэффициентом умственных способностей» (*I. Q.*). Естественно, что нормальный коэффициент умственных способностей наблюдается тогда, когда умственный и хронологический возраст совпадают; это отношение принимается за 100%. Умственные способности ниже или выше нормальных определяются соответственно числом менее или более 100%, умственные способности всего человечества в статистическом смысле подчиняются нормальному закону распределения. Это означает, что существует асимптотическая верхняя граница умственных способностей человеческого разума, что необходимо учитывать наряду с тем фактом, что врожденные умственные способности отдельного индивидуума невозможно развить за счет образования. Таков подход Эшби к этому вопросу, подход, на основе которого он стремится на-

глядно доказать необоснованность оптимистического убеждения в том, что человек когда-либо окажется в состоянии решать стоящие перед ним в настоящее время проблемы управления, полагаясь только на свой собственный разум и не прибегая к помощи технических средств. Дело в том, говорит Эшби, что требуемое в современных условиях и уже достигнутое усиление физической мощности составляет величину порядка десяти тысяч. В современной промышленности мощность рабочего, составляющая в среднем около 0,1 л. с., усиливается до средней величины 1000 л. с. Аналогичная степень усиления умственных способностей дала бы значение коэффициента умственных способностей, равное одному миллиону. На этом Эшби останавливается, хотя он мог бы развить свою мысль далее и подсчитать вероятность появления хотя бы одного человека, обладающего таким уровнем умственных способностей. Для тех, кто привык мыслить статистическими категориями, я приведу другое сравнение: такой человек характеризовался бы 620 стандартными отклонениями от нормы.

Именно в этом пункте раскрывается перед нами в истинном свете то направление развития машин — кибернетических «игрушек», которое мы проследили. Кибернетики в конечном счете не собираются ограничиться интересными безделушками, которые, возможно, и найдут какое-нибудь применение в промышленности. Мы должны исследовать возможность удовлетворения насущных потребностей производства. Выше было высказано соображение, что стоящие перед нами в сфере промышленного производства проблемы не могут быть решены только за счет безоружного интеллекта, независимо от того, какие бы большие надежды ни возлагались на образование. В то же время никто, по-видимому, не решится утверждать, что нет острой необходимости в решении этих проблем. Малообоснованный оптимизм должен уступить место строго научному подходу. Отсюда возникает насущная потребность построения усилителя умственных способностей, и если специалист должен отказаться от своего оптимизма, то кибернетик наверняка должен отказаться от дилетантского развлечения игрушками. Наше обращение адресовано,



конечно, не к кибернетикам, масштаб работы которых определяется имеющимся в их распоряжении временем и материальными возможностями. Это призыв к финансированию и организации научно-исследовательских работ в области кибернетики в таком крупном масштабе, которого нет в наши дни нигде в мире (исключая, возможно, Россию).

Попытаемся теперь, используя уже имеющиеся в нашем распоряжении знания, представить себе, какие плоды могло бы принести развитие кибернетики в промышленности. Принципиальный ответ на этот вопрос также можно найти у Эшби, значение блестящего таланта которого для формирования идей кибернетики в период ее становления вряд ли можно переоценить. Однако сам Эшби не работает над решением задач управления производством, и все его труды в основном посвящены его собственным исследованиям гомеостата. Мы же хотим рассмотреть промышленную задачу, привлекая для этого различные идеи, которые были освещены в этой книге. Поэтому в дальнейшем мы больше не будем ссылаться на Эшби, но укажем только, что основа понимания роли *селективности* для решения интересующей нас проблемы заимствована непосредственно у него.

Биологической моделью промышленного предприятия или фирмы является живой организм, взаимодействующий с окружающей средой. Эту модель мы уже привлекали ранее, и в данном случае она предназначена только для того, чтобы сосредоточить вокруг нее наши рассуждения. Но при этом не следует думать, что в этой аналогии мы намерены усматривать нечто большее, чем ее общее экологическое значение и удобство. Представим себе некоторый организм, обладающий протяженностью и материальным единством. Он изменяется, развиваясь и разрушаясь, приспособляясь к новым внутренним и внешним воздействиям. Питание этого организма составляют капитал, рабочая сила и сырье, а в результате его деятельности образуется дополнительный капитал в форме прибыли, производятся товары и удовлетворяются духовные потребности людей. Внутренние службы предприятия подобны системе кро-

вообращения и эндокринных желез, они питают энергией отдельные части организма и обуславливают их работу. Связи, реализуемые внутри предприятия, которые представляют собой средства управления и объединения предприятия в единое целое, подобны нервной системе (хотя, как мы показали с самого начала, пока что эти средства являются весьма несовершенными: продолжая биологическую аналогию, можно сказать, что они находятся на уровне нервной системы губки). Это общее внутреннее сходство предприятия с живым организмом дополняется его рефлексам, т. е. заложенными в него реакциями, определяемыми системой управления производством, а также наличием мозга предприятия, которым является его руководство. Однако для внешнего мира предприятие выступает как часть организма промышленной фирмы, функционирующей в некоторой окружающей среде и способной воспринимать ее воздействия в виде изменения в конъюнктуре рынка и в социальной, политической и экономической обстановке. Этот организм должен непрерывно реагировать как единое целое в соответствии со своей структурой и свойствами на случайные возмущения окружающей среды и свои собственные изменения и неполадки.

Одно время, к примеру в начале прошлого века, мы в Англии пытались рассматривать этот организм как простую детерминированную систему. Промышленник в то время, по существу, управлял входами предприятия по собственному произволу, ибо в период экономического расцвета капитал имелся в избытке, рабочая сила в условиях упадка социальной системы была в изобилии, а в сырье в эпоху интенсивного открытия месторождений полезных ископаемых не испытывалось недостатка. В тех условиях можно было заставить «организм», т. е. предприятие, подчиняться категорическим решениям мозга главным образом потому, что всегда имелась возможность увеличения числа рабочих, а сами рабочие не предъявляли особых претензий. Окружающая среда в целом не создавала особых помех, так как это была эра международной экспансии. В наше время современная теория руководства промышленностью считает предприятие или фирму сложной веро-

ятностной системой. Многие методы этой теории, например исследование производственных процессов, организация и методы руководства и т. п., достигли вершины своего развития в теории операций, потому что руководство промышленностью — это именно та область, в которой приходится исходить из современных гипотез в отношении систем, которые одновременно являются сложными и вероятностными. Именно на этом этапе развития методов руководства возникают непреодолимые трудности, ибо (в соответствии с нашей приблизительной классификацией систем) предприятие или фирма являются не просто сложными, но очень сложными системами. Если перевести это положение на язык возможностей человеческого разума, то можно сказать, что мы работаем над решением проблем управления, явно не поддающихся невооруженному разуму. Это становится совершенно очевидным из рассмотрения следующей аналогии.

Если возникает задача руководства, которую можно сузить, иначе говоря, если можно выделить небольшую область деятельности организма для изучения и усовершенствования, то такое частичное исследование все еще будет относиться к классу «сложных» систем, и методы теории исследования операций в этом случае работоспособны. Подобно тому как хирург вскрывает изолированный участок человеческого тела, чтобы удалить аппендикс, руководство может разрешить изолированную проблему. Но в чем заключается общая задача руководства? Она сводится к обеспечению условий существования фирмы или предприятия. Частные задачи должны решаться именно с этих позиций. Так, например, руководству может потребоваться научно обоснованное решение относительно закрытия отдельного цеха предприятия или отдела фирмы. Если методами теории операций удастся изолировать этот участок, то можно его исследовать, как сложную вероятностную систему. Прежде всего необходимо сформулировать критерий, отвечающий на вопрос, чего стремится достигнуть руководство. Если речь идет о максимизации прибыли, то все обстоит благополучно. Если задача заключается в минимизации рабочей силы, то ученый также в состоя-

нии решить ее. Если требуется максимизировать производительность предприятия или свести к минимуму капиталовложения, то и в этих случаях задача разрешима. По существу, мы перечислили именно те задачи, которые в настоящее время наиболее успешно решаются методами теории исследования операций. При этом, однако, предполагается, что определенная область может быть целесообразно изолирована, подобно тому как поступает хирург при операции по поводу аппендицита. Но предположим теперь, что хирургу нужно сделать операцию на печени или мозжечке. Если он сделает то, что представляется наиболее рациональным с точки зрения этих органов, не учитывая весь организм в целом, то он может просто решить удалить их.

Могут возразить, что хирургу отлично известно, что он имеет дело с живым организмом. Руководство предприятием также наверняка осознает, что решение проблемы для какой-либо изолированной части предприятия, рассматриваемой в качестве автономной замкнутой системы, может оказаться неверным с точки зрения общего благополучия всего предприятия. Здесь следует со всей решительностью высказать два соображения. Прежде всего, на практике руководство далеко не всегда осознает, когда действительно допускается изолированное рассмотрение отдельного участка производства и когда этого нельзя делать. Любой специалист по теории исследования операций, имеющий практический опыт, безусловно, сталкивался с такими случаями, когда перед ним ставили псевдозадачи. Мы называем их «псевдозадачами», ибо решение, безусловно оптимальное для локальной системы, может оказаться неправильным или даже катастрофическим для всей системы в целом. Во-вторых, гораздо более опасным является случай, когда руководство уже само заранее признает, что задача затрагивает весь организм, или убеждается в этом на опыте. *Что же происходит при этом с критерием оптимальности?* Общей целью предприятия как единого организма является не только максимизация прибыли. Использование всего арсенала научных средств для максимизации текущей прибыли означало бы, очевидно, принесение в жертву репутации

фирмы или предприятия, что в конечном счете приводит к гибели всего организма. Значит, если рассматривать фирму или предприятие как единый организм, то нужно задаваться *многими* критериями, а решение любой задачи должно удовлетворять этим критериям поведения, относящимся к различным областям деятельности. При этом возникает следующее затруднение: некоторые критерии поведения наверняка окажутся противоречивыми.

И это не является виной руководства. Вывод о противоречивости критериев вытекает из исследования биологической модели. Текущие цели любого живого существа являются противоречивыми. Так, например, я могу стремиться получить удовольствие, выпивая виски, но, к счастью, я не могу превратить себя в машину для максимизации поглощения виски, не пренебрегая другими целями. Как живой организм, так и любая фирма имеют много противоречивых текущих целей, и это является одним из решающих факторов, обуславливающих необходимость описания предприятия или фирмы как очень сложной вероятностной системы. Это, несомненно, их законное место в классификации систем, так же как и законное место крупного биологического организма. Как только мы доходим до этой стадии, действенным может быть только кибернетический подход. Действительно, из всех известных научных методов решения таких задач только кибернетика признает и принимает неопределимость и сложность, выходящую за пределы возможностей человеческого разума, и находит решение в *саморегулировании*, тогда как другие виды управления не только не применимы, но даже не мыслимы. Именно потому, что кибернетика учитывает особенности задач такого рода, она по крайней мере способна найти выход из противоречивости целей и исходить из единственного критерия успеха — безусловного длительного сохранения существования.

Далее, сохранение существования в течение длительного времени для промышленного предприятия означает сколь угодно продолжительный период, в течение которого все виды внешних и внутренних изменений будут влиять на предприятие как на единый организм. Таким образом, сравнение в этом отношении с отдельным

организмом не является вполне удовлетворительным, так как в течение жизни одной особи окружающая среда обычно резко не изменяется. В то же время предприятие или фирма на протяжении своего существования могут столкнуться со многими совершенно различными экологическими условиями. Следовательно, задача адаптации в этом случае гораздо более совпадает с задачей адаптации целого вида, а не отдельной особи, принадлежащей данному виду. Каким же образом целый вид приспособливается к изменению окружающей среды? Это происходит за счет плодовитости и мутаций. Предположим, что по мере смены поколений и изменения условий окружающей среды некоторое свойство животного становится все менее и менее ярко выраженным. Эта черта меняется случайным образом в определенных пределах в каждом последующем поколении. Механизм адаптации сводится к следующему: особи, у которых изменение важного для сохранения существования свойства направлено в отрицательную сторону, могут легко погибнуть; особи, у которых это изменение происходит в благоприятную сторону, склонны к выживанию и усвершенствованию. Таким образом, вид в целом имеет тенденцию к адаптации, постепенно изменяя свои усредненные свойства, приспособляясь к окружающей среде. Если мы представим себе последовательность поколений во времени как единый организм, протяженность которого во времени представлена его потомством, то увидим, что вид в целом как бы обучается: он приспособливается, используя механизм обратной связи. Для полноты картины отметим, что сам вид, в свою очередь, существенно влияет на окружающую среду, особенно если иметь в виду животных, составляющих источник питания данного вида. Таким образом, между видами и окружающей средой существует связь, подобная связи в системе ученик — учитель, которую, кстати, можно уподобить Эвкрату в машине Паска.

Однако здесь мы не имеем прямого изоморфизма промышленного предприятия или фирмы, ибо они не способны к размножению, т. е. не дают потомства и не умирают. Тем не менее достаточно внести небольшие

изменения, чтобы аналогия между животным видом и предприятием представляла собой достаточно удовлетворительную модель. В течение определенного длительного периода времени отдельные части предприятия, части его системы управления, некоторые функции, осуществляемые предприятием, действительно устаревают и заменяются новыми. Эти замены не являются просто буквальными копиями оригиналов. При их реализации всегда действует механизм обратной связи, а следовательно, непрерывно происходит адаптация. Недостаток такой модели заключается в том, что, в то время как биологические виды используют весьма расточительную систему случайных мутаций для приспособления своих свойств к изменениям окружающей среды, предприятие не может позволить себе роскоши пользоваться таким рискованным средством. Для установления точного различия между двумя системами прибегнем к уже известным нам преобразованиям и к помощи теории информации.

Прежде всего, отметим, что обе системы обладают в принципе огромным разнообразием и в этом отношении они, несомненно, вполне сравнимы. Более того, на протяжении длительного периода, в течение которого происходит адаптационное изменение, каждая система характеризуется потенциальным разнообразием, охватывающим отдельные перестановки, происходящие в пределах основного разнообразия. Завод, в частности, может служить примером большого числа преобразований основного разнообразия в «последующем поколении», выражаемых в том, что машины меняются, капитал используется иначе в производстве и в акциях и т. п. В то же время биологический вид также претерпевает много преобразований в структуре своих генов. Во-вторых, обе системы выживают, т. е. успешно решают стоящую перед ними задачу приспособления. В этом смысле они также аналогичны друг другу. Но при рассмотрении третьего аспекта мы обнаруживаем заметное различие. Выжившие представители биологического вида составляют лишь небольшую долю всего потомства, большинству которого не удалось выжить вследствие «неправильных» мутаций. Промышленное

предприятие лишь весьма отдаленно напоминает этот механизм. Иногда его механизм адаптации может сделать неверный шаг: тогда наступает период развития, в течение которого некоторые из характеристик неблагоприятны для выживания. Однако такие случаи наблюдаются редко, но даже тогда, когда они имеют место, вводится новое, в высшей степени целесообразное воздействие, устраняющее нежелательные свойства. Можно без большого преувеличения сказать, что наша земля буквально усеяна останками великого множества погибших биологических особей, в то время как даже сама мысль о «невыживших», т. е. заброшенных, предприятиях является совершенно нереальной. И все-таки в целом эта модель правомерна, ибо организмы обоих типов, т. е. предприятия и биологические виды в широком смысле, сумели сохранить себя и приспособиться к условиям окружающей среды. Обе категории организмов, по сути дела, претерпевают процесс, называемый отбором.

В животном мире этот процесс называется «естественным отбором». Прилагательное «естественный» означает, что механизм отбора действует самопроизвольно, другими словами, правильные мутации, необходимые для сохранения существования, находятся естественным путем, ибо на неправильные накладывает свое вето смерть. Таким образом, все, что продолжает существовать, является «правильным». В промышленности вето на неправильные мутации накладывает руководство. Эти мутации не возникают совершенно беспорядочно, и им не дают возможности развиваться до самоуничтожения, как это происходит в природе. Руководство *предвидит*, что данная мутация может иметь нежелательный результат, и накладывает на нее запрет. Руководство предвидит также, что правильная мутация обладает свойством сохранять существование, и *выбирает* ее. Итак, предвидение и выбор представляют собой главные атрибуты руководства. Эти же категории являются основными свойствами разума. Предвидение сводится к построению бихевиористической модели системы. Эта модель обогащается опытом, что и представляет процесс обучения. Сочетание методов теории исследования



операций, применяемых для оценки вероятностей различных возможных результатов, с кибернетическими методами обучения системы моделирует процесс предвидения, который всегда является случайным, индуктивным процессом (будь то у живого существа или в технических системах), приобретающим смысл только в терминах множества доверительных пределов, которые может установить теория вероятностей. Следовательно, наиболее рационально, по-видимому, представлять себе возможность усиления умственных способностей в терминах усиления избирательности.

Итак, мы расчленили теперь общую задачу на составные части, установили, какая из них является наиболее существенной, и свели всю задачу исследования к обозримому объему, ибо представление об усилении избирательности нетрудно осмыслить. Вся деятельность руководства сводится именно к этой форме. Директора завода спрашивают, будет ли задута домна утром в среду на следующей неделе, и он отвечает «да». Это решение содержит один бит информации; однако, принимая его, директор завода выбирает несравненно большее число решений. Его первичное решение сразу включает в себя также выбор начальника смены и бригады доменщиков, оно подразумевает использование возможных сырьевых материалов, ограничивает разнообразие ситуации сотнями способов, оно производит выбор кнопок, которые будут нажаты, и примерно определяет, когда это произойдет, оно выбирает интервал времени, в пределах которого будет поступать готовый чугун. Вследствие этого оно помогает осуществить выбор определенных мартеновских печей и прокатных станов и в конечном счете отчасти определяет метод выполнения заказов и удовлетворения потребителей. По сути дела, цепь решений, приводимая в действие этим первичным решением в один бит, бесконечна, однако они исчезают, как рябь на воде, под влиянием других первичных решений. Механизм руководства представляет собой усилитель избирательности. Он в точности аналогичен такому усилителю мощности, как, например, подъемный кран. Действительно, в этой машине легкое первичное движение в виде нажатия кнопки приводит в действие

цепь событий, которая в результате заканчивается поднятием с земли тяжелой двадцатитонной отливки. При этом в обоих случаях энергию для осуществления усиления требуется внести в систему извне. Когда речь идет о подъемном кране, эта энергия принимает форму электричества, а в случае принятия решения она представляет собой нервную энергию человека. Но всегда небольшой вход, имеющий соответствующую энергетическую форму, выбирает множество других селекторов, которые продолжают выбирать последующие селекторы, и т. д., в результате чего первоначальный вход усиливается.

Каким же образом можно представить себе этот механизм в виде реальной машины? Мы уже имеем один ответ на этот вопрос на примере гомеостата Эшби. Если две системы изменяются случайным образом, то их можно связать так, чтобы выход одной являлся входом другой и наоборот. Тогда системы будут взаимодействовать и их общее разнообразие станет очень велико. При этом первая система строится так, что она меняет свои состояния случайным образом, пока не достигает некоторого состояния равновесия. Вторая система построена аналогично, но имеет свой собственный критерий равновесия. Но коль скоро обе системы объединяются в одно неделимое целое, достижение одной из них своего собственного состояния равновесия уже является недостаточным: как только эта система «попытается» остановиться в равновесии, выход другой системы, являющийся входом первой, снова нарушит его. Таким образом, по выражению Эшби, каждая подсистема обладает реальной властью накладывать вето на решение своего партнера остановиться. Вся система в целом может остановиться только тогда, когда *обе* подсистемы придут в свои собственные состояния равновесия, к которым они стремятся. Теперь предположим, что машина такого типа построена изоморфной какой-нибудь действительной системе. Тогда руководителю остается принять только два решения: он должен определить состояния подсистем, которые он желает достичь; далее, произведя этот первичный выбор, он может не вмешиваться в действие системы, предоставив

этой гомеостатической машине принимать все остальные решения. Она осуществляет это, прибегая к процессу случайных мутаций в каждой подсистеме и стараясь отыскать приемлемую, с точки зрения общего критерия, комбинацию значений переменных в каждой подсистеме. Такой процесс представляет собой аналогию размножения животных. Машина в целом продолжает работать, запрещая различные возможные комбинации, что можно сравнить с гибелью потомства, пока не достигается устойчивое состояние для всего организма. Это и представляет собой аналогию выживания.

Для пояснения сформулированных положений рассмотрим конкретный пример. Представим себе небольшое предприятие, выпускающее какой-нибудь один вид продукции, например несложное изделие. Это предприятие имеет материально-технический склад, который снабжает его запасными частями, инструментом и т. п. Мы имеем здесь две подсистемы, каждая из которых может иметь огромное число различных «заданий». Задание предприятия представляет собой программу использования машин, а заданием склада является план снабжения предприятия по каждому виду материалов, имеющихся на складе. Руководитель предприятия на основании экономического анализа устанавливает, что для обеспечения рентабельности производства необходимо выпускать не менее 100 изделий в сутки. Поскольку он не может продать более 112 изделий в день, устойчивое состояние для предприятия определяется условием производства 100—112 изделий в сутки. Руководитель осуществляет управление предприятием для установления этого устойчивого состояния, используя метод финансово-экономического анализа работы предприятия, который производится сотрудниками планово-экономического отдела. Далее, он использует методы теории операций для того, чтобы определить минимальный расход материалов, необходимых для производства 100—112 изделий. Группа специалистов по теории исследования операций разрабатывает статистическую модель, определяя вероятности, при которых производство замедляется из-за нехватки запасов материалов на складе при условии поддержания производительности

на заданном выше уровне. Коэффициенты статистической модели определяются на основании предшествующего опыта, и далее на электронной модели проводят исследования с целью установления минимальной стоимости запасов, гарантирующей устойчивость производства при приемлемо малом уровне риска. Поскольку задача решается статистически, то расход материалов (в денежном выражении) определяется, например, в пределах 800—1000 фунтов стерлингов. Таким образом, для реализации своих управленческих функций руководитель предприятия использовал теперь другое вспомогательное средство.

Далее, он обнаруживает, что фактический запас материалов на складе в пять раз превышает тот запас, который по его расчетам достаточен для работы предприятия. С инако заведующий складом заявляет, что он не может уменьшить свои запасы, потому что, как показал опыт, при сокращении запаса какого-либо материала очень скоро обнаруживается его нехватка. Начальник производства настаивает на том, что он использует наилучшую программу производства и что в случае аварий или брака из-за неисправности станков или износа инструмента он должен иметь резерв на складе. В данном случае обычные методы финансово-экономического анализа недействительны. Специалисты по теории исследования операций заявляют, что они не могут продолжать исследования далее, не моделируя зависимости каждого предмета, хранящегося на складе, от каждой мыслимой программы предприятия. Такая задача, конечно, нереальна, но при любых обстоятельствах должны выполняться как задание по выпуску продукции, так и задание по материально-техническому обеспечению производства. В чем же теперь заключается задача руководителя?

Руководитель применил свои умственные способности (а также умственные способности своих подчиненных) для нахождения оптимальных состояний каждой подсистемы. Ему известно, что должны существовать задание для предприятия (определенный план производства) и задание для склада (т. е. план обеспечения предприятия необходимыми материалами), которые

могут быть реализованы. Но его умственные способности (в совокупности с умственными способностями его подчиненных) недостаточны, чтобы конкретно определить, какими должны быть эти задания. Это объясняется вполне естественной причиной: каждая подсистема содержит большое разнообразие, а при свободном взаимодействии подсистем число возможных в пределах этого разнообразия комбинаций достигает астрономических величин. Руководитель вполне может сделать первичный выбор между двумя альтернативными решениями, но он должен иметь возможность усилить свою собственную способность выбора (т. е. свои умственные способности) для того, чтобы учитывать все разнообразие и принимать множество дополнительных конкретных решений, обеспечивающих достижение поставленной цели.

Кибернетический усилитель умственных способностей, который требуется для руководителя в данном случае, безусловно, может быть построен. Такая подсистема, как предприятие, может быть представлена изоморфизмом (возможно, электронным), в котором машины, участвующие в процессе производства, связаны друг с другом соотношениями, определяющими их поведение в реальных условиях. Эта система, работающая под влиянием случайных воздействий (вводимый в машину «шум»), в конечном счете переберет все возможные выходы предприятия от нуля до (к примеру) 187 изделий (максимально возможный выход). Аналогично изоморфизм подсистемы, представляющей материально-технический склад, в ходе длительных испытаний под влиянием случайных воздействий в состоянии перебрать в денежном выражении все возможные запасы материалов от 0 до 3000 фунтов стерлингов (максимальная емкость склада). Эти две подсистемы связываются гомеостатически, как взаимно запрещающие системы, по критериям, установленным руководителем для каждой из них. Тогда вступает в действие усилитель умственных способностей, предлагая различные состояния и контрсостояния одной подсистемы другой. Этот процесс моделирует «продумывание задачи» с оценкой всех возможных вариантов (чего не мог бы

сделать руководитель). Каждый раз, когда изоморфизм предприятия устанавливает программу, обеспечивающую производство 100—112 изделий, предлагается остановка. Но если в это время изоморфизм склада характеризуется стоимостью запасов больше или меньше 800—1000 фунтов стерлингов, то он накладывает вето на это предложение, и наоборот. Отметим, что такое «продумывание» задачи осуществляется со скоростью электронных процессов. Эти скорости намного превышают «скорость мысли», которую следует измерять в терминах средней скорости передачи импульса по нервной сети.

Когда достигается ультраустойчивое состояние, усилитель останавливается, и тогда можно определить значения двух оптимальных заданий и принять их в дальнейшем в качестве оптимального решения. Следует отметить, что усилитель моделирует некоторую ограниченную функцию мозга по принципу «черного ящика». Он представляет собой кибернетическую машину, которая способна эффективно воспринимать и перерабатывать огромное разнообразие, оценивать вероятности, характеризующие реальную действительность, и которая в то же время является саморегулирующейся. Разум без соответствующей помощи не может достигнуть такого результата, так как он не в состоянии запомнить и оценить каждую пару заданий, не в силах достаточно быстро сопоставить все возможные пары заданий между собой, не может мысленно построить модель с необходимыми вероятностными характеристиками и не обладает механизмом для достижения ультраустойчивости при решении задач такого типа. Мозг может выполнять и действительно выполняет все эти операции при условии, что задача является очень и очень узкой. Именно на этом и строится кибернетическая модель осуществляемой мозгом функции выбора.

Результатом деятельности нашей машины, несомненно, является выбор решений (селективность), признанный нами основным атрибутом разумного поведения; в то же время, поскольку она уточняет детали первоначального решения, она, безусловно, представляет собой усилитель. Таким образом, название «усилитель умст-

внешних способностей» вполне обосновано. И если приведенный нами частный абстрактный пример не выглядит достаточно убедительно, чтобы оправдать это название, то только потому, что мы рассмотрели очень простую ситуацию. В следующей главе эти идеи будут развиты далее, в объеме, охватывающем все стороны деятельности предприятия или фирмы.

## Глава 16

### ОБЛИК КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В предыдущей главе были рассмотрены принципы усиления умственных способностей и довольно тривиальный пример, иллюстрирующий возможность применения самоприспосабливающейся машины, построенной на основе этого принципа. Рассмотрим теперь в общих чертах возможность создания гораздо более мощного усилителя умственных способностей, предназначенного для практического использования в промышленности. Этот усилитель по-прежнему строится по образцу гомеостата и представляет собой систему, имеющую характеристики, примерно аналогичные характеристикам описанной выше системы. Однако мы не будем рассматривать это устройство как машину для решения какой-либо конкретной задачи, а попытаемся синтезировать машину, предназначенную для приспособления некоторой системы к условиям окружающей среды. При таком подходе можно внести существенный вклад в решение общей проблемы, формулируемой следующим образом: какой вид должна иметь система управления, обеспечивающая приспособление к окружающим условиям, если рассматривать промышленное предприятие или фирму с кибернетической точки зрения как модель живого организма? Основное отличие такой машины от описанной в предыдущей главе сводится к тому, что она учитывает не единственное оптимальное состояние в каждой подсистеме, а множество взаимозависимых состояний. Кроме того, эта машина не функционирует в роли модели, не входящей непосредственно в систему, а

используется как регулятор, связанный с системой и предназначенный для управления ее работой.

Первую из рассматриваемых нами подсистем представляет само предприятие. Эта подсистема характеризуется своим состоянием в любой момент времени, определяемым наличным оборудованием, количеством изделий, находящихся в стадии производства, имеющимися заказами, запасами готовой продукции и сырья, числом рабочих и т. п. В этом случае критерий деятельности предприятия определяется не одной переменной (как в рассмотренном выше примере, когда он определялся числом изготовленных изделий), а некоторым множеством переменных, которыми руководство определяет цели предприятия. В это множество входят прибыль, процент на вложенный капитал, штаты и заработная плата работников, своевременность исполнения заказов. Эти цели, как уже отмечалось ранее, относятся к сравнительно короткому периоду деятельности предприятия. При этом на каждый данный период невозможно выработать оптимальные стратегии для достижения всех целей сразу, так как многие из них противоречивы. В то же время все они связаны между собой сложными корреляционными зависимостями. Конечная же цель фактически сводится к сохранению существования. Примем пока что упрощающее допущение (которое будет впоследствии снято), заключающееся в том, что условия сохранения существования могут быть выражены через определенное множество величин, каждая из которых характеризует одну из конкретных сторон деятельности системы. Это множество определяет оптимальное состояние рассмотренной подсистемы.

Вторая подсистема представляет собой внешнее окружение. Она также характеризуется своим состоянием в любой момент времени, определяемым конъюнктурой рынка, денежным курсом, предложением рабочей силы, наличием и стоимостью сырья и материалов и т. п. Эта подсистема воплощает в себе не только реальные и конъюнктурные факторы, характеризующие собой состояние рынка, т. е. той среды, в которой существует рассматриваемый организм (предприятие), но также и общую тенденцию развития экономики. Эта тенденция



в известной степени характеризуется денежным курсом, но, возможно, что для ее оценки необходимо ввести другой, более точный показатель. Критерий деятельности этой подсистемы также выражается в виде множества переменных, характеризующих в данном случае спрос на изделия предприятия. Механизм, посредством которого внешнее окружение влияет на работу предприятия, описывается сложной функцией спроса, включающей в себя объем заказов, частоту их поступления, их распределение по заказчикам и по видам продукции, надежность и стоимость производства ранее выпущенной продукции и т. д. Как и для первой подсистемы, все эти «параметры» нельзя оптимизировать по отдельности. Они также связаны между собой сложными корреляционными зависимостями. Примем поэтому еще одно упрощающее допущение (которое далее будет снято), состоящее в том, что идеальные значения критериев деятельности второй подсистемы считаются заранее известными. Это множество значений и является ее оптимальным состоянием.

Между двумя подсистемами устанавливается гомеостатическая связь, т. е. выход одной из них подается на вход другой. Таким образом, множество величин, определяющих критерий деятельности предприятия в каждый момент времени, предлагается подсистеме, представляющей внешнюю среду, в то время как текущее множество, характеризующее состояние внешней среды, предлагается подсистеме, представляющей предприятие. Как и прежде, на эти предложения накладывается вето, если та подсистема, которой они предложены, еще не находится в оптимальном состоянии. Следовательно, вся система в целом, по данному выше определению, представляет собой машину, осуществляющую поиск устойчивости. Прежде чем перейти к другим вопросам, следует более подробно остановиться на кибернетическом устройстве этой машины.

В рассматриваемой проблеме приспособления необходимо проанализировать множество переменных, описывающих действительное состояние каждой подсистемы. Число этих переменных весьма велико, причем многие из них нельзя не только измерить, но даже точно

определить. Поэтому каждая подсистема является чрезвычайно сложной, т. е. неопределимой. Это разнообразие рассматривается как «черный ящик». Вход «черного ящика» каждой подсистемы является выходом другой, а выход в каждом случае представляет собой гомоморфизм. Другими словами, подмножество, характеризующее каждую подсистему, которое мы ранее называли критерием деятельности, является, по существу, ее гомоморфной моделью, выраженной в терминах того конкретного множества переменных, которое описывает другую подсистему. Эта модель может быть весьма сложной или относительно простой — главное заключается в том, что она должна быть гомоморфной. Практически это означает, что критерии деятельности одной подсистемы должны отражать влияния *любых*, даже самых незначительных изменений разнообразия другой. Устройство, удовлетворяющее этому требованию, сравнительно легко реализовать, применив систему, поглощающую разнообразие. Такую систему можно сравнить с известным примером пяти воинов, защищающих узкий проход от многочисленных врагов. Защитники не договариваются заранее, кто кого должен убить, и, таким образом, устанавливается «безразличное» разнообразие, но в то же время каждый из нападающих должен быть кем-то из них убит. Аналогично любая из огромного множества переменных каждой подсистемы должна иметь соединяющий ее с другой подсистемой канал связи, пропускная способность которого должна быть достаточной для того, чтобы любые изменения этой переменной отражались в критерии деятельности. Одним из путей, обеспечивающих достижение этой цели (т. е. обеспечения адекватности модели), является включение в критерий деятельности переменной, не предусмотренной конструктором и являющейся функцией не поддающегося описанию разнообразия. Таким образом, метод «черного ящика» — это первая попытка справиться с неопределимо большим разнообразием подсистемы.

На этом этапе, исходя из обычных принципов автоматического управления, следовало бы сравнить текущее состояние гомоморфной модели с оптимальным

состоянием подмножества и измерить расхождения, которые подаются в ту же подсистему в качестве корректирующих воздействий по обратной связи. Однако для кибернетики такой подход лишен смысла, так как закон необходимого разнообразия показывает, что разнообразие в такой обратной связи (которая получена из гомоморфизма) недостаточно для уничтожения разнообразия подсистемы, вызывающей отклонение от оптимального состояния. Обычные методы автоматического управления дали бы желаемые результаты только в том случае, если бы критерий деятельности являлся изоморфизмом подсистемы. Однако по определению это невозможно. Эта трудность может быть преодолена только путем реализации обратной связи *через вторую подсистему*. Как же такой подход удовлетворяет закону необходимого разнообразия? Ответ на этот вопрос можно дать очень кратко: за счет усиления.

Следует напомнить, что важнейшей особенностью мышления является способность выбирать. При условии, что в информационных каналах заложено достаточное разнообразие, представляется возможным решение любой задачи независимо от ее сложности (включая задачи, выходящие за пределы возможностей невооруженного человеческого разума). Это положение можно проиллюстрировать классическим примером, что обезьяна, которой позволили бы достаточно долго стучать по клавишам пишущей машинки, в конце концов напечатала бы все сонеты Шекспира. В рассматриваемом случае каждая подсистема содержит неограниченное разнообразие. Функция мышления как раз и заключается в том, чтобы подобрать ключ к этому разнообразию, организовать его и осуществить *выбор*. Итак, входом одной подсистемы является гомоморфизм другой, и наоборот. Будем считать этот гомоморфизм первичным выбором. Тогда в силу того, что имеется достаточное количество информационных каналов для передачи огромного разнообразия в виде однозначного лишь в одну сторону преобразования при условии, что существует гомоморфизм для выхода подсистемы, а также поскольку разнообразия подсистем можно считать эквивалентными (они стремятся к бесконечности), можно

реализовать однозначное лишь в одну сторону преобразование входа каждой подсистемы. Очевидно, что такое преобразование не может увеличить количества информации, содержащейся на входе. Законы энтропии, доказанные в теории информации, свидетельствуют о том, что это невозможно. Но этого и не требуется. Единственно, что нам нужно, — это усиление первичного выбора. Было показано, что такую функцию осуществляет гомеостат. Но наша машина как раз и является гомеостатом. Следовательно, вся машина, которая одновременно является и усилителем умственных способностей, и адекватной информационной системой, может справиться с огромным разнообразием, содержащимся в задаче сохранения существования предприятия. При этом она способна управлять этой очень сложной системой.

В связи с такой структурой машины возникает серьезная практическая проблема передачи всего разнообразия состояний каждой подсистемы в соответствующий «черный ящик». Никаких теоретических трудностей здесь нет, ибо выбраны информационные каналы, обладающие достаточной пропускной способностью. Практическая сторона дела сводится к тому, что буквально каждая переменная, влияющая на соответствующую подсистему, должна быть представлена в передаваемой информации, в то время как многие переменные вообще неизвестны. Возникает вопрос, насколько полно люди, осуществляющие руководство предприятиями, могут учесть и осмыслить все эти многочисленные переменные. На него можно ответить вполне определенно: в весьма ограниченной степени. Психологи, безусловно, могут подтвердить, что человек, принимая какое-либо решение, в состоянии учесть и осмыслить всего несколько факторов, в лучшем случае порядка дюжины. А наша машина вполне реально могла бы учесть сотни переменных и тем самым намного превзойти возможности человека, что явилось бы наилучшим из реально возможных решений вопроса.

Но этим ее возможности не ограничены. Прежде всего, известно, что часть входных воздействий со стороны реальной внешней среды можно рассматривать *саму по себе* как «черный ящик». Если представить

состояние входа в виде отношения (а не в виде чистого вектора), то в этом представлении, в котором ограниченная гомоморфная модель сравнивается с ее реальным аналогом, будут обязательно учтены в виде различия между числителем и знаменателем все переменные, которые не только не поддаются определению, но даже не распознаны. Этот подход уже успешно использован в одной из ручных систем управления с целью учета весьма сложного разнообразия. Опыт построения и эксплуатации такой системы описан в работе [30]. Во-вторых, совокупность входных переменных, имеющих различные весовые функции, может быть подана на «черный ящик» соответствующей подсистемы в виде единственного вектора с различными весами для каждого из компонентов. Примером этих входов может служить, допустим, такая внешняя переменная, как будущее благосостояние потребителей по оценке коммерческого директора предприятия. Наконец, в-третьих, существует возможность представления входов в форме свободных векторов, что позволяет учесть неизвестные переменные в виде остаточных значений. Этот метод используется в теории исследования операций при решении различных задач с помощью аппарата динамического программирования. Таким образом, можно с полным основанием утверждать, что задачу полного представления реальной ситуации на входе «черного ящика» подсистемы можно решить даже в самом сложном случае.

Теперь, пояснив кибернетические особенности нашей управляющей машины, следует рассмотреть еще два принципиальных вопроса. Первый сводится к следующему. В описанном ранее образце усилителя умственных способностей разнообразие реализовалось путем «рандомизации». Отсутствие целенаправленности в его действиях не играло существенной роли, так как эта машина, предназначенная для решения конкретных задач, не входила в контур управления. Поэтому она могла без всякого ущерба делать любое число «фатальных» ошибок в процессе моделирования, прежде чем достигнуть ультраустойчивости. В отличие от этого рассматриваемая самоприспосабливающаяся машина непо-

средственно управляет предприятием. Таким образом, возникает вопрос: может ли она использовать рандомизацию как средство обеспечения необходимого разнообразия? Второй вопрос можно сформулировать так: каким образом можно снять сделанные ранее упрощающие предположения о том, что оптимальные состояния гомоморфизмов каждой подсистемы являются известными? Такая постановка вопроса заводит нас в порочный круг, ибо если эти состояния известны, то машина становится ненужной. Но суть дела в том, что они действительно *неизвестны*. Ответы на оба вопроса дает одно и то же свойство предлагаемой машины, которое мы сейчас и рассмотрим.

Прежде всего, эти задачи можно (как правило) исследовать на примере биологической модели, в которой они также фигурируют. Вернемся снова к эволюции видов. Естественно, что данный вид не имеет никакого представления о том, в каком направлении он развивается и к какой цели стремится. Его оптимальное состояние определяется в любой данный период основной структурой генов, которую каждая особь получает от родителей. Эта форма является оптимальным состоянием вида с точки зрения «понимания» видом данных окружающих условий. В пределах этой основной структуры генов имеется достаточная возможность для незаметных изменений от поколения к поколению. Малость изменений обусловлена тем, что ни одна мутация, как правило, не может сразу полностью вывести особь из оптимального состояния (хотя иногда рецессивный ген может произвести плохо приспособленного потомка). В то же время эти незначительные изменения являются достаточными, чтобы поддерживать гомеостатическую деятельность видов: благоприятные мутации закрепляются посредством механизма положительной обратной связи, неблагоприятные — подавляются. Мы предположили, что оптимальные состояния подсистем нашей модели предприятия являются известными. В качестве исходного пункта такое предположение вполне удовлетворительно, ибо «вид» (т. е. предприятие) действительно считает, что знает эти состояния, пусть весьма и весьма приближенно, так как они являются неотъемлемой

частью стратегии его поведения. Однако после того, как наша машина начала работать, можно допустить небольшие случайные мутации внутри гомоморфных моделей, что обеспечивает медленное изменение оптимальных состояний подсистем по отношению друг к другу. Таким образом, кибернетик продолжает извлекать поучительные наблюдения, исследуя биологическую модель. Медленное изменение ситуации внутри обеих подсистем должно неизбежно привести к тому, что критерий сохранения существования будет принят как неотъемлемая часть деятельности предприятия, а также модели окружающей среды, которую оно для себя создает (ибо внешние влияния, воздействующие на предприятие, также подвергаются изменениям).

В двух «черных ящиках» происходят случайные изменения состояния, обусловленные различными причинами (эти изменения следует рассматривать как целенаправленное или познавательное поведение). Аналогичные изменения имеют место и в двух гомоморфных моделях. Данные изменения следует отнести к гомеостатической или приспособляющейся форме поведения. За длительный период времени обе эти формы поведения будут стремиться к ультраустойчивости, ибо этот принцип заложен в самой структуре нашей машины. Следовательно, в конечном счете машина будет постепенно обучаться. Здесь мы также наблюдаем близкую аналогию процесса обучения в живых организмах. В обоих случаях механизмы обучения рассчитаны на длительные процессы именно потому, что они используют случайные источники информации для принятия решения об изменении состояния, которое получило название мутации. На языке теории исследования операций последовательность этих состояний является марковской цепью. Это означает, что каждое изменение непосредственно и целиком вытекает только из предшествующего ему состояния и не зависит от любых более ранних состояний, составляющих историю процесса. Возможно, это утверждение следовало бы несколько изменить, поскольку информация о многих предшествующих состояниях передается от поколения к поколению. Непосредственно предшествующее состояние, из кото-

рого информация передается данной особи (т. е. от родителей), само хранит отпечаток предшествующих более ранних состояний в форме наследственности. Следовательно, модифицированное таким образом марковское описание состояния является правильным, поскольку все особи наследуют инвариантную часть наследственной информации от своих предков. Это означает, например, что ни одна особь не может усвоить более или менее одной восьмой доли наследственной информации от своего прадеда (при условии, что род не вырождается, т. е. что предки не состоят в кровном родстве).

Таким образом, если один из прадедов (или одна из прабабок) отличался необычайно высокой приспособляемостью к окружающим условиям, то рассматриваемая особь не может извлечь особенно большой выгоды из этого обстоятельства по линии наследственности. Следовательно, процесс эволюции представляет собой, по существу, марковский процесс и поэтому не включает в себя обучения в обычном понимании. Эволюционный процесс обучения реализуется исключительно при помощи обратных связей, которые усиливают наследственные марковские цепи, способные приспособливаться к новым условиям, и обрывают цепи, не обладающие этим свойством. Такой механизм обучения является чрезвычайно сложным, и природа может им пользоваться только потому, что изменения окружающей среды, к которым необходимо приспособливаться, протекают весьма медленно, а также потому, что процесс естественного размножения в природе отличается большой расточительностью.

Однако кибернетическая управляющая машина должна справляться и с быстрыми изменениями, и поэтому она не может использовать метод случайных решений для определения оптимальной стратегии развития. Таким образом, марковское развитие с его обучением при помощи обратной связи является слишком медленным. Машина должна обучаться быстро как для того, чтобы отыскивать, так и для того, чтобы *задавать* цель гомеостатической ультраустойчивости. Она может выполнять поставленную перед ней задачу путем оценки своего



поведения с учетом своей истории, что является немарковским стохастическим процессом, точно соответствующим концепции обучающейся машины. Можно привести достаточное число примеров биологических моделей, реализующих такой процесс обучения: достаточно вспомнить случай «статистической» крысы. Все сказанное можно кратко резюмировать следующим образом. Вероятность перехода системы из текущего в заданное состояние не равна вероятности ее перехода во все другие возможные состояния (т. е. марковские), а зависит от истории предшествующих состояний. Условная вероятность в цепи такого рода означает, что если, например, состояние  $s$  почти всегда является «успешным» в результате преобразования состояния  $d$ , которому последовательно предшествуют состояния  $c$ ,  $b$ ,  $a$ , и если никакое другое состояние вообще ни разу не было «успешным», то машина, столкнувшись вновь с последовательностью состояний  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , почти наверняка преобразует  $d$  в  $s$ . Такой механизм, как известно из биологических исследований, является эффективной моделью процесса обучения. Теория обучающейся и обучающей машины, разработанная Гордоном Паском, показывает, что такая машина принципиально может быть построена и что она будет работоспособной.

Таков подход, при помощи которого можно устранить несовершенные черты кибернетической управляющей машины. Она начинает работать, руководствуясь *общей* целью достижения оптимальных состояний, определяемых исходя из ограниченных умственных возможностей человека. Используя *неэкономичные* случайные мутации, машина осуществляет *медленное* приспособление посредством марковской эволюции. Постепенно произвольность заменяется целенаправленным выбором, расточительность — направленной мутацией и медленное приспособление — быстрым обучением. Такой механизм обладает замечательным сходством с «черным ящиком», который решает стоящие перед ним задачи, используя неисчерпаемое разнообразие своих внутренних связей, которые он комбинирует и выбирает. Этот процесс обучения основан на бесконечном разнообразии вероятностей в развитии машины, которые она также

комбинирует и выбирает. Таким образом, мы приходим к представлению о промышленной управляющей машине, которая отыскивает оптимальную гомеостатическую стратегию, усиливает умственные способности людей, властвующих над ней самой, обучается на основе собственного опыта и приспосабливается к окружающим условиям.

Создание такой машины представляется мне центральной задачей технической кибернетики. Мы только что рассмотрели некоторые возможности, которые открываются перед кибернетиками для решения этой задачи. В предыдущих главах достаточно подробно описывались те средства, которые имеются в их распоряжении. Я беру на себя смелость утверждать, что теоретическая возможность создания такой машины доказана. Бесспорно, для решения этой задачи требуется провести огромный объем научно-исследовательских и конструкторских работ, и в настоящее время было бы весьма легкомысленно строить догадки о том, когда управляющая машина, созданная по предложенной схеме, будет введена в эксплуатацию. Но моя вера непоколебима и мое убеждение твердо: это можно сделать.

Теперь остается привести саму схему машины (рис. 5) и сделать последнее замечание. В изложении материала мы последовательно описывали различные виды машин, которые в строгом смысле слова нельзя назвать *кибернетическими*. Любую такую машину следует рассматривать как реализацию одного из многих свойств универсальной кибернетической машины, общее представление о которой дается в настоящей главе. Описанная в предыдущей главе машина является чисто иллюстративной, и вполне вероятно, что работа над ее практической реализацией была бы неоправданной. На языке теории исследования операций эта машина представляет собой модель, работающую в основном по методу Монте-Карло. При этом в ряде благоприятных случаев стоящую перед ней задачу можно решить чисто аналитическими методами математической статистики, а именно при помощи теории массового обслуживания.

Или, рассматривая механизм, предложенный для построения «черного ящика» окружающей среды, как

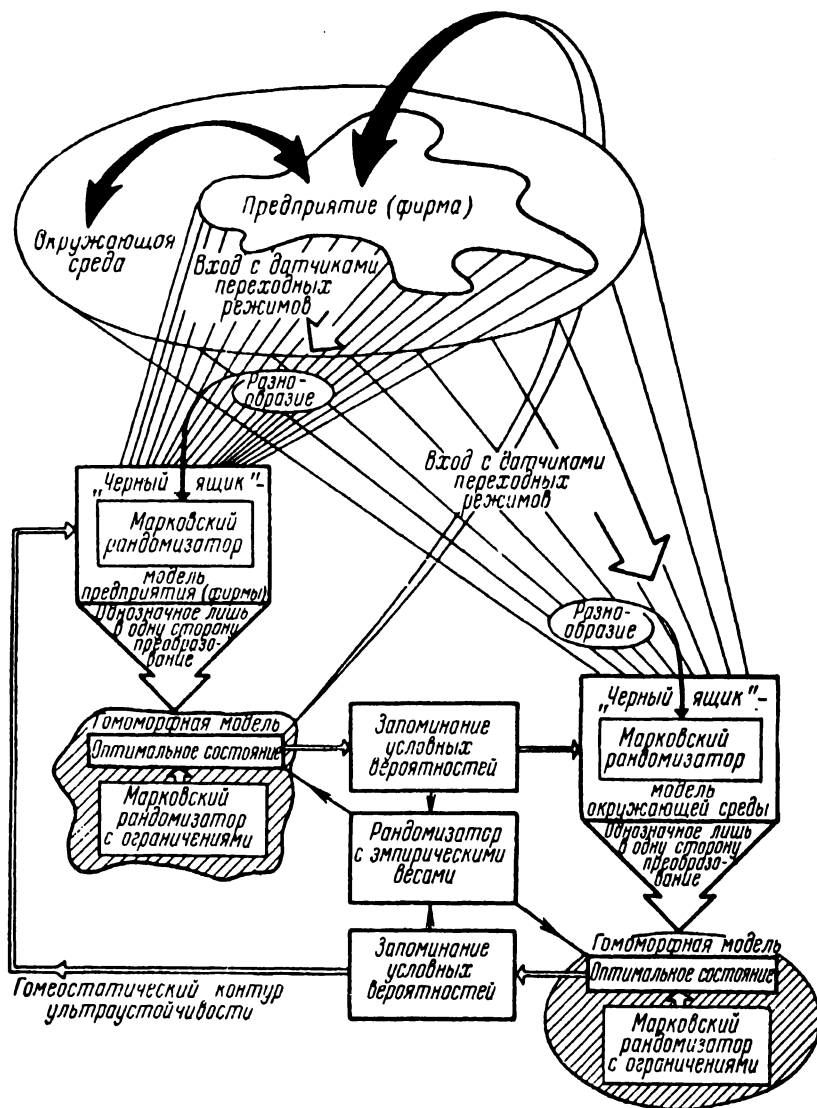


Рис. 5.

гомоморфизм, можно предполагать, что нами недостаточно учтены современные методы анализа, применяемые

в эконометрике. Такие критические замечания, если брать их в отрыве от всего остального изложения, можно было бы признать вполне обоснованными. Однако они совершенно не имеют отношения к существу предмета, если подходить ко всем вопросам с точки зрения конечной цели. На перечисленные выше методы наложены абсолютные ограничения, обусловленные ограниченностью умственных способностей человека; эти методы не в состоянии справиться с необходимым разнообразием; они не могут учесть условных вероятностей, характерных для задач управления, что (это следует напомнить специалистам по статистике) обуславливает *непрерывное* изменение всех параметров случайных функций, и, наконец, эти методы не обеспечивают саморегулирования. Итак, мы заканчиваем теми же тремя признаками подлинно неопределимой вероятностной системы, с которых начали, и теми же тремя особенностями подлинно кибернетического решения проблемы управления такой системой.

Основное сомнение, которое остается у меня с точки зрения привычных категорий мышления, касается фактора времени. Сколько времени будет затрачивать наша машина для решения поставленных перед нею задач? На этот вопрос в настоящее время нельзя дать строгого ответа, его нельзя исследовать при помощи аналитического аппарата, который уже разработан для строгого доказательства почти всех приведенных нами теорем. Однако при этом следует иметь в виду одно необычное обстоятельство, которое сводится к следующему. Кибернетическая машина не стремится к отысканию единственного абсолютного решения, так же как и руководители предприятия не могут претендовать на то, что существует единственное решение стоящих перед ними проблем. Ученые, даже ученые, работающие в области теории исследования операций, привыкли мыслить категориями «правильных» решений, абсолютных оптимумов. Такое мышление приводит к заблуждениям. Вернемся еще раз к биологической модели и стоящей перед ней проблемой выживания. Все бесчисленные живущие на земле биологические виды, начиная от

инфузории до человека, включая актинию и пятнистого дятла, «правильно» решили проблему выживания, ибо все они существуют. Каково же значение термина «правильно» в нашей реальной действительности? Решениями проблем производства, экономики и социальных проблем (т. е. области применения кибернетики) можно считать только такие решения, которые действительны. Такое решение (или член целого семейства решений) может быть найдено за незначительную долю времени, требуемого для нахождения оптимального решения. Само понятие оптимального решения лишается, по существу, всякого смысла, если к тому моменту, когда оно будет найдено, окружающая действительность перейдет в совершенно отличное состояние. Итак, кратко ответить на вопрос о факторе времени можно только следующим образом. Люди, управляющие производством, которые являются способными к обучению разумными гомеостатами, должны действовать в ногу с реальным миром (работать в реальном масштабе времени). В то же время их внимание отвлекается, они могут действовать под влиянием эмоций и часто вынуждены прибегать к догадкам. Преимущество кибернетической машины состоит в том, что за то же самое время она может гораздо лучше решать задачи, стоящие перед людьми в сфере управления промышленностью.

## Часть IV

# КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МОДЕЛЕЙ

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Начав в первой части с рассмотрения основных понятий кибернетики, мы изложили уже почти весь задуманный материал. Логические основы кибернетики, составляющие содержание «чистой» ветви этой науки, были даны во второй части. На этой базе были показаны теоретические возможности предмета. Далее, в третьей части были развиты описательные аспекты кибернетики. В ней было показано, каким образом теория используется в практических исследованиях биофизических систем, описаны принципы первых кибернетических машин и намечены перспективы дальнейшего развития этой ветви в целом и особенно в сфере промышленного производства. Что же еще требуется для завершения этого очерка, посвященного новой науке? Когда этот вопрос обсуждался в главе 7, мы уже указали, что наличие «прикладного» аспекта является необходимым атрибутом любой науки.

Прикладная кибернетика связана с применением этой науки в реальном мире. «Чистая» же кибернетика дает метод решения задач практики. Описательная ветвь кибернетики, безусловно, более близка к реальной действительности, ибо она исследует реальные явления и занимается построением реальных управляющих механизмов. Но эти искусственные системы предназначены прежде всего для имитации функций биологических систем, а не для использования в качестве постоянных управляющих устройств. Введение в подлинно прикладную область кибернетики было дано в последней главе предыдущей части, где промышленное

предприятие описано в кибернетических терминах как организм, причем это описание основано на изложенных ранее теоретических положениях и учитывает все практические достижения биофизической кибернетики. Но предположим, что перед кибернетиком поставлена задача преобразования существующего предприятия в кибернетическое, соответствующее приведенному описанию. Какие практические проблемы возникнут перед ним в этом случае?

Прежде всего, кибернетику необходимо выбрать материалы, из которых он будет строить свою систему. Его машина напоминает собой мозг, но в его распоряжении нет синтетического белка для построения мозга, нет жизнеспособных нейронов, нет чувствительных и самовосстанавливающихся тканей. До сих пор кибернетик работал с электромагнитными и электронными элементами. В первой из последующих четырех глав (в главе 17), составляющих содержание этой части, дан анализ ограничений, накладываемых этими моделями живых тканей. Здесь же рассмотрены также возможные альтернативы и подчеркнута необходимость создания новых необычных материалов, требуемых для решения возникающих задач. Эта проблема совершенно не связана со следующей проблемой прикладного аспекта кибернетики, которая сводится к отысканию эффективной и адекватной модели механизма (глава 18). Однако и в пределах ограничений, наложенных доступными для использования материалами, кибернетик все же имеет в своем распоряжении определенную свободу выбора. Рассмотрены достоинства систем автоматического регулирования и показано, что их применение не ограничивается чисто инженерной областью, что иллюстрируется на примере разработки промышленной системы поощрений. Здесь показан также облик реальной машины, соответствующей абстрактной машине, рассматриваемой чистой кибернетикой и предназначенной для самовоспроизведения.

Решив проблемы выбора моделей живых тканей и механизмов, следует рассмотреть третью проблему прикладной кибернетики, заключающуюся в построении модели неопределенности (глава 19). С самого начала

в этой книге мы подчеркивали различие между детерминированными и вероятностными машинами. Кибернетические системы являются вероятностными, и поэтому они всегда связаны с неопределенностью. Как же проявляется неопределенность в поведении машин и как практически ввести в них элементы случайности? Теоретически этот вопрос решается очень изящно с помощью статистической алгебры; в описательном смысле его можно решить за счет использования какого-нибудь подходящего устройства, вносящего в систему «шум». Однако практическое решение этой задачи в полном объеме связано со значительными трудностями, возможные пути устранения которых предлагаются в этой главе.

В заключение (глава 20) отмечено, что практическое использование кибернетики требует создания модели самого языка. Эта задача связана со специальными вопросами обеспечения ясных и точных средств выражения мысли и исключения из описания реальной действительности субъективных и эмоциональных оттенков, придаваемых словам, а также понятиям кибернетики, выражаемым в языковой форме.

Эти четыре главы, посвященные практическому применению кибернетики, завершают настоящую книгу. Она представляет собой попытку изложить новые идеи, принятые в этой науке, показать историю ее развития и рассмотреть теоретический, описательный и прикладной аспекты кибернетики, связав их со сферой промышленного производства. И именно здесь, в заключительной части, рассмотрены проблемы практического использования кибернетики, решение которых явится пробным камнем подлинной ценности ее идей.

## Глава 17

### МОДЕЛЬ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ

Анализ природы кибернетики и возможностей ее использования в промышленности не будет полным, если не рассмотреть физические материалы, из которых можно строить кибернетические машины. Действительно,



успешное претворение в жизнь достижений логической и биофизической теорий зависит от изобретательности кибернетика как конструктора. Как бы детально мы теоретически ни исследовали возможность и эффективность кибернетических систем, поведение реальных машин всегда будет ограничено методами их построения. Возможно, этот вполне очевидный факт и признавался, но до сих пор ему не уделялось достаточно серьезного внимания. Это объясняется, пожалуй, тем, что задача практического построения кибернетической машины еще по-настоящему не ставилась, а может быть, тем, что существует убеждение, что это дело инженера, который сам в конце концов найдет наилучший способ построения таких машин. Попробуем прежде всего выяснить, почему, действительно, возникает такая задача и каков ее характер.

Рассмотрим какую-нибудь всем известную и давно используемую машину для усиления физической мощности, допустим подъемный кран. Совершенно очевидно, что способность этой машины поднимать грузы ограничена не принципами построения. Иначе говоря, расчет зубчатых передач может быть вполне удовлетворительным для обеспечения подъема груза, но, хотя это условие является необходимым, оно недостаточно. Действительно, если стальные элементы конструкции, из которых сделан кран, не обладают достаточной прочностью, то они могут погнуться или сломаться при приложении полной нагрузки. Инженеры-механики учитывают это как фактор, ограничивающий возможности создаваемых ими машин, и поэтому изучают сопротивление материалов. Это позволяет оценить ограничения конкретных конструкций и расширить их возможности. В кибернетике мы рассматриваем машины иного рода: не усилители физической мощности, а усилители свойств интеллекта.

Ограничивающим фактором для кибернетических машин, выраженным в терминах их конструкции, в таком случае, очевидно, является не действительная прочность материалов, а какое-то иное свойство элементов, из которых они построены. Совершенно неправильно думать, что кибернетические машины должны выглядеть подоб-

но механическим машинам и что в то же время перед конструктором этих машин не возникает проблем, аналогичных проблемам сопротивления материалов в усилителях физической мощности. Для кибернетика прежде всего необходимо осознать, что он занят построением моделей живых организмов и что он может выбрать оптимальную модель среди систем любого типа. В каждом конкретном случае его должна интересовать бихевиористическая аналогия между двумя очень сложными системами. Перед кибернетиком вовсе не стоит задача использовать то, что мы привыкли называть машиной, для выполнения каких-то новых функций. Однако не удивительно, что первые биофизические модели, о которых мы говорили, внешне выглядели, как обычные машины, и мы отнюдь не хотим упрекать за это их создателей. Когда впервые проверяют научную гипотезу, прежде всего приходит в голову использовать то оборудование, которое имеется под рукой. Но в дальнейшем проблема выбора материалов для построения кибернетических машин, по-видимому, приобретет важнейшее значение.

Наилучший подход к выбору подходящего материала для построения кибернетических машин или к выбору модели живой ткани заключается в определении бихевиористических границ, в пределах которых по замыслу кибернетика должна работать машина. Прежде всего, он должен оставить привычные представления об облике традиционных машин. Тот факт, что двоичная единица информации может быть передана с помощью реле, что вероятность можно реализовать с помощью конденсатора и т. п., не имеет ничего общего с бихевиористическими пределами функционирования системы. Необходимо сосредоточить все внимание на таких свойствах систем, как способность к росту, приспособляемость, старение, регенерация и самовосстановление. Совершенно справедливо, что все это бихевиористические свойства животного в целом, но они в то же время являются и свойствами самих живых тканей. Животное обладает замечательным материалом, из которого оно построено, в виде живых клеток и мышц, которые отличаются высокой способностью к адаптации, к физи-

ческому самовосстановлению, а также функциональной пластичностью. При отсутствии искусственного белка кибернетик обычно обращался к металлу и стеклу в качестве материалов для построения своих машин. Какой бы эффективной ни была аналогия, получаемая при имитации функций, аналогии в смысле материалов усмотреть при этом совершенно невозможно. Как было только что отмечено, это обстоятельство само по себе не играет никакой роли, но очень важно, что использование таких совершенно жестких, не обладающих способностью к адаптации материалов накладывает существенные ограничения на поведение кибернетических машин.

Следует отметить, что сама природа иногда признает наличие ограничений такого рода, несмотря на наличие в ее распоряжении живых тканей, и преодолевает возникающие трудности, изменяя функциональную структуру организма. Так, например, тело крабов обычно строится из материалов, которые благодаря развитию внешнего скелета обеспечивают достаточную защиту организма. Но рак-отшельник совершенно беззащитен, и его экологические управляющие органы вынуждены хранить программу, в соответствии с которой рак-отшельник занимает пустую раковину, покинутую другим животным, которую он носит в качестве внешнего скелета для преодоления этого врожденного недостатка. Аналогичным образом кибернетическая машина, функционирование которой определяется ее нервной системой, состоящей из проводов, может компенсировать отсутствие способности своих нервов к регенерации в случае повреждений за счет многократного резервирования. Таким образом, недостатки тканей преодолеваются за счет усовершенствования функциональной конструкции. Эту возможность всегда надо иметь в виду. Тем не менее следует учитывать, что выбор того, что представляется наиболее естественной конструкцией и наиболее удобным материалом, не обязательно обеспечивает нам лучшую модель живой ткани.

В одной из работ [31] я подверг более детальному анализу, чем это целесообразно в настоящей книге, специфические ограничения как электрических, так и элек-

тронных моделей живой ткани. Здесь, по-видимому, можно было бы без доказательств высказать утверждение, что применение таких материалов не оставляет конструктору кибернетических машин почти никакой свободы выбора. Он вынужден предусматривать в своих логических схемах специальные средства, чтобы учесть ограничения, накладываемые применением имеющихся в его распоряжении материалов. В то же время эти ограничения настолько сильны, что в окончательном варианте конструкции машины может оказаться больше элементов, предназначенных для их преодоления, чем элементов, призванных решать основную задачу. Но существует и еще одна более принципиальная, а поэтому чреватая опасностями трудность, которую можно проиллюстрировать на конкретном примере.

На первый взгляд, наиболее близкой к оригиналу моделью работы зрительного аппарата животного является фотоэлектрическое сканирование, при котором движущийся луч огибает систематически все поле зрения, не выделяя никаких особых участков. Он производит почти строго линейную развертку изображения, в которой каждый сколь угодно малый отрезок содержит ровно столько же информации, как и любой другой такой же отрезок. Это ограничение, обусловленное природой материала, из которого выполнена модель, не позволяет моделировать этот процесс на основе аналогичных принципов при рассмотрении природы распознавания образов у животного и машины, ибо животное не производит сканирования таким правильным методом, так же как и не регистрирует информацию с одинаковой интенсивностью. В зрительном аппарате животного всегда имеется некоторая затененная зона, в которой обработка неполной информации достаточна для распознавания важнейших признаков наблюдаемого объекта (например, движения). Физиологическую сущность распознавания образов достаточно трудно понять. Несмотря на неэффективное с точки зрения теории информации использование имеющихся входных данных, зрительный нерв должен обладать огромной пропускной способностью. Но если ограниченные возможности материалов, из которых сделаны электронные приборы,

вынуждают кибернетика создавать модель зрительного аппарата, работа которой основана на фотоэлектрическом сканировании, то для решения задачи распознавания совершенно недифференцируемых квантов информации потребуется создание бесконечно более сложной аппаратуры. Это вытекает из закона необходимого разнообразия. В электронной системе присутствует огромное количество нежелательного разнообразия, т. е. информации, избыточной для распознавания наблюдаемого в данный момент объекта. Эту информацию необходимо поглотить и исключить из рассмотрения.

Наибольшее искушение описать часть механизма управления животного при помощи электронной модели вызывает нервная система. Здесь электроника может обеспечить весьма эффективную аналогию передачи нервных импульсов и их поведения в логических сетях. Но препятствие для успешного кибернетического использования электронной аппаратуры с этой целью заключается в возможностях (вернее, в недостаточных возможностях) этой аппаратуры моделировать свойства живых тканей. Эту опасность, которую мы уже проиллюстрировали на примере зрительного аппарата, можно теперь обобщить. Поскольку материал, из которого строится электронная аппаратура, не обладает свойствами живых тканей, и в первую очередь способностью к адаптации, конструктор вынужден подходить к машине с учетом ее ограничений в этом смысле. При этом возникает соблазн восполнить обусловленные указанными недостатками потери за счет повышения надежности компонентов по сравнению с их живыми моделями. Это означает, что в такой ситуации стремятся к построению более детерминированных, а стало быть, менее вероятностных систем, чем реальные биологические системы. Например, модели высшей нервной деятельности мозга имитируют всего-навсего рефлексy, подчиняющиеся довольно строгим закономерностям. Отсюда возникает опасение, что попытки создания модели мозга будут доведены только до уровня мозжечка <sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup> Следует пояснить один технический вопрос: высказанное сообщение отнюдь не содержит в себе отрицания взглядов о наличии рефлексов в коре головного мозга, что точно установ-

т. е. что вся мозговая деятельность будет описываться в терминах, подходящих только для уровня низшей нервной деятельности.

Но если «традиционную» электронную аппаратуру нельзя признать удовлетворительной даже тогда, когда она применяется для построения моделей нервной системы, то использование ее для моделирования всех прочих элементов биологической системы управления вызывает гораздо более серьезные возражения. По существу, большинство основных органов управления животных, которые стремятся имитировать кибернетики при создании своих самоприспосабливающихся машин, вовсе не принадлежат к нервной системе. Эти органы являются биохимическими. Поэтому возникает чрезвычайно сложная задача, которую можно сформулировать следующим образом: как описать, допустим, гомеостатическую систему эндокринных желез в терминах электроники? Представляется маловероятным, что электроника когда-либо сможет удовлетворительно решить такую задачу. Таким образом, следует, очевидно, обратиться к другим возможностям. И если речь идет о моделировании биохимических систем, то кибернетика должна очень тщательно проанализировать принципы поведения биохимических веществ. Трудности, возникшие на пути кибернетического описания сложных биохимических систем, общеизвестны, и этим объясняется, почему кибернетики обратились к изучению самых элементарных форм живых организмов. Основным материалом, из которого построены все живые организмы, является протоплазма. Исследование протоплазмы производится наиболее эффективно тогда, когда она берется в чистом виде и не разделена на клетки. Поэтому амеба является именно тем животным, которое наилучшим образом поддается кибернетическому анализу.

Учитывая относительную простоту этого организма, удивительно, насколько мало было известно о принци-

лено. Вопрос заключается в том, можно ли будет когда-нибудь вообще поставить задачу создания модели коры головного мозга, если не будут решены проблемы моделирования свойств живых тканей.

пах его поведения. Так, например, был выдвинут ряд совершенно различных гипотез для объяснения движения амебы. Это движение получило образное название «переливания», которое очень удачно описывает перемещение желеобразного тела, очертания которого непрерывно меняются самым причудливым образом. Недавно Голдэкр (Goldacre) [32] привел убедительное описание механизма амебовидного переливания, исходя из представления о том, что в движущейся вперед части организма молекулы белка разворачиваются, а в противоположной — складываются. Конечно, нет необходимости излагать здесь существо этой теории, но целесообразно показать, почему кибернетики, занятые, например, исследованием проблемы управления в промышленности, интересуются работами такого рода и почему сам Голдэкр установил, что его работа представляет ценность для кибернетики. Наука об управлении и связи в животных и машинах, каковой является кибернетика, представляет собой поистине единое целое. В ней нельзя игнорировать исследования, проводимые, казалось бы, в весьма отдаленных областях, и есть все основания привлекать особое внимание к проблемам, не связанным явно с моделями тканей, не в силу простой любознательности, а из-за необходимости лучше понять возможности и ограничения материалов, используемых для создания реальных систем.

В поисках материалов для построения кибернетических машин мы руководствовались именно таким принципом, что и заставило нас проанализировать почти все биологические системы. В данной книге мы уже достаточно полно показали, что задача сводится к отысканию такой системы, которая характеризуется некоторыми принципиальными особенностями поведения, где поведение можно свести к принадлежности к определенному классу логико-математических описаний. Например, любое сообщество живых организмов, на которое можно воздействовать с помощью какого-нибудь входа, аналогичного входам, используемым в технике, потенциально может быть кибернетической машиной. При этом указанное сообщество должно вести себя, как «черный ящик», предназначенный для преобразования возмуще-

ний окружающей среды, представленных этим входом, и в конечном счете проявлять какой-либо иной вид поведения, который можно рассматривать как выход. Такая машина обладала бы всеми преимуществами живой системы, т. е. была бы способной к регенерации, росту и адаптации.

Простейший опыт в этой области был проведен с мельчайшими населяющими пруды ракообразными, известными под названием дафний. В корм небольшой колонии дафнии добавляли микроскопические железные опилки. Таким образом, появилась возможность влиять на движение этих рачков при помощи магнитного поля. Каждая конкретная комбинация напряженности и ориентации силовых линий этого поля представляет собой модель определенного значения входа, а реакция колонии является частично функцией этого входа и частично формой случайного поведения. Напомним, что такая характеристика соответствует принципиальному определению «черного ящика». Другая электрическая цепь, в которой плотность особей в колонии определяет показания прибора, составляет выход системы, который можно по цепи обратной связи подавать на вход. Вся эта система в принципе является гомеостатом, который стремится к устойчивости. К сожалению, опыты с дафнией не позволили сделать никаких выводов. Мы упоминаем о них только для того, чтобы показать, что они тем не менее позволили наглядно продемонстрировать принципиальную возможность создания машины совершенно нового типа. Здесь стоит вновь подчеркнуть, что в качестве кибернетической машины можно применить любую систему, если она соответствует простому и в то же время строгому описанию, которое, по существу, теперь у нас есть. По моему мнению, никто не может утверждать, что любая конкретная система, предложенная в качестве модели, бессмысленна или что у нас уже есть какое-либо представление о том, какая именно система является наиболее эффективной моделью с точки зрения свойств материалов.

В итоге анализа мы выдвинули идею о машине другого типа, также обладающей свойствами, присущими биологической модели. Эта машина в конечном счете



наверняка позволит получить удовлетворительное решение задачи. Идея построения такой машины основана на представлении о развитии и росте живых организмов. Возможно ли в действительности создание кибернетической машины, которая в буквальном смысле выращивала бы свое решение? Рассмотрение такого представления привело нас к признанию класса машин, которые мы назвали «фунгоидными»<sup>1)</sup>, исходя из присущих им особенностей роста. Возможность создания таких машин была обоснована совместно с Гордоном Паском, достижения которого в области разработки обучающей машины были описаны в одной из предшествующих глав. Паску удалось даже построить экспериментальную машину нового типа [33], по существу представляющую собой химический элемент, заполненный коллоидным раствором. Входом элемента является комбинация напряжений, подводимых в коллоид по нескольким тонким платиновым электродам. Этот вход представляет собой преобразователь входных характеристик реальной системы, которой требуется управлять. Протекание электричества через коллоид вызывает осаждение магнитных частиц на дне элемента, и этот осадок растет подобно дереву по направлению к каждому электроду. Поскольку входы различны, «дерево» несимметрично по форме и имеет различную прочность во всех точках. Выход элемента будет, естественно, изменяться по мере роста дерева (так как оно является проводником). Он может быть подан по цепи обратной связи на вход. Таким образом, элемент стремится «решить стоящую перед ним задачу», т. е. привести преобразователь входа в состояние равновесия, изменяя тем самым состояние реальной системы. Обходясь без дорогостоящей аппаратуры и занимая весьма ограниченное пространство, фунгоидная машина, по существу, решает систему однородных уравнений.

Численные решения этих уравнений непосредственно получить нельзя, ибо система передачи информации слишком ненадежна, но при построении кибернетических машин следует учитывать, что обычно численное

<sup>1)</sup> От латинского *fungus* — плесень. (Прим. перев.)

решение сразу и не требуется, так как можно использовать количественное решение, не сведенное к числовой форме при помощи преобразователя. В гомеостатической машине, например, кибернетики стремятся получить решение именно в такой форме. Кратко описанный только что конкретный тип фунгоидной машины способен также к элементарным формам обучения. Предположим, что некоторая комбинация входных данных поддерживается в течение определенного периода времени постоянной. Дерево, представляющее собой решение уравнений, задаваемых входом, непрерывно растет, приобретая четкую ориентацию. В определенный момент времени комбинация напряжений на входе преобразуется в другую комбинацию. Это вызывает переориентировку развития дерева в иных направлениях, которая происходит довольно медленно. Если входы вновь преобразовать так, чтобы восстановить первоначальную комбинацию, то теперь дерево, растущее в элементе, будет стремиться принимать ту же ориентацию, которую оно имело вначале. Вследствие того, что дерево распадалось очень медленно, оно довольно быстро восстановит первоначальную ориентацию, и в результате устойчивость в этом случае будет достигаться быстрее, чем вначале. Эффект воздействия входа определяется продолжительностью приложения данной комбинации напряжений на входе, так как от этого зависит прочность дерева. Он является также функцией времени, необходимого для того, чтобы элемент растворил образованное дерево, что, в свою очередь, может зависеть от конкретного химического состава коллоида, отношения габаритов элемента к приложенному электрическому потенциалу и т. п.

Такое поведение действительно характеризуется некоторыми чертами обучения, хотя (при отсутствии средств для запоминания решений) после постановки перед элементом ряда различных задач он «забудет» первоначальное решение. Другими словами, обучение, которое имеет место, является пока что кратковременным и легко сводится на нет. Тем не менее фунгоидная машина позволяет выявить эту возможность, а от самой идеи использования крошечного элемента такого

рода, стоимостью всего в несколько пенсов, который способен решать сложные задачи управления, нельзя так просто отмахнуться.

Этим мы завершаем предварительные и довольно сбивчивые рассуждения относительно проблемы создания кибернетической модели живой ткани. Наша цель заключалась главным образом в том, чтобы привлечь внимание к этой проблеме, ибо само ее существование признается в наше время далеко не всеми. Я изложил здесь различные соображения по этому вопросу в настолько общем виде, что готов принести извинения поклонникам строгой истины. Я отнюдь не претендую на серьезный вклад в решение этой проблемы. Однако я буду вполне удовлетворен, если эти замечания относительно моделирования свойств живых тканей хоть в какой-то степени помогли тем, кто интересуется кибернетикой, расширить представление о ее проблематике.

## Глава 18

### МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ

#### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И СИСТЕМЫ ПООЩРЕНИЙ

Мы переходим теперь от проблем построения моделей живых тканей к проблемам модели механизма управления. Поскольку мы выделили вопрос о материале для кибернетических машин в качестве самостоятельной задачи, сейчас мы можем исследовать отдельно задачу создания модели механизма, не смешивая эти два вопроса. Чтобы точно уяснить различие между этими задачами, рассмотрим следующий пример.

Возьмем человека, чистый годовой доход которого составляет 1200 фунтов стерлингов. Эти деньги, которые ежемесячно равными частями выплачиваются ему наличными, он хранит в сейфе. Он вынимает деньги из сейфа купюрами по 5 фунтов стерлингов и тратит их. Регулярно, через равные промежутки времени, 240 раз в году он открывает сейф и берет из него деньги. Мы хотим, построив и исследовав модель такой системы,

установить, является ли эта система устойчивой на протяжении всего года. Модель можно построить бесконечным числом способов, и мы вполне могли бы принять в качестве модели два цилиндрических бака с водой, поперечным сечением по 12 квадратных дюймов каждый, из которых один представлял бы доход, а другой — расход. Установим эти баки на концах деревянной балки длиной 4 фута, с осью в центре. Исходя из принятой модели, вода подается в каждый бак порциями таким образом, что повышение уровня на  $\frac{1}{10}$  дюйма соответствует 1 фунту стерлингов. Следовательно, бак «дохода» заполняется двенадцатью порциями высотой по 10 дюймов каждая, а бак «расхода» — 240 порциями по  $\frac{1}{2}$  дюйма каждая. Для соблюдения масштаба в модели деревянная балка с осью (которая, по существу, представляет связь между входом и выходом системы, поддерживаемую в пределах от нуля до пяти фунтов стерлингов) выполнена «толщиной 2,5 фунта стерлингов», т. е.  $\frac{1}{4}$  дюйма.

На первый взгляд может показаться, что это совершенно адекватная модель системы. При завершении всех процессов в модели уровень воды в каждом баке поднимется до отметки 10 футов, и система придет в состояние равновесия. Это доказывает, что принятые условия обеспечивают экономическую устойчивость в течение года. Но, к сожалению, балка наверняка сломается, прежде чем машина закончит свою работу. Таким образом, эта модель, которая в принципе удовлетворительна, а на практике не действует, является совершенно бесполезной. В реальной обстановке оборотный капитал, составляющий в среднем 2,5 фунта стерлингов, может поддерживать существование системы, но в нашей модели это невозможно. Указанный недостаток обусловлен несовершенством принятой модели материала, в то время как модель самого механизма вполне обоснована.

Учет этого различия особенно важен в связи с тем, что, как правило, наиболее эффективной моделью механизма для кибернетических машин являются системы автоматического регулирования, структура которых не зависит от используемых материалов. Достигнутые

сравнительно недавно успехи в области теории этих систем дали математический аппарат, необходимый для описания саморегулирующихся устройств, принадлежащих к классу систем автоматического регулирования, и расчета их характеристик. Хотя применение систем автоматического регулирования очень удобно и широко используется, оно связано с двумя опасностями, которые наилучшим образом можно понять, исходя из показанного различия между моделью ткани и моделью механизма. Первая опасность была рассмотрена в предыдущей главе. Действительно, отвлекаясь от свойств материала при разработке моделей в виде систем автоматического регулирования, очень легко забыть об ограничениях материала в окончательном физическом варианте модели. Слишком наивно было бы считать, что эти ограничения можно преодолеть за счет искусного использования материала. Как мы показали выше, материалы, из которых состоят биологические объекты и которые мы стремимся имитировать, обладают многими специфическими свойствами. Для преодоления ограничений материалов, используемых в моделях, может потребоваться радикальная перестройка всей системы. В связи с этим иногда приходится полностью браковать модель механизма, на разработку которой было затрачено очень много усилий, и переходить к модели совершенно иного рода. Или, что еще хуже, эти ограничения можно вовсе не учесть, и тогда машина окажется неработоспособной, подобно балке с осью в нашем тривиальном примере.

Вторая опасность менее явного характера. Саморегулирующаяся система должна функционировать, как замкнутая система. Портер (Porter), например, показал [34], что разомкнутая система регулирования становится неустойчивой и не может компенсировать возмущения, если неизвестно точное соотношение между входом и выходом. Но весь смысл гомеостатического саморегулирования в кибернетических машинах как раз и заключается в том, что система должна компенсировать возмущения. Более того, она должна в принципе компенсировать даже такие возмущения, которые вообще не были предусмотрены конструктором. Такое тре-

бование можно удовлетворить только при помощи замкнутой системы, если принять в качестве модели систему автоматического регулирования. Прежде чем идти дальше, мы приведем пример, наглядно иллюстрирующий это положение. Поскольку использование систем автоматического регулирования в технике общеизвестно (ибо при построении реальных машин конструкторы применяют именно такую модель), мы возьмем пример из совершенно другой области, а именно рассмотрим принятую в промышленности систему поощрений. Приводя этот пример, мы хотели бы обратить внимание на три важных аспекта: во-первых, на необходимость применения замкнутого контура в системах автоматического регулирования, во-вторых, на возможность использования такой модели для немеханических систем и, в-третьих, на способность кибернетики находить общие методы подхода к нерешенным задачам управления производством.

Обычная промышленная система поощрений строится следующим образом. Проводится операционное исследование процесса, на основании которого создается то, что мы бы назвали моделью динамической системы. Другими словами, определяется технически обоснованное время на выполнение каждого элемента процесса и вводятся необходимые поправки, учитывающие влияние случайных факторов. Далее оценивается производительность труда рабочих, занятых в данном процессе, что позволяет провести сравнение со средними способностями человека. При этом необходимо также учесть влияние усталости и ввести соответствующую переменную в модель. Таким образом построение модели завершается, и решения, полученные на модели, сравниваются с действительными производственными показателями. На этом операционное исследование процесса заканчивается. В дальнейшем руководство предприятия использует результаты этого исследования при разработке системы поощрений, которая предусматривает выплату премий рабочим с целью стимулировать повышение производительности труда. При этом задача заключается в том, чтобы достигнуть оптимальной производительности при таком уровне заработной платы, который,

по мнению руководства, является наиболее привлекательным для рабочих и в то же время наиболее экономически выгодным для предприятия. Эта система представляет собой разомкнутую систему регулирования, структура которой приведена на рис. 6.

В такой типичной системе поощрений величина премии устанавливается в соответствии с показателями на выходе предприятия, причем операционная модель используется для выбора постоянных коэффициентов пропорциональности. Эта система в точности напоминает разомкнутую систему регулирования, описанную Портером

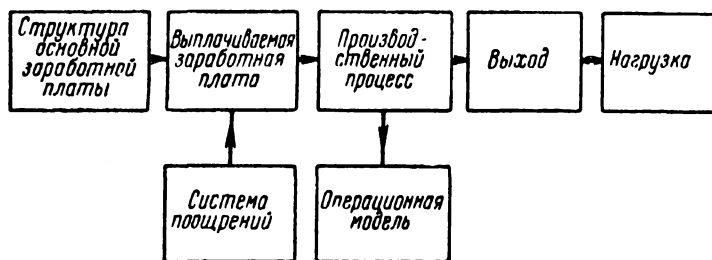


Рис. 6.

на примере паровой турбины, используемой в качестве приводного двигателя электрического генератора; положение клапана турбины (что соответствует размеру заработной платы) изменяется в соответствии с заданной скоростью генератора (что соответствует выходу предприятия). Как указывает Портер, такая система будет удовлетворительно работать только в идеальных условиях эксплуатации. В реальных условиях нагрузка и давление пара меняются и поэтому управление не дает должного эффекта. В системе поощрений условия также меняются, что приводит к аналогичному результату. В частности, при возникновении более благоприятных условий труда по сравнению с принятыми при первоначальном расчете (т. е. при построении операционной модели) система поощрений «идет вразнос». Промышленникам такая ситуация отлично известна: в конце недели рабочие отправляются домой, получив более высокое

вознаграждение, чем административно-управленческий персонал.

Кибернетик, применяя в качестве модели механизма такой системы систему автоматического регулирования, стремится обеспечить устойчивость управления при любых возмущениях. Такая система не смогла бы «пойти вразнос». Она была бы построена, как замкнутая система автоматического регулирования, основанная на принципе управления по отклонению, и имела бы вид, приведенный на рис. 7.

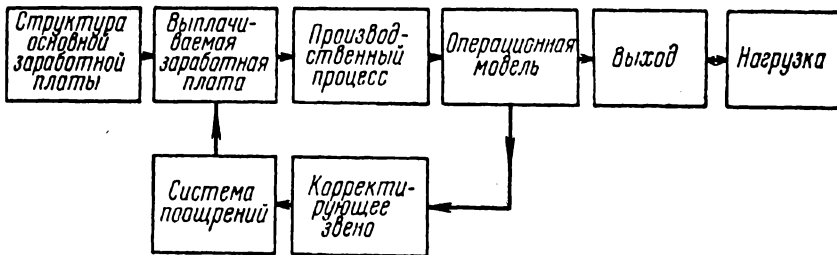


Рис. 7.

В этом варианте операционная модель используется в роли критерия для оценки характеристик производства, а система оплаты труда непрерывно корректируется по цепи обратной связи через систему премирования. Автор предложил опробовать подобную систему при проведении конкретного промышленного исследования [30], но его рекомендация не была принята.

Рассмотрев этот пример, мы можем теперь вернуться к вопросу о второй опасности, связанной с использованием систем автоматического регулирования в качестве кибернетических моделей. Мы пояснили и наглядно показали, что такие системы должны работать, как замкнутые. Но в то же время кибернетические машины обычно стремятся к ультраустойчивости эквифинально. Другими словами, они обладают свойством иметь определенную цель (или заданное финальное состояние), которой они могут достигать самыми различными путями, отправляясь от различных начальных условий. Эта цель называется эквифинальной, а само свойство —



**эквивинальностью.** Однако фон Берталанффи (von Bertalanffy) [35] доказал, что *замкнутая система не способна к эквивинальному поведению*. В этом и заключается вторая опасность.

Эта парадоксальная проблема имеет практическое решение, что, однако, не устраняет опасности слишком поверхностного подхода к использованию в кибернетике систем автоматического регулирования в качестве моделей механизма. Эту опасность можно по-настоящему оценить, только правильно теоретически осмыслив это решение. Автор предложил такое теоретическое обоснование в заключительной части работы, опубликованной еще в 1956 году [31], но целесообразно кратко повторить ход рассуждений, поскольку теперь их можно сформулировать более просто.

В главе 9 рассматривалась проблема метаязыка. Было показано, что система управления не может «обсуждать саму себя», что для обсуждения поведения любой системы, описанной в терминах какого-либо языка, требуется язык более высокого порядка. Теперь этот теоретический подход к задачам типа неразрешимых предложений можно применить для решения данного парадокса.

Пусть требуется описать систему при помощи кибернетической модели и в качестве модели механизма выбрана система автоматического регулирования. Для того чтобы поведение этой системы, выраженное языком № 1, было саморегулирующимся с точки зрения автоматики, оно должно быть описано в терминах замкнутой системы. Допустим, что это условие выполнено. Но, кроме того, вся кибернетическая машина должна вести себя эквивинально. Следовательно, ее общее поведение должно описываться языком № 2, который является языком управления высшего порядка, и теперь *вся эта система* (в которую саморегулирующаяся система входит лишь как часть) уже будет разомкнутой. Таким образом, метаязык способен обсуждать в терминах эквивинальности поведение замкнутого контура, который сам по себе не является эквивинальным.

Можно показать, что такой подход применим и к рассмотренным ранее гомеостатическим кибернетиче-

ским машинам. На первом этапе, который может быть описан языком № 1, для достижения устойчивости применяется замкнутая система регулирования с обратной связью. В соответствии с моделью механизма, применяемой в гомеостатах, такое управление можно описать как автоматическое регулирование на уровне языка № 1. Следовательно, эта форма управления способна компенсировать возмущения, которые сами могут быть выражены на языке № 1, т. е. возмущения, обусловленные стохастическими изменениями внутри контура управления. Но гораздо более важные возмущения, для компенсации которых и создаются гомеостаты, вовсе не принадлежат самой системе. Речь идет о возмущениях, поступающих из окружающей среды, которые возникают, по сути дела, *вне* системы, описываемой языком № 1. Стало быть, сами они должны быть выражены метаязыком. Итак, когда мы говорим: «существуют возмущения, возникающие в окружающей среде», или «вся система в целом стремится к *ультра*устойчивости», или, наконец, «вся система в целом является эквифинальной», то мы выражаемся на метаязыке. Когда мы прибегаем к закону необходимого разнообразия, говоря, что для уничтожения разнообразия, проникшего в один «черный ящик», требуется увеличить разнообразие, содержащееся в другом «черном ящике», мы также выражаемся метаязыком. Теория автоматического регулирования требует применения замкнутого контура передачи воздействий. Этот принцип можно назвать принципом внутреннего дополнения. В то же время, когда в главе 9 мы сформулировали принцип внешнего дополнения, мы прибегли к разомкнутой структуре управления, ибо этот принцип невозможно даже *выразить* на языке № 1.

Итак, мы выявили общую сферу применения теории автоматического регулирования к кибернетическим моделям механизма, проанализировали ее возможности для построения таких моделей и отметили связанные с ней опасности. Теперь стало совершенно очевидным, что вся теория автоматического регулирования основывается на понятии обратной связи. По существу, предварительное рассмотрение саморегулирующихся систем

в главе 4 представляет собой элементарное изложение этой теории. В настоящей главе также было показано, что синтез любых систем с точки зрения управления, но, конечно, не с точки зрения технической реализации может быть выполнен в терминах теории автоматического регулирования. Эта теория может быть использована не только как удобное средство для описания и анализа систем, но и в гораздо более широком смысле. За последние годы получили интенсивное развитие мощные математические методы, с помощью которых на основе модели механизма в виде системы автоматического регулирования можно синтезировать любую систему управления, а также строго научно рассчитать ее характеристики и предельные возможности. Многие ученые отмечают, что управление производством может быть построено на базе теории автоматического регулирования, а ряд специалистов по теории исследований операций, включая автора, внедрили в реальное производство системы, созданные на этой основе. Однако никто еще не применил весь математический аппарат теории автоматического регулирования для разработки деталей таких систем. Пожалуй, наиболее глубокое исследование имеющихся в этом отношении возможностей было проведено Симоном (H. A. Simon) [36]. Мы кратко рассмотрим его подход, чтобы показать, как много можно сделать при помощи этой кибернетической модели, чтобы строго научным методом обосновать выбор конкретной системы управления.

Входом ( $\theta_I$ ) системы производства является сырье, выходом ( $\theta_O$ ) — готовая продукция. В ходе производственного процесса материальные потоки движутся от входа к выходу с некоторой реальной скоростью ( $\mu$ ). На систему действует нагрузка ( $\theta_L$ ), представляющая собой поступление заказов от потребителей. Такова принципиальная структура промышленного производства, которую можно представить в виде системы автоматического регулирования, рассматривая два основных контура, применяемых обычно для управления производством. Прежде всего, выход должен подстраиваться в соответствии с изменением входа. Иначе го-

вора, существует главная обратная связь от  $\theta_0$  к  $\theta_1$ , которая моделирует ошибку системы (т. е. рассогласование между требуемым состоянием — выходом и начальным состоянием — входом). Эта ошибка ( $\varepsilon$ ) подается в систему по цепи обратной связи через оператор ( $K_2$ ), который осуществляет соответствующую подстройку *планируемой* производительности предприятия. Планируемая производительность ( $\eta$ ), в свою очередь, преобразуется в действительную ( $\mu$ ) с помощью

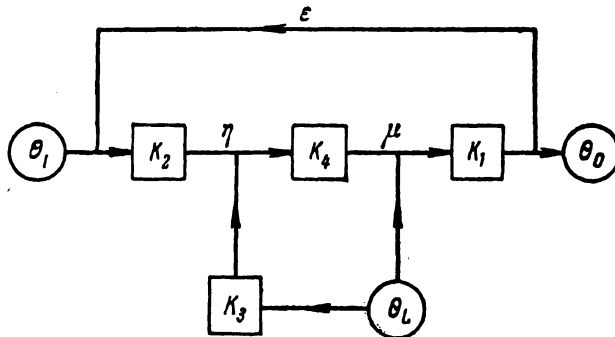


Рис. 8.

другого оператора ( $K_4$ ). Далее, нагрузка в виде заказов, влияющая на действительную производительность, также подается в систему по другой цепи обратной связи. Это просто означает, что плановики учитывают спрос на продукцию, т. е. как бы наделены некоторой долей предвидения. Таким образом, этот контур управления воспринимает нагрузку ( $\theta_L$ ) и через еще один оператор ( $K_3$ ) подстраивает планируемую производительность ( $\eta$ ). Но основное влияние нагрузки, сказывающееся на действительной производительности, отражается прежде всего непосредственно на выходе системы. Его действие представлено самым первым от выхода оператором ( $K_1$ ).

Такое описание системы управления производством, моделью которого является система автоматического регулирования, представляет собой несколько упрощенный вариант одного из случаев, рассмотренных Си-моном. На рис. 8 для наглядности приведена также

несколько упрощенная структурная схема управления производством.

Для математического описания этой системы не требуется точно определять вход и нагрузку, являющиеся независимыми переменными, которые могут принимать произвольные значения. Они должны вводиться в систему независимо от выхода (такие системы называются каскадными). Это условие удовлетворяется за счет того, что обратная связь от выхода ко входу не может существенно влиять ни на одну из этих величин. Таким образом, среди основных переменных нужно математически описать только выход. А выход представляет собой производительность предприятия, на которую влияет нагрузка в виде спроса, что отражено в первичном операторе ( $K_1$ ). Отсюда мы имеем:

$$\theta_0 = K_1 (\mu - \theta_L).$$

Далее, ошибка, подаваемая по цепи обратной связи, определяется как рассогласование между входом и выходом. Действительная производительность должна определяться запланированной через свой оператор, а на планируемую производительность, в свою очередь, действуют две величины: ошибка и нагрузка с соответствующими операторами. Таким образом, мы получаем три уравнения, имеющих вид

$$\begin{aligned}\epsilon &= \theta_1 - \theta_0, \\ \mu &= K_4 \eta, \\ \eta &= K_2 \epsilon + K_3 \theta_L.\end{aligned}$$

Все четыре уравнения определяют систему в математических терминах. Теперь задача сводится к исследованию этих уравнений с целью выявления поведения системы. Именно на этой стадии решение задачи переходит в область компетенции теории автоматического регулирования со всем ее арсеналом математических методов, важнейшим из которых является преобразование Лапласа, связанное с понятием комплексных чисел. Эта книга не рассчитана на математиков, а теория автоматического регулирования на этой стадии прекращает содержательную аргументацию, утверждая, что

окончательно решение можно получить далее чисто формальными методами. Читатели, которые дошли до этого места в книге, наверное, пожелают получить некоторые пояснения относительно того, как это делается, и именно для них приведены эти пояснения. Лицам, имеющим специальную математическую подготовку, следует обратиться непосредственно к работе Симона.

Теория автоматического регулирования рассматривает поведение не статических, а динамических систем. Поэтому она считает все переменные функциями времени. Следовательно, любую действительную производительность ( $\mu$ ) следует рассматривать в некоторой определенный момент времени ( $t$ ). Таким образом, вводит переменная  $\mu(t)$ , соответствующая производительности. При этом  $t$  есть действительная переменная, т. е. обычное число. Первым шагом анализа является замена этой переменной, где бы она ни встречалась, *комплексной* переменной (допустим  $p$ ). Эта переменная представляет собой также самое обычное число, но только состоящее из двух частей, одна из которых умножена на  $i = \sqrt{-1}$ . Другая часть комплексного числа называется «действительной частью». Однако для того, чтобы внести такое изменение в представление чисел, необходимо преобразовать всю функцию, в которую входит  $t$ . Эту операцию и производит преобразование Лапласа.

Уравнения, описывающие вход и выход системы, т. е., по существу, уравнения, описывающие всю систему автоматического регулирования в целом, можно выразить в виде функций времени и затем подвергнуть преобразованию Лапласа. График такой преобразованной функции лежит в комплексной плоскости. Поэтому функция, обратная этому преобразованию, определяет поведение всей системы в момент  $t$  *в функции от  $p$* , реализуя, как это требуется, замену действительной переменной  $t$ . Теперь при анализе нас интересуют действительные части этих комплексных переменных времени, ибо они показывают, является ли система устойчивой или нет, что можно выяснить, найдя корни новых уравнений.

На самом деле при таком анализе уравнения, описывающие функции времени, распадаются на части.

Например, вход системы меняется во времени. Если построить график этого изменения в виде временного ряда, то он будет иметь форму периодической кривой. Преобразование входа по Лапласу эффективно раскладывает эту кривую на составляющие частоты. Это преобразование вытекает из описанной выше математической процедуры и проявляется в появлении действительных частей корней преобразованных уравнений. Но вся система автоматического регулирования представляет собой машину, предназначенную для фильтрации входа (если пользоваться кибернетической терминологией). Это осуществляется путем изменения амплитуды и фазы входных частот. Таким образом, если все уравнения системы подвергнуть преобразованию Лапласа, то можно исследовать поведение системы по отношению к изменению входа и выхода по реакции системы на гармоники различных частот.

Изменение выхода во времени, обусловленное определенным изменением значения входа, носит название переходной функции системы. В модели системы управления производством нас не могут не интересовать переходные функции, ибо нельзя допустить, чтобы в каком-нибудь состоянии системы переменные принимали такие значения, которые могут привести к катастрофе. Но нас еще более интересует установившийся режим системы, т. е. ее устойчивость в заданных гомеостатических пределах во всем диапазоне изменения входов. Способность всей системы быть устойчивой в этом смысле является критерием качества управления. Очевидно, что, пользуясь методами теории автоматического регулирования, можно сравнивать относительные достоинства различных систем управления. При этом можно также определить, будут ли существенно улучшено качество системы введением дополнительных контуров или повышением точности и быстродействия существующих контуров или эти меры не дадут ощутимого результата.

Наиболее общий вывод, который сразу напрашивается при рассмотрении этой модели механизма, относится к колебанию выхода. Система автоматического регулирования в случае неудовлетворительного качества переходного процесса может перейти в режим генериро-

вания колебаний с возрастающей амплитудой. Это означает, что регулятор попадает в режим неконтролируемых колебаний и, естественно, становится бесполезным. Указанный недостаток отмечался в одной из предыдущих глав, когда мы говорили о «рыскании» в машинах и атаксии у людей. Теперь же мы нашли теоретическое объяснение этих явлений. Для устранения этого недостатка требуется, чтобы переходная функция была сильно демпфирована, т. е. чтобы выход колебался все меньше и меньше и приходил в установившееся состояние. Теория автоматического регулирования дает общее решение этой задачи, показывая, что такое требование удовлетворяется только тогда, когда *действительные части* корней характеристического уравнения системы *отрицательны и велики по модулю*. При этом легко также показать, что этот важный результат не зависит от нагрузки.

В своей оригинальной работе Симон, далес, развивает математический аппарат для исследования описанной выше системы. Здесь было бы неуместным приводить все его математические выкладки, а словесное описание математической процедуры очень скоро стало бы утомительным. Тем не менее следует указать на те выводы, к которым он приходит на основании анализа своей весьма общей и в то же время очень простой модели. Следует, однако, сразу же подчеркнуть, что ни один из этих выводов не является сенсационным, ибо едва ли можно ожидать новых важных открытий в результате такого предварительного исследования. Наиболее существенно то, что чисто математический подход при столь небольшом числе упрощающих допущений в отношении реальных свойств системы позволяет промышленникам значительно глубже понять проблемы управления производством.

Поскольку для реализации плана требуется определенное время, Симон первоначально принимает наличие постоянного запаздывания между планируемой и действительной производительностью. Он принимает также оператор  $K_3=1$  и доказывает, что параметры производства могут быть устойчивыми при этих условиях только в случае, когда форма кривой нагрузки



(заказов) является синусоидальной, а частота точно кратна частоте, соответствующей запаздыванию производства. Далее устанавливаются другие строго устойчивые ситуации при иных значениях оператора  $K_3$ . Продолжая исследование системы (отметим, что все это можно сделать на бумаге), Симон изменяет предположение о постоянстве запаздывания производства и принимает некоторое распределение запаздывания. Это можно сделать, выразив запаздывание в виде вероятностей какого-либо числа. Он показывает, что и в этом случае математическое ожидание запаздывания продолжает оставаться независимым от запланированной производительности  $\eta$ . Далее Симон рассматривает алгоритмы принятия решений, лежащие в основе функционирования системы, которые отражены в модели операторами  $K_2$  и  $K_3$ , ибо на эти операторы может воздействовать руководство предприятия. Используя вывод относительно корней характеристического уравнения, он показывает также, каково должно быть соотношение его параметров, чтобы обеспечить нулевую ошибку в установившемся режиме.

Наконец, Симон в заключение обращается к затратам производства. Он вводит элемент стоимости в уравнения, замечая, что устойчивость, достигаемая за счет увеличения запасов, ведет к повышению затрат в связи с необходимостью дополнительных капиталовложений, а достижение устойчивости за счет снижения колебаний в производительности может также привести к общему повышению затрат в связи с потерей клиентуры, когда предприятие не в состоянии выполнить заказы. Его пример из области производства лишний раз подтверждает необходимость общего кибернетического метода решения проблемы противоречивости целей управления. При научном подходе к решению этой задачи нельзя стремиться к одной цели, забывая о том, как это отразится на достижении другой. Необходимо исходить из того, что конечным критерием является сохранение существования. В данном случае противоречие наблюдается между стремлением минимизировать запасы и стремлением минимизировать колебания производительности. Этот вывод, а также некоторые дополнительные мате-

матические соображения позволяют сформулировать оптимальный алгоритм принятия решений, который сводится к тому, что для длительных периодов целесообразно снижать объем запасов, допуская колебания производительности, а для коротких периодов наоборот. Таким образом, применение всех этих научных методов привело к довольно очевидному результату. *В то же время* мы убеждаемся, что принятая модель способна давать такое решение. Поэтому ясно, что при наличии всех необходимых численных данных эта модель может помочь в конкретном случае детально определить оптимальную стратегию управления производством. Любой руководитель предприятия, пожалуй, согласится, что решение такой задачи далеко не столь очевидно.

Другим важным вопросом, связанным с затратами, является исследование наилучшей математической формы для выражения функции затрат. Симон показывает, что при использовании линейной функции попытка минимизировать затраты производства приводит к алгоритму, точно определяющему работу идеального фильтра нижних частот. Иначе говоря, он выводит уравнение фильтра, который не только полностью отфильтровывает все частоты колебания затрат выше определенного значения, но передает низкочастотные колебания затрат без всяких искажений. Однако, когда Симон возвращается к принятой им первоначально квадратичной функции затрат, он делает еще один ценный вывод. Оказывается, что характеристическое уравнение системы, минимизирующей затраты, имеет действительные корни *различных знаков*. Один из корней является положительным; следовательно, система с таким оператором была бы неустойчивой, так как ее выход в переходном режиме, который должен стремиться к нулю, возрастал бы по экспоненте. Это объясняется тем, что оператор, минимизирующий затраты, был выбран для условий установившегося режима, а при возникновении переходного процесса система переходит из одного установившегося режима в другой и при этом возникают неконтролируемые колебания. Промышленники неодно-

кратно убеждались в том, что именно такое явление действительно происходит с их механизмом управления. Теперь мы получили теоретическое объяснение этого отрицательного явления и поэтому можем принимать более обоснованные меры для борьбы с ним.

В этом разделе, пожалуй, было приведено достаточно доказательств, чтобы проиллюстрировать значение систем автоматического регулирования как моделей кибернетических механизмов. Рассмотренная работа Симона могла бы послужить ценной моделью при разработке системы управления производством методами теории исследования операций. Но для кибернетика конечная цель состоит не в этом. Описанная система представляет собой машину, стремящуюся к сохранению существования в условиях противоречивых критериев управления, и поэтому не вызывает сомнения, что ее поведением можно управлять только с помощью кибернетического устройства. Многого можно достичь в этом направлении и на уровне обычной автоматизации. Напомним хотя бы о фильтре нижних частот, который может автоматически накладывать категорический запрет на те производственные программы, которые ведут к слишком высоким затратам. Если включить в систему автоматического регулирования другие кибернетические элементы, например обучающиеся устройства, то перед нами вновь возникает задача создания в конечном итоге самоприспосабливающейся, саморегулирующейся системы.

## МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ

Последний вопрос, который следует рассмотреть в главе, посвященной модели механизма управления, касается технической реализации кибернетической машины с учетом ограничений, накладываемых несовершенством материалов. До сих пор в направлении практического использования описанных выше химических элементов или таких органических материалов, как колония дафнии, сделано еще очень немного. В настоящее время все серьезные работы по созданию кибернетиче-

ских машин неизменно связаны с электроникой. Можно ли уже сейчас представить себе, как будет воплощена в реальную конструкцию кибернетическая машина более необычного типа, отвечающая, например, абстрактному описанию, предложенному Дж. фон Нейманом в его общей теории автоматов? Мы надеемся показать, что составить такое представление теперь не столь уж сложно и поэтому в ближайшем будущем, очевидно, можно будет поставить задачу технической реализации такой машины.

Рассмотрим самую удивительную из всех кибернетических машин — машину, способную к самовоспроизводству, или, еще лучше, машину, способную производить более совершенные машины, чем она сама. В одиннадцатой главе мы познакомились с теорией таких машин, развитой сначала Тьюрингом, а затем Дж. фон Нейманом. При изложении этой теории мы пользовались идеей самого Дж. фон Неймана о возможности реализации такой машины. Машина-родитель представлялась помещенной в резервуар, содержащий компоненты, из которых строятся аналогичные машины. По инструкциям, записанным на ленте, которые определяют ее собственную конструкцию, машина-родитель должна отбирать необходимые элементарные компоненты и строить из них потомка. Однако такое представление трудно перевести на язык современной техники. Совершенно очевидно, что Дж. фон Нейман привлек его только с целью пояснения развитых им идей и отнюдь не рассматривал как рабочую схему предлагаемой машины. Однако теперь, когда мы уже познакомились со всеми основными теоретическими положениями кибернетики и знаем ограничения модели живой ткани, можно выдвинуть обоснованное предложение о том, как можно было бы осуществить такое «механическое размножение».

Чтобы понять существо этого предложения, необходимо четко уяснить принцип *блочной* конструкции. Первоначально электронные машины, создаваемые для исследований в области кибернетики (например, вычислительные машины), представляли собой сложный лабиринт из проводов, электронных ламп, конденсаторов и сопротивлений. Многие машины до сих пор строятся по

такому образцу. Если думать о конструктивной реализации размножающейся машины, оставаясь в плену таких представлений, то воображение может зайти в тупик. Как же такая машина сможет манипулировать элементарными компонентами и выполнять возложенные на нее функции? Образ машины в этом случае рисуется в виде какого-то индийского божества с невероятным числом рук, копающихся в своих собственных электронных внутренностях. Однако машины, отвечающие современным требованиям, имеют сравнительно простую конструкцию, ибо для их построения применяются заранее изготовленные строительные кирпичи, известные под названием блоков.

Уже в течение многих лет сложная аппаратура, например аппаратура телефонных станций и военных систем связи, выполняется по блочному принципу. По существу, блок представляет собой какой-нибудь отдельный узел, но этот узел не является неотделимой частью всей конструкции. Он сам по себе представляет законченную небольшую машину, так что более крупная машина может быть вся собрана весьма просто путем соединения отдельных блоков. Первоначально в системах связи такой принцип построения аппаратуры применялся в основном для облегчения эксплуатации и ремонта. Если какой-нибудь блок выходил из строя, то его просто заменяли новым. Таким образом, тщательный ремонт неисправного блока можно было производить без простоя машины в специальных мастерских. Однако прошло довольно значительное время, прежде чем предприниматели оценили этот принцип для построения вычислительных машин. Даже сегодня во многих вычислительных машинах этот принцип конструктивного оформления не используется, хотя, например, в большинстве промышленных моделей вычислительных устройств, выпускаемых фирмой «Ферранти», он весьма эффективно реализован.

Таким образом, если принцип блочной конструкции и не нов, а его использование в целях ремонта стало обычным, то внедрение этого принципа в область *экспериментальных* исследований (особенно для решения задачи создания конструкции кибернетических машин)

открывает новые перспективы. Одним из примеров использования блочного принципа при разработке конструкции экспериментальной аппаратуры были работы К. Д. Точера (K. D. Tocher) примерно в 1950 году (в то время он работал в Королевском колледже в Лондоне), разработавшего серию блоков, каждый из которых способен реализовать простую логическую операцию. Эти блоки были выполнены на стандартных шасси, состоящих из футляра с ручкой и двух штеккерных разъемов. Компактные логические блоки стали ценным оружием кибернетических исследований. Каждый блок можно тщательно и точно испытать и направить на склад в качестве строительного элемента для электронной машины. Скелет окончательной машины также был стандартизован в виде крупного шасси, на котором можно было разместить большое число логических блоков, причем монтажная схема позволяла соединять отдельные блоки в любой требуемой комбинации при помощи переключателей, смонтированных на главном пульте управления.

За счет внедрения блочного принципа проблема технической реализации (которую не следует путать с проблемой разработки) кибернетической машины была существенно упрощена. Описание машины, задаваемое в терминах логики ее операций, может быть реализовано, если взять со склада соответствующее число элементарных логических блоков определенного типа и подключить их на стандартном шасси. Поток информации между этими логическими элементами, определяемый описанием, распределяется при помощи коммутирующих устройств. Таким образом, в соответствии с этим подходом мы имеем две основные стадии реализации машины: отбор и соединение. Конечно, следует иметь в виду, что в ходе обычных экспериментальных исследований в эту удивительно простую систему необходимо вносить ряд модификаций, связанных с выполнением специальных требований, и не всегда можно обходиться только основными блоками. Но при этом значительная доля трудностей построения машины уже снимается. Следует отметить также, насколько просто машины, выполненные по этому принципу, можно изменять для

целей исследования, как просто они поддаются проверке и усовершенствованию и как просто они могут быть разобраны после завершения работы. Такие машины нет необходимости ставить в музей или продавать скупщику металлолома; их составные части просто возвращаются на склад стандартных блоков. В настоящее время исследовательская лаборатория Точера широко пользуется этим подходом.

Прежде чем идти дальше, отметим, как используется принцип блочной конструкции в природе при построении живых организмов. Клетки растения или животного в принципе идентичны, так как все они порождаются одинаковыми генами. Функциональные различия между ними возникают в период «строительного эмбрионального процесса», точно так же как возникают функциональные различия между идентичными логическими блоками в процессе построения машины по принципу Точера. Как можно видеть, блочный принцип имеет довольно древнее происхождение.

Вернемся теперь снова к тому, как можно представить себе размножающуюся машину. Ни одна машина такого рода еще не построена, но наша цель состоит в том, чтобы показать, что, овладев теорией, не так уж безумно трудно составить представление о том, как могла бы выглядеть реальная размножающаяся машина. Представим себе, что машина-родитель  $T_1$  выполнена по блочному принципу, т. е. состоит из шасси с комплектом логических блоков и жесткого набора переключателей, которые и определяют ее именно как данную машину и никакую иную. Машина функционирует, как машина Тьюринга, и выдает ленту, содержащую свое собственное описание. Этот процесс аналогичен созданию группы хромосом в организме родителя. Лента поступает непосредственно в машину строителя ( $B$ ), которая представляет модель процесса выпашивания плода, ибо строительная машина состоит из склада логических блоков, склада шасси и устройства для задания положения переключателей.

Теперь вопрос, поставленный нами в самом начале этого раздела, сводится к следующему: можем ли мы представить себе строительную машину считающей

ленту, выбирающей в соответствии с инструкциями соответствующие блоки со склада, ставящей их на шасси и затем (вновь считывая ленту) устанавливающей переключатели в положение, точно идентичное положению переключателей машины  $T_1$ ? Наверняка можем. С технической точки зрения в отношении возможности создания машины  $B$  нет ничего нелепого. Потомок  $T_2$  представляет теперь совершенно аналогичный новый экземпляр машины  $T_1$ , ни в чем не отличающийся от родителя. (Кстати, машина  $T_1$  в этом примере напоминает вирус, так как вирусы размножаются только в присутствии живых клеток, в роли одной из которых выступает машина  $B$ .)

Это пояснение одного из возможных подходов к решению кибернетической задачи теперь можно легко распространить, не насилуя воображения, на машину Дж. фон Неймана, способную к воспроизведению более сложного потомства. Предположим, что машина  $T_1$  имеет устройство памяти, выполненное также по блочному принципу, в котором она фиксирует информацию, требуемую для ее собственного расчета. Предположим также, что конструкторы машины  $T_1$  были не в состоянии точно предвидеть, насколько велика должна быть емкость этого устройства памяти. В связи с этим они запрограммировали память машины  $T_1$  таким образом, чтобы в случае «переполнения» основного устройства памяти машина прибегала к какому-либо дополнительному и малоэффективному методу запоминания. Пока ни одно из этих предположений не вызывает сомнений: программисты вычислительных машин уже работают на современных машинах почти в точности по этому методу, предусматривая даже сигнализацию о переполнении основной памяти. Тогда мы можем сказать, что машина будет фиксировать свой собственный недостаток объема памяти и, более того, зафиксирует это как новое требование в момент выдачи своего собственного описания. Машина-строитель  $B$  будет теперь в состоянии внести это усовершенствование в потомка. Таким образом, машина Тьюринга  $T_2$  будет иметь больший объем памяти, чем ее родитель машина  $T_1$ , и эта память будет унаследована как мутация, основанная на опыте,



приобретенном машиной  $T_1$  за время ее существования, а не на задании ее конструктора (который, как мы приняли, не мог предвидеть, какой объем памяти действительно потребуется).

Итак, в этом описании мы познакомились с машиной, способной к самовоспроизведению, а также с размножением машин, включающим эволюцию от более простых к более сложным. Подчеркнем вновь, что все сказанное предназначено только для того, чтобы помочь воображению осмыслить столь сложную интеллектуальную задачу. Но самое главное заключается в том, чтобы справиться в принципе со связанными с нею трудностями, последовательно преодолевая их. Самовоспроизведение и эволюция машин открывают поразительную перспективу, тем более если утверждать, что ее можно осуществить в ближайшем будущем. Она поражает, прежде всего, своей логической новизной. Действительно, как *может* механизм описать сам себя или развиться от простого к более сложному? На этот вопрос был дан ответ во второй части книги. Во-вторых, она поражает смелостью постановки научной задачи об имитации процессов, происходящих в живых организмах. Разве можно хотя бы представить себе модель живого организма? Этот вопрос мы осветили в третьей части. Наконец, поразительно то обстоятельство, что построение такой машины оказывается не только теоретически возможным, как мы это показали, но и практически осуществимым. Неужели можно даже построить адекватную модель живой ткани и живого механизма? На этот вопрос мы отвечаем в настоящей, четвертой части. Ни на один из этих вопросов нельзя пока ответить с достаточной полнотой. А в этой книге мы отнюдь не ставили перед собой цели изложить даже эти неполные ответы во всех подробностях, вовсе не собираясь убеждать читателя в том, чтобы он стал кибернетиком. Мы сделали лишь попытку рассказать об этих новых идеях и возможностях, чтобы показать, чем же, по существу, занимается кибернетика. При этом в настоящей главе, так же как и в ряде других, мы прежде всего искали в читателе союзника, полагаясь на его воображение, широту его взглядов и поддержку.

## Глава 19

## МОДЕЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Роль неопределенности в поведении реальных систем поистине огромна. На уровне сравнительно простых систем для решения возникающих при их исследовании задач достаточно статистического аппарата классической теории вероятностей. Так, например, в настоящее время не испытывают затруднений в решении задач контроля качества продукции научными методами, хотя эти задачи неотделимы от неопределенности. Хорошо известно, что распределение отклонений средних значений, определенных по результатам измерений малых выборок, относительно некоторого заданного значения (например, предельно допустимого размера изделия, обрабатываемого на металлорежущем станке) является гауссовым. При этом риск попадания бракованных изделий в число годных при контроле по методу «годное — брак» подчиняется биномиальному закону распределения. Системы выборочного контроля изделий, основанные на этом принципе, получили широкое распространение и оказались весьма эффективными. Однако для исследования более сложных систем приходится привлекать и более сложный аппарат математической статистики. Как мы уже указывали, этот аппарат базируется на специальном разделе математики, получившем название теории стохастических процессов. Аналогичный подход был распространен на некоторые типы очень сложных систем (определенных в главе второй как такой класс систем, который не поддается точному определению во всех подробностях). Этот подход оказался, в частности, весьма плодотворным в ядерной физике, где, например, излучение альфа-частиц успешно исследовано с помощью стохастической модели.

Поскольку теория исследования операций сталкивается с неопределенностью в системах, которые она изучает, описание неопределенности в рамках принятой модели неизменно является статистическим. В связи с тем, что обычно методика кибернетического анализа от логического исследования переходит к операционному исследованию данной динамической системы, кибернетика

также в значительной степени опирается на статистическую интерпретацию вероятности. Таким образом, следует отметить, что и теория исследования операций и кибернетика в своей основе исходят из одних и тех же научных взглядов на природу неопределенности в сложных системах. В одной из работ [3], на которую мы уже ссылались, где эта связь подробно рассмотрена, я показал, что комплекс дисциплин, носящий общее название теории исследования операций, использует целый ряд методов, объединенных в единую систему общими кибернетическими принципами, а сама кибернетика в своем *modus operandi* базируется на теории исследования операций.

Мы еще раз подчеркиваем это обстоятельство, так как было бы очень досадно, если бы соображения, излагаемые в этой главе, снова привели к смещению роли и целей теории исследования операций как комплекса дисциплин и кибернетики как науки, которые на самом деле различны. Дело в том, что проблема, которой мы должны заняться, т. е. исследование модели неопределенности, относится к обеим областям, что вытекает из их методологического единства в интерпретации природы вероятности. Это означает, что обсуждение этой проблемы будет вестись на почве, общей для обеих областей, что мы будем привлекать понятия и примеры как из той, так и из другой, не делая выводов отдельно для кибернетиков и специалистов по теории исследования операций. Это следует иметь в виду при чтении настоящей главы.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В достаточно развитой системе (имеется в виду сложная или очень сложная система) существуют процессы на входе и на выходе. Оба этих процесса или один из них могут быть регулярными или стохастическими. Регулярным называется процесс, в котором каждый сигнал, поступающий на вход системы или снимаемый с ее выхода, определен во времени в соответствии с известной программой. Иначе говоря, это означает, что процесс полностью предсказуем. Следовательно,

под регулярными процессами можно понимать также такие процессы, для которых программа на самом деле отсутствует, но могла бы быть составлена, так как они полностью управляемы и не проявляют никаких свойств, связанных с непредсказуемостью входа или выхода. Так, например, если предположить, что поточная линия никогда не останавливается и не замедляется, то процесс на выходе автомобильного завода, который выпускает одну автомашину каждые три минуты (этот интервал определяется гипотетическим постоянством скорости поточной линии и равным расстоянием между автомашинами вдоль линии), является регулярным. Процесс на входе этой линии представляет собой большой запас деталей, и если предположить, что этот запас достаточно велик и никогда не возникает опасность его истощения, то процесс на входе также «регулярен», хотя и в ином смысле.

В отличие от приведенного примера, такая система, как магазин розничной продажи, имеет стохастический процесс на выходе. Рассматривая любой вид товара, невозможно указать точно, сколько штук этого товара будет продано, например, сегодня. Однако параметры ситуации можно определить: «В среднем мы продаем 100 штук в день, мы никогда не продаем меньше 23 штук или больше 179». Такое описание представляет, конечно, пример очень грубого статистического анализа. Если получить некоторую дополнительную информацию, то можно было бы вывести распределение дневной продажи данного вида товара, исходя из которого можно было бы далее вычислить вероятность того, будет ли продано сегодня больше или меньше любого заданного числа штук. Такие распределения очень часто являются примерно симметричными, т. е. площади, ограниченные кривой распределения вероятностей и лежащие по обе стороны от арифметического среднего, примерно равны. Следовательно, шансов продать больше или меньше среднего числа штук за любой день примерно 50 на 50. (Это, естественно, объясняет, почему люди часто пользуются арифметическими средними и почему они так сильно ошибаются, если распределение вероятностей оказывается резко несимметричным.)

Если магазин розничной продажи обладает очень большим запасом товаров на складе, то практически ему не может угрожать опасность истощить свои запасы. В этом случае процесс на входе регулярен во втором смысле. С другой стороны, этот магазин может находиться в особо выгодном положении и ежедневно получать товары от своих поставщиков в требуемом количестве. Тогда его вход будет регулярен и в первом (основном) смысле. Но если магазин не может полагаться с полной уверенностью на поставщиков и вынужден оценивать свои потребности с учетом неопределенности сроков поступления товаров, то процесс на входе магазина является стохастическим. Отметим, что мы не пользуемся термином «случайный», так как поставки товаров не полностью хаотичны, а подчиняются некоторой закономерности. Владелец розничного магазина в этом примере, пожалуй, знает, что если в течение дня он не получил товаров от поставщиков, то вероятность того, что он их получит на следующий день, возрастает. Чаше всего он получает все требуемые товары в пределах месяца с момента заказа, довольно часто этот срок составляет пять недель, иногда шесть или семь недель, а однажды ему пришлось ждать целых восемь недель. Такой опыт обуславливает его ожидание, т. е. процесс на входе поддается определенному статистическому описанию. Однако *в пределах* этого описания поставки являются случайными, так что он не может судить о том, когда *прибудет конкретная* партия товара, хотя и может считать, что она будет доставлена в средний срок, но уж во всяком случае не позже чем через восемь недель.

Хотя это и весьма тривиальные соображения, но тем не менее они заслуживают внимания по крайней мере по трем различным причинам. Прежде всего, существенно подчеркнуть разницу между регулярными и стохастическими процессами на входе и на выходе, так как они неоднократно фигурируют в последующем изложении. Во-вторых, очень важную роль в последующем изложении играет различие между чисто случайными процессами и процессами, являющимися случайными только в пределах некоторого описания. Наконец, в-тре-

тых, несмотря на кажущуюся очевидность всего, что было сказано относительно процессов на входе и выходе, поразительно, насколько редко люди, управляя какой-либо системой, сознают истинную связь этих процессов. Это последнее замечание должно послужить важным стимулом для серьезных размышлений о всей проблеме неопределенности, и ему следует уделить особое внимание.

Ресурсы любой крупной фирмы, несомненно, представляют собой сложную систему, говорим ли мы о запасах сырья, объеме работ, находящихся в стадии производства, готовых изделиях или запасных частях. Независимо от суммы капиталовложений эти ресурсы представляют собой систему, которой часто приходится функционировать при очень незначительном управлении. Насколько же велик должен быть объем ресурсов или, говоря более конкретно, каким образом решается эта задача? Обычно кто-либо заинтересован в сохранении большого объема определенного вида запасов: это тот, кто может понести потери, если исчерпывается источник снабжения. Далее, обычно имеется также кто-либо, заинтересованный в том, чтобы данный вид запасов был по возможности небольшим: это, очевидно, тот, кто несет ответственность за объем капиталовложений. Первый руководствуется стратегией, направленной на преобразование стохастического входа в регулярный. Второй же очевидно, руководствуется противоположной стратегией. Ситуация осложняется тем, что запас, вполне вероятно, может иметь большое число входов и выходов. Оба заинтересованных лица приходят к компромиссному решению. Если они оба очень добросовестны, честны и способны учесть все имеющиеся данные, то такое решение может быть удовлетворительным. По существу, в этом случае их функции аналогичны функциям кибернетического устройства, предназначенного для оценки информации и обучающегося находить оптимальные решения. Но если даже согласиться с афоризмом, что искусство руководства — это прежде всего искусство подбора людей (в данном случае речь идет о правильном подборе людей для выполнения функций такого кибернетического устройства), то

принятое решение все-таки не может учесть всего разнообразия объективной действительности.

Дело в том, что запас создается и определяется как *регулярный* процесс, заключенный между двумя множествами стохастических процессов. Объем запаса определяется, таким образом, путем математических преобразований этих двух множеств в функции риска того, что поставщик и потребитель окажутся жертвами стохастической неопределенности. А сам риск (выражаемый как «столько-то раз за такое-то время») в свою очередь, можно оценить во всем диапазоне от «вряд ли когда-нибудь» до «почти всегда» в функции капитала, который необходимо вложить, чтобы застраховаться от риска. В таком случае общее решение руководства должно базироваться на этих фактических данных, а поскольку само решение периодически пересматривается, то этот процесс может рассматриваться как процесс обучения. Таким образом, мы показали характер неопределенности, проявляющейся в развитых промышленных системах. Описанная только что система представляет основной объект исследования той науки, которой посвящена эта книга. Для специалиста в области теории исследования операций задача выбора необходимого запаса представляется в виде «задачи массового обслуживания в сложной многосвязной системе», для кибернетики это, пожалуй, «машина, предназначенная для расчленения производства и сбыта». Как тот, так и другой подходы вполне обоснованы, так как каждый из них исходит из реальных свойств и назначений запаса. При этом вполне естественно, что первый является чисто *операционным*, а второй, столь же естественно, рассматривает *цели управления*, заложенные в системе.

Теперь, после того как мы описали и строго научно сформулировали эту задачу, посмотрим, как ее следует решать. В идеальном случае решение может быть найдено методами теории массового обслуживания или при помощи какого-либо иного метода математической статистики, рассматривающей стохастические процессы. Необходимо найти математическое описание процессов на входе и выходе и в дальнейшем при помощи каких-либо преобразований установить связь между этими процес-

сами. Иначе говоря, требуемые решения можно «вычислять». Однако, к сожалению, теоретический уровень, достигнутый математической статистикой, позволяет применять эти методы только в ограниченном числе случаев. При наличии большого числа взаимосвязанных входов и выходов для вычисления решений теория бессильна. Именно тогда ученый и обращается к технике моделирования. Итак, характер задачи понят, математические модели всех связанных с ней стохастических и регулярных процессов построения; остается установить, как они все между собою взаимодействуют. Если этого и нельзя рассчитать, то, несомненно, можно смоделировать.

Рассмотрим следующую ситуацию. Запас имеет регулярный вход, состоящий из 7 деталей в день, — это условие не меняется. Выход является стохастическим, т. е. ежедневную потребность нельзя предсказать, кроме как в терминах некоторого распределения. Это распределение может иметь несколько различных свойств, которые необходимо выявить и уточнить. Прежде всего, на него могут быть наложены определенные постоянные ограничения. Возьмем, например, такой случай, что входящие в запас детали всегда используются только в виде узлов, состоящих из трех деталей. Таким образом, из запаса всегда извлекаются детали в числе, кратном трем. Далее, во-первых, работая на полную мощность, цех, снабжаемый из этого запаса, может потребить максимально три узла в день по три детали, т. е. всего девять деталей. Во-вторых, распределение на выходе может характеризоваться каким-то постоянным параметром, например средним арифметическим. Примем, что среднее арифметическое выхода равно семи. Следовательно, процессы на входе и выходе находятся в целом в равновесии. (Все было бы хорошо, если бы только некоторые не утверждали, что можно доказать целесообразность полного отказа от каких бы то ни было запасов.) В-третьих, распределение вероятностей характеризуется определенной формой, которая является статистическим параметром иного рода. Пусть, например, имеется три шанса за то, что понадобится три узла по три детали, два шанса за то, что потребуются два узла, и один



шанс, что потребуется один узел. Эта информация извлекается на основании анализа опыта эксплуатации. Стохастический процесс на выходе не может выйти за рамки, определяемые этими тремя условиями. В этих рамках, представляющих собой определенную форму предсказания, точная потребность в конечном счете является непредсказуемой. При отсутствии запаса и условии, что шансы таковы, что в течение первых четырех дней работы потребность составляет 9 узлов в день, будет ощущаться недостаток соответственно в 2, 4, 6 и 8 деталей, увеличивающийся последовательно с каждым днем. Каким же образом возможно исследование такой системы с помощью моделирования?

В этом случае для представления процессов на входе и выходе можно адекватно использовать игральные кости. Вход регулярен, поэтому все грани кости, представляющей вход, должны иметь цифру 7 и, по существу, нет никакого смысла даже бросать эту кость. Однако кость, представляющая выход, будет замаркирована цифрой 3 на одной грани, цифрами 6 на двух гранях и цифрами 9 на трех. Среднее число очков при достаточно длительном бросании этой кости составит 7, что в качестве модели процесса на выходе удовлетворяет также двум остальным условиям. Теперь можно приступить к ведению воображаемого журнала о состоянии запаса. В первый день заносятся поступившие на склад 7 деталей и бросается кость, чтобы выяснить, сколько деталей следует взять со склада, и т. д. Очевидно, что если продолжать эту «игру» в течение достаточно длительного времени, то можно вполне удовлетворительно оценить ситуацию и определить, какой требуется минимальный объем запасов, чтобы минимизировать риск остаться совсем без деталей.

Теперь все элементы нашей модели неопределенности собраны вместе и мы получим полную картину. Мы видим, что моделирование, в данном случае игра в кости, позволяет быстро оценивать стохастическую ситуацию (гораздо быстрее, чем по наблюдению за ходом действительных событий), а также поддается опытной проверке (что произошло бы, например, если изменять регулярный вход на 6 и 8 деталей через день?). В этом-

то и заключается главное. То, что предсказуемо в данном стохастическом процессе, его форме и параметрах, получено на основании анализа реальной действительности и заложено в модель (расположение цифр на гранях кости). Это сделано для того, чтобы оставить только чистую случайность в качестве элемента неопределенности, а затем и этот элемент учтен в способе использования модели (бросание игральной кости). Рассмотренный метод решения задачи чрезвычайно важен, хоть он и может показаться в нашем примере тривиальным, важен потому, что проблема неопределенности была расчленена. Первоначально влияние неопределенности сказывалось в виде непонятных отклонений от нормы. Теперь мы расчленили ее на две части: «чистую» неопределенность, которую мы называем случайностью, и «закономерную» неопределенность, которая в конечном счете является предсказуемой. Эти два вида неопределенности и порождают совместно то, что мы называем стохастическим поведением.

Специалисты по теории исследования операций называют этот метод моделирования методом Монте-Карло из-за необходимости введения в систему чистой случайности. (Те, кто говорит, что, понимая метод, не понимает названия, показывают тем самым, что в действительности не понимают именно метода. Отсюда и необходимость в этом, возможно, слишком пространном пояснении.) Для кибернетика такая игра представляет собой весьма существенный метод принципа «черного ящика». Неопределенность господствует в естественных системах, которые изучает кибернетика, так как в этих системах неопределенность используется как *источник необходимого разнообразия*. Для этой же цели в кибернетических исследованиях вводится «черный ящик», несущий в себе неопределенность.

Перед кибернетиками встают две задачи. Каким образом закономерная часть стохастического поведения должна закладываться в кибернетические системы и как внести в них элемент чистой случайности? В любом конкретном случае дать ответ на первую часть этого вопроса не так уж сложно. Если требуемые закономерности известны заранее, то можно синтезировать любую

модель механизма, имитирующую соответствующие параметры этих закономерностей. Когда же такие закономерности неизвестны, то необходимо разработать модель *ткани*, которая будет вырабатывать требуемую закономерность в процессе игры. Именно это и происходит в существующих в настоящее время обучающихся машинах, где закономерность принимает форму множества условных вероятностей. Но ответить на вторую часть вопроса гораздо труднее, ибо само понятие «чистой случайности» расплывается, как только его начинают достаточно тщательно исследовать. Что же означает «случайный»? Легко рассуждать о случайности, когда говоришь о бросании игральных костей, но эти рассуждения почти ничего не дают для точного определения случайности. И кто же может определить идеальную кость, совершенно произвольный бросок и ничем не обусловленный результат? Эти вопросы, по моему мнению, принадлежат к числу наиболее трудных и наименее понятных вопросов, которые стоят перед кибернетикой. Они-то и составляют основную проблему при построении модели неопределенности.

### ФИЛОСОФСКИЙ ПАРАДОКС

Прежде чем продолжить исследование, необходимо сделать несколько общих замечаний о природе случайности. Мы приступаем к этому весьма неохотно, так как эта проблема очень коварна и до сих пор вызывает бесконечные ожесточенные споры. Это, безусловно, объясняется тем, что понятие случайности аналогично понятию непредсказуемости. Дело в том, что по крайней мере можно утверждать, что любое событие непредсказуемо лишь постольку, поскольку мы не понимаем его причинного механизма. Каждое событие, как принято считать, обусловлено какой-то причиной. Если бы причинный механизм был полностью понят, то это событие было бы также целиком предсказуемо. Исходя из этого, случайность рассматривают всего-навсего как свидетельство невежества. Иначе говоря, сказать о процессе, что он является случайным, это равносильно тому, чтобы сказать: «Я не знаю, как протекает этот процесс». Таким образом, мы попадаем в странное и неприятное положе-

ние, как бы пытаясь научно обсуждать нечто, существование чего может вообще быть сомнительным.

До сих пор ученый мог утешаться тем, что многие явления природы, причинные механизмы которых неизвестны, тем не менее характеризуются определенными распознаваемыми закономерностями. Если нет оснований ожидать, что на данном интервале времени некоторое событие произойдет данное число раз, а ожидается только, что *в среднем* оно будет иметь место  $n$  раз, то существует математическое ожидание однократного, двукратного и т. п. повторения события, причем эти числа распределены вокруг среднего  $n$ . Именно этот разброс, оказывается, имеет определенную математическую форму, несмотря на то что он проявляется во множестве различных ситуаций. Эта форма получила название распределения Пуассона. Таким образом, ученый, сталкиваясь с распределением, подчиняющимся закону Пуассона, принимает этот факт *prima facie* как доказательство, что рассматриваемый процесс является случайным. Но, учитывая все, что было сказано в последнем разделе, такой подход не решает стоящей перед нами задачи. Действительно, распределение Пуассона само по себе является предсказуемым, следовательно, моделирование такого вида встречающейся в природе случайности потребовало бы принятия естественной закономерности. Но в пределах этой закономерности процесс все равно необходимо воспроизводить «случайным образом». Основная трудность остается, она просто отодвигается на одну логическую ступень.

Таким образом, рассматривая эту проблему, мы неизменно возвращаемся к тому же самому противоречию. В пределах какого-либо конкретного ограничения («естественного» распределения Пуассона или какого-нибудь более сложного распределения) необходимо случайным образом производить отбор из ряда равновероятных альтернатив. Следовательно, мы сразу приходим к простейшей, но вместе с тем наиболее трудной формулировке задачи. Допустим, что из миллиона возможных выборов из десяти альтернатив отбор каждой альтернативы в результате длительных повторений опыта будет сделан 100 000 раз. По крайней мере можно утверждать,

что результат будет *стремиться* к этому числу. Иначе говоря, мы ожидаем, что распределение «чисто» случайной величины будет равновероятным, т. е. каждая альтернатива будет иметь одинаковую предельную частоту. По существу, попытка расчленив задачу на «закономерную» и «чистую» случайности всегда оказывается в конце концов безуспешной. Если при воспроизведении «чистого» элемента он соответствует определенной закономерности, то он не может более считаться «чистым»; с другой стороны, если он не подчиняется этой закономерности, то мы немедленно заявляем, что для этого есть какая-то причина.

Указанная трудность очень наглядно проявляется при пользовании таблицами случайных чисел. Как известно, обычно при решении реальных задач игральные кости заменяются специально подготовленной таблицей чисел, относительно которых дается «гарантия», что они являются случайными. Примем, что мы используем тысячу таких чисел для решения задачи. Результат решения задачи можно предугадать, поэтому мы исследуем сами числа. Пусть имеется ровно по 100 представителей каждой цифры. «Такая совокупность подчиняется слишком определенной закономерности, — заявляем мы, — она вовсе не является случайной». Но, с другой стороны, в этой совокупности может оказаться 200 троек, тогда мы говорим: «Это не случайность, а вызвано какой-то причиной». Далее мы можем, пожалуй, провести испытание статистической значимости, чтобы установить, «может» ли быть 200 троек «случайно». Но что же означает «случайно»? Само испытание определяется нашим представлением о случайности. Таким образом, все, кто прибегает к таблицам случайных чисел, оказываются в заколдованном кругу.

Составители таблиц, получающие миллионы случайных чисел на специально запрограммированной вычислительной машине, предназначенной для выдачи непредсказуемых результатов, неожиданно сталкиваются подряд с десятью страницами, сплошь заполненными одними нулями. Безусловно, при достаточно длинном пробеге это может произойти «случайно». Включают ли они этот пробег в свои таблицы? И если нет, то как же обстоит

дело с совокупностью из 1000 чисел, имеющей слишком много троек? С другой стороны, те, кто пользуется таблицами, в счастливом неведении оценивают результаты своих экспериментов, сравнивая их с числами, приведенными в таблицах. Никому не приходится решать столь безнадежную проблему, как физику-экспериментатору. Он, по сути дела, пытается проверить успех самозванного провидца (в данном случае физика-теоретика) в отгадывании нескольких карт подряд, сравнивая его со способностью таблицы случайных чисел давать столь же удачный результат чисто «случайно». Но неожиданно появляется разоблачитель и заявляет, что полученный экспериментатором результат представляет собой всего-навсего статистический трюк и что столь же поразительный вывод можно получить прямо из самих таблиц случайных чисел, которые на самом деле не случайны. Спенсер Браун (Spencer Brown) вызвал большое возбуждение в кругах физиков-экспериментаторов такими высказываниями. Его книга [37], которую, пожалуй, отверг бы ортодоксальный статистик, ибо она действительно не основана на аппарате классической статистики, тем не менее содержит ряд важных замечаний относительно природы случайности.

Несмотря на все философские споры, которые велись и наверняка еще будут вестись вокруг этого вопроса, для кибернетики рабочий вывод о природе случайности пока что можно сделать на основании очень простого примера. Возьмем идеальную монету в одно пенни. Я подбрасываю ее идеальной машиной сто раз, и она падает каждый раз «цифрой» вверх. Каковы в этом случае шансы 101 броска? Игрок скажет, что этому скоро придет конец и что теперь шансы выпадения «герба» неизмеримо возросли. Ученый-теоретик заявит, что такое мнение глубоко ошибочно (речь идет об ошибке, связанной с накоплением шансов). Он напомним нам, что каждый бросок является независимым событием и поэтому шансы остаются неизменными 50 : 50. Игрок стремится отыскать систему, которая, по его убеждению, основана на накоплении шансов; теоретик настаивает на своем априорном представлении о случайности, как о чем-то «чистом» и поэтому неизменном, несмотря на весь

противоречащий такому представлению опыт. Для ученого-практика и особенно для специалиста по теории исследования *операций* ответ может быть только один: «Вы *утверждали*, что сама монета и ее подбрасывание являются идеальными. Вы ошиблись».

Короче говоря, мы, по существу, не можем обсуждать далее «чистую» случайность (разве только в послеобеденной беседе). И в то же время мы все-таки стремимся внести непредсказуемый элемент в рамки стохастического поведения. Все сказанное выше показывает, что нельзя найти удовлетворительный теоретический критерий, который позволил бы этого достичь, и что такой критерий вообще не требуется. Требуется только, чтобы *с точки зрения самой системы* вводимое разнообразие было непредсказуемым. В описанном только что примере это условие не выполняется. Действительно, разве мы можем утверждать, что монета отлично знает, что она не ведет себя совершенно произвольным образом!? В результате принятое при рассмотрении неопределенности «расчленение», которое, как мы говорили в начале главы, является ключом к созданию модели неопределенности, предстает перед нами в истинном свете. Мы видим, что расчленение, которое мы проводим при построении модели неопределенности, не должно быть абсолютным, ибо оно отделяет не только «чистую» случайность от «закономерной», но также и саму систему от окружающей реальности. Случайность, которая нам нужна, представляет собой произвольный порядок информации в пределах системы, оцениваемый только с точки зрения самой системы.

Могут предложить взять универсальную цифровую вычислительную машину и превратить ее в кибернетическую машину. Сама цифровая машина принадлежит к классу «сложных детерминированных» систем. Таким образом, для моделирования на ней кибернетической машины в нее необходимо ввести программу «черного ящика», которая наделит цифровую машину необходимым для эквивиального поведения разнообразием. Такая программа требует большого объема памяти, содержащей случайные числа. Мы считаем, что кибернетическая теория не позволяет выполнить это условие ни

одним из известных способов. По уже указанным выше причинам было бы необоснованным создание такой памяти на ленте, на которой записывались бы случайные числа из заранее подготовленной таблицы. В равной степени была бы не обоснована разработка программы, которая обеспечивает выдачу чисел, обычно называемых псевдослучайными, при помощи какой-нибудь хитроумной арифметической процедуры, которая, как считают, дает ряд чисел, свободных от автокорреляции и других неслучайных свойств. Причина этого также уже ясна. В самом деле, нельзя поручиться за то, что *члены* так называемого случайного ряда, не определенного в терминах тех процессов, к которым будет применено его разнообразие, будут действительно случайными. То, что конструктор считает беспорядком, это не обязательно тот беспорядок, который будет выдавать машина. Сложная машина, в частности, может обнаружить упорядоченность, скрытую от ее создателя.

Теперь возникает еще одно возражение против общепринятого представления о том, что неопределенность может быть внесена в детерминированную систему каким-либо внешним процессом. Предположим, что в память вычислительной машины заложена таблица случайных чисел в виде дополнительной программы. Тогда, если основная программа требует случайного числа, то в нее будет направляться очередное число из этой дополнительной программы. Таким образом, вся система в целом вновь полностью детерминирована. Программист, по крайней мере в принципе, может точно предсказать результат. Предположим, далее, что в вычислительную машину введена оригинальная программа для получения псевдослучайных чисел. Сложные вычисления, которые теперь должна производить вся система, могут оказаться настолько громоздкими, что программист в силу этого не сможет предсказать конкретный результат. Однако в принципе он все-таки может это сделать, или если подходить к этому вопросу с другой стороны, то можно сказать, что *сама машина* в состоянии предсказать свой собственный результат. Поэтому она не является эквивифинальной. Такая неопределенность иллюзорна, так как «случайность» стала



неотъемлемой частью расширенной системы, постигающей случайность, которую она включает в себя.

Аналогичное возражение справедливо и в отношении конструкции шаговых искателей, в которых вследствие наличия детерминированной системы монтажа в конечном счете возникает повторяющаяся закономерность. Таким образом, рассматривая некоторую расширенную систему, охватывающую всю закономерность, можно сказать, что ее устройство и действия в конце концов детерминированы. Например, фунгоидная машина могла бы *разрастись* в такую более широкую систему. Очевидно, суть дела заключается в том, что регулярный характер детерминированной системы не определяется способностью человеческого мозга обнаруживать его. В равной степени нельзя считать вероятностной систему, в которой человеческий мозг пока не способен обнаружить закономерность. Поэтому человеческий мозг ни в каком отношении не является критерием этих свойств систем. Если мы говорим, что случайный процесс не распространяется на саму систему, для которой он служит источником информации, то мы не можем утверждать, что вообще существует вероятностная система, и единственное, что мы можем сказать, это что имеется вероятностная оценка системы, отражающая недостаточную проницательность самого человеческого мозга. И хотя мозг рассматривается как кибернетическая модель, как самая совершенная кибернетическая машина из всех доселе созданных и, более того, как машина, весьма совершенно приспособившаяся в результате эволюционного процесса обучения, длившегося многие миллионы лет, — это вовсе не означает, что он способен обнаруживать все виды упорядоченности. Утверждать, что все, в чем невозможно (естественно, для мозга) усмотреть какую-либо закономерность, в принципе не упорядочено, — значит впадать в элементарную ошибку антропоцентризма <sup>1)</sup>.

Мы признаем, что все эти рассуждения сложны и довольно туманны, но они связаны с вопросами, которые

<sup>1)</sup> Мировоззрение, ставящее человека в центр мироздания и связанное с религиозным представлением о божественной сущности человека. (Прим. ред.)

кибернетика не может себе позволить не рассматривать. Существует древняя теологическая загадка, которая говорит, что если человек наделен свободой воли в выборе добра и зла и если в то же время существует всеведущий бог, который, по определению, наперед знает, каков будет выбор, то само понятие свободы, очевидно, иллюзорно. В этом парадоксе заключены очень глубокие вопросы о том, что такое время («наперед»), что такое знание («знает» в каком смысле?) и что такое свобода («свобода воли» в каких пределах?). Стоящая сейчас перед нами задача не менее сложна как по форме, так и по содержанию. В самом деле, если неопределенность наделяет машину возможностью выбора, подчиненного эквифинальной цели, но в то же время внутри всей системы в целом имеется полная информация о процессах, которые создают эту неопределенность, то проявление вероятности в системе должно быть иллюзорным, а машина не может быть эквифинальной. Этот парадокс поднимает целый ряд философских проблем. Конечно, можно встать на точку зрения последовательного философского детерминизма и утверждать, что неопределенность есть не более чем неведение, т. е. что все системы, включая человека, полностью предсказуемы. Если же не придерживаться таких взглядов (например, я лично их не разделяю), то в кибернетике следует избегать выводов, которые приводят к полному детерминизму.

При решении задач методом Монте-Карло, применяемым в теории исследования операций, я сам пользовался средствами (таблицами случайных чисел, а также псевдослучайными числами, получаемыми при помощи ручных расчетов или моделированием на вычислительной машине), которые в этой главе опровергаются. При решении конкретной и ясной задачи в теории исследования операций опасность, связанная с использованием этих методов, очевидно, невелика. Но для кибернетической системы, будь то машина, моделирующая мозг, или сложная промышленная система, эта опасность, на мой взгляд, слишком серьезна. Машина, которая должна по замыслу служить моделью объекта живой природы, не сможет выполнить своего назначения, если будет включать несвойственное этому объекту разнообразие, а

строится машина исходя из предположения, что ученому точно известно, какое именно разнообразие требуется. Но мы показали здесь, что как раз этого он и не знает.

Четкие различия, которые я всегда проводил между детерминированными и вероятностными автоматами, в прошлом не раз подвергались публичной критике, основанной на том, что преобразование детерминированного автомата в эквивалентную кибернетическую машину представляет собой простую и непротиворечивую задачу. Первая часть настоящей главы была написана прежде всего с целью дать ответ на эту критику. Я согласен с тем, что можно смоделировать строго автономную вероятностную систему на детерминированной вычислительной машине, решить на ней операционные задачи, связанные с методом Монте-Карло, и даже эффективно имитировать кибернетический механизм. Но, по моему мнению, утверждать, что такая вычислительная машина может быть *преобразована* в кибернетическую при помощи искусного программирования по применяемым до сих пор методам, — значит извращать природу кибернетической системы. Не только эта глава, но и вся книга опровергают такую точку зрения.

В своих формулировках я умышленно заостряю спорные вопросы. Я хочу подчеркнуть, что центральное место, которое занимают разнообразие и вероятность в кибернетике, действительно требует привлечения самого пристального внимания к модели неопределенности. Не претендуя на роль пророка, я позволю себе дать примерный прогноз относительно того, каким образом удивительный парадокс, связанный с моделью неопределенности, может быть разрешен в будущем. Понятие «закономерной» случайности представляется здравым, и оно, очевидно, сохранится. Понятие «чистой» случайности, которым, согласно нашим нынешним представлениям, задается поведение в пределах закономерности и которым оно фактически задается в современных моделях, применяемых теорией исследования операций, будет, по моему мнению, отвергнуто, как бессмысленное, ибо оно содержит внутреннее противоречие. Я предвижу, что оно будет заменено в результате бурного развития эргодической теории, о которой мы упоминали в главе 5.

Это предсказание вытекает из замечаний, сделанных всего несколько абзацев выше о бессмысленности использования человеческого мозга в качестве конечного критерия для оценки поведения живой природы. Вследствие того, что само понятие чистой случайности не выдерживает критического анализа, я выдвигаю гипотезу о том, что чисто случайные процессы вовсе не существуют. Тот факт, что мы либо должны предполагать существование таких процессов, либо, отвергая их, вынуждены придерживаться последовательного детерминизма, дает основание для формулировки второй гипотезы. Она состоит в том, что имеются такие виды закономерностей, которые мозг человека еще не распознал, ибо он пока не приспособился их распознавать (хотя в конечном счете может научиться это делать), и что эти-то закономерности и являются вероятностными. Вот что означает ссылка на эргодическую теорию, связанную с исследованием предельных распределений для вероятностных систем. Если существует целый класс систем, обладающих нераспознанными свойствами эргодичности, то этот факт мог бы разрешить изложенный здесь парадокс. Ибо в этом случае неопределенность была бы эквививальной машиной, которая могла бы обойтись без детерминизма благодаря своей эквививальности, но в то же время не включала бы «чистой» случайности, основанной на внутренне противоречивой гипотезе, и заменила бы неопределенность *направленным* движением, которое можно назвать телеологическим<sup>1)</sup> (см. следующую главу).

Если это справедливо, то можно ожидать, что будут обнаружены целые области науки, в которых из-за недостатка такой теории остались огромные пробелы в наших научных представлениях. Такие пробелы действительно существуют, хотя мы вполне можем их игнорировать, так как они связаны с такими видами упорядоченности, которые, по определению, обнаруживаются

<sup>1)</sup> Телеология — идеалистическое учение, по которому все в мире целесообразно. Так, например, телеология утверждает, что в основе строения организмов лежит внутренняя цель, данная богом и предопределяющая направление развития. (Прим. перев.)

мозгом только путем умозаключений. Рассмотрим всего один пример. Мы говорили, что адаптация в организме представляет собой машину, предназначенную для случайных мутаций, обусловленных изменением окружающей среды. Пока эти две системы, организм и окружающая среда, медленно и непрерывно меняются, они могут взаимодействовать и подстраиваться друг к другу. Но многие мутации происходят, мы снова можем сказать, только в телеологическом смысле, в направлении к весьма отдаленной цели, которая с точки зрения окружающей среды является ступенчатой функцией. В то время, когда одна группа наземных животных медленно превращалась в птиц, окружающая среда не становилась постепенно газообразной. Однако все это темы для отдельной книги.

Остается подвести итог в отношении общего подхода к кибернетической модели неопределенности, который представляется закономерным на современном уровне знаний. Пока что мы вынуждены пользоваться понятием «чистой» случайности как «движущей силой» для объяснения ряда непредсказуемых событий в пределах закономерной случайности. Это следует делать осторожно, учитывая предостережения, изложенные в этой главе. Процесс генерирования неопределенности не может входить в основную функцию системы, ибо в противном случае он будет связан с этой функцией некоторым видом корреляции и будет бесполезен, как источник различного разнообразия. Значит, необходимо прибегнуть к «расчленению». Но в равной степени процесс генерирования неопределенности не может быть внесен в систему извне на основе некоторой априорной теории абсолютной неопределенности. Это объясняется рассмотренным выше философским парадоксом, который можно резюмировать, сказав, что, коль скоро найдена теория, описывающая хаос, он перестает быть хаосом. Таким образом, остается единственный выход. Неопределенность должна создаваться процессом, поддающимся описанию на том же языке, что и основная система, на языке, который эта система обычно понимает, но приведенном в такой беспорядок, что она его фактически перестала понимать.

Говоря о языке в этом смысле, мы расширяем применявшееся до сих пор употребление этого слова до, по сути дела, метафорического уровня. Используя эту метафору, легко привести пример, иллюстрирующий наши рассуждения. Если я напишу «chair fortuitous ink a waterfall dislike...»<sup>1)</sup>, то говорящий по-английски читатель будет убежден, что следующее слово непредсказуемо, и действительно никто не сможет его предсказать. Но если я напишу «thrang perbogal gozinbulx...»<sup>2)</sup>, то читатель, который также не может предсказать следующее слово, не в состоянии даже утверждать, что оно *непредсказуемо*, так как эти слова написаны на языке, которого он не знает, а следующее слово может быть совершенно очевидным для того, кто говорит на этом языке. Если выразить это в физических терминах, то, поскольку кибернетическая модель неопределенности должна обладать свойством физической реализуемости, «язык» становится тем механизмом, посредством которого она и реализуется. Незаконным мы будем считать такой процесс генерирования случайности, который вносит разнообразие из механизма другого рода; законным же будет тот процесс, который порожден тем же самым механизмом (хотя является отдельным от него). Мы будем называть его случайным не тогда, когда он отвечает некоторому произвольному внешнему критерию, а когда основная система считает его неупорядоченным.

На этом мы закончим наш философский экскурс, который, возможно, вызвал как эмоциональную, так и умственную усталость. Чтение философских рассуждений часто утомляет и раздражает, так как единственными орудиями философии являются сами слова, а ее основная задача заключается в раскрытии значения этих неадекватных символов. Я высказал здесь краткие соображения о смысле (каким он мне представляется) некоторых слов, чаще всего применяющихся в современной науке. Значение этих слов затемнено неточным и неоднозначным употреблением самих слов, что вызвано несовершенством языка, при помощи которого (такова уж

<sup>1)</sup> «Кресло случайный чернила водопад отвращение» (англ.).

<sup>2)</sup> Бессмысленный набор букв. (Прим. перев.)

наша участь) мы вынуждены обсуждать эти значения. Но и теперь, как и в двух предыдущих главах о кибернетических моделях, мы не пришли ни к какому определенному выводу. Мы снова сосредоточили внимание на том, чтобы подчеркнуть обычно недооцениваемое значение некоторой специфической области исследования и связанные с ней трудные и сложные проблемы, которые заслуживают тщательного изучения. В заключение этой главы, так же как и раньше, мы выскажем некоторые замечания относительно современного состояния работ в этой области, которое с точки зрения предложенных здесь критериев является явно неудовлетворительным. Единственной нашей задачей при этом снова является оценка практических достижений, что и составляет нашу следующую тему.

## МЕХАНИКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Излучение частиц высокой энергии в процессе радиоактивного распада иногда считают единственным чисто случайным и полностью непредсказуемым процессом в природе. Некоторым покажется, что этот пример служит еще одной иллюстрацией того, что случайность, подобно красоте, существует только для наблюдателя и является формой проявления невежества. А может быть, мы просто хотим сказать, что нами еще не обнаружены законы, управляющие этим процессом. Поэтому вряд ли можно предложить использовать радиоактивные изотопы в кибернетической машине в качестве источника непредсказуемого разнообразия, не говоря уже о технических трудностях и высоких затратах, связанных с такой попыткой, ибо мы получили бы «рандомизатор», описываемый «не тем же языком», что машина. В этом случае практическое значение общего теоретического возражения, выдвинутого в последнем разделе, сводится к тому, что так называемая случайность, введенная в машину таким способом, может оказаться чем-то иным, хотя конструктор (а поэтому и машина) мог об этом не знать. Может случиться, что это весьма специализированный и поэтому целиком упорядоченный и подчиняющийся определенным законам механизм достижения устойчивости на микро-

физическом уровне материи. Если это так, то такая модель менее всего соответствует той модели, которая нам требуется.

Эта практическая трудность справедлива в отношении большинства моделей неопределенности, используемых в настоящее время. Ученый, каково бы ни было его образование, впервые приступающий к работе в кибернетике, обычно вначале полагает, что ему удастся без особого труда разработать устройство — рандомизатор, которое будет служить источником чисто случайных событий. И он пытается построить его, опираясь на свои знания. Для задач, решаемых в теории исследования операций методом Монте-Карло, это устройство, как правило, будет удовлетворительным. Обычный подход ученого к проблеме создания такого устройства заключается не в том, чтобы искать подлинно случайные процессы, встречающиеся в природе, ибо он совершенно справедливо сомневается, что ему удастся их отыскать. Обычно он выбирает один из следующих двух методов. Первый сводится к тому, чтобы взять ряд частично понятых или почти совсем не понятых процессов и наложить их друг на друга, рассчитывая, что в результате получится такая смесь, что «она не может не быть случайной». Такой метод можно сравнить с программой для вычислительной машины, предназначенной для генерирования псевдослучайных чисел, и поэтому он вызывает аналогичное возражение.

Так, например, если мы возьмем последовательность натуральных чисел, начинающуюся с 1, найдем десятичные логарифмы этих чисел и возьмем, например, третью цифру в каждом из полученных чисел, то мы получим ряд такого типа. Мы вполне могли бы ожидать, что этот ряд будет случайным, понимая под этим, что частота появления каждой цифры будет стремиться к одной десятой от общего числа полученных цифр. На самом деле эта относительная частота не стремится к такому пределу, и поэтому полученный, как было показано М. Дж. Кенделлом (M. G. Kendall [38]), ряд не является случайным в том смысле, в котором мы ожидали. Следовательно, риск, о котором мы предупреждали, не является химерическим, и с нашей стороны было бы опрометчи-



вым полагаться на то, что наше собственное знание поможет нам определить, что мы не заблуждаемся. Кенделл отмечает, что даже такой выдающийся ученый, как Пуанкаре, споткнулся именно на этой ошибке.

Второй метод сводится к использованию процесса, который, по мнению самого ученого, не является случайным, но будет случайным для машины, в которую он вводится. Так, например, ряд произвольно соединенных шаговых искателей будет генерировать псевдослучайную последовательность до тех пор, пока она не начнет повторяться. Но если машина, в которую вводится это разнообразие, может быть устроена таким образом, что заканчивает работу за время меньшее, чем время основного цикла генератора случайных чисел, то случайность для машины сохраняется. Это чрезвычайно удачное устройство, так как оно соответствует нашему требованию, что процесс генерирования случайности должен быть выражен на том же языке, что и основной процесс (который может быть электрическим), и он вполне понятен. Поэтому такое устройство, по-видимому, не будет вносить в систему трудно уловимых воздействий и закономерностей природы, относительно которых ученый находится в блаженном неведении. Для первых машин, строящихся в настоящее время учеными, о которых говорилось в главах 13 и 14, а также для решения задач в теории исследования операций это приемлемая модель неопределенности. Но в конечном счете она просто окажется несостоятельной. И вот почему.

Мы представили себе возможность создания в будущем машин, обладающих способностью к развитию в такие структуры, которые мы не в состоянии постигнуть, машин, способных управлять процессами, которые в настоящее время не поддаются управлению, машин для усиления умственных способностей и т. д. Совершенно невозможно установить пределы деятельности таких машин будущего так, чтобы они работали только в рамках, определяемых ограничениями, заложенными в их собственные «рандомизаторы». Мы вновь сталкиваемся со знакомой дилеммой, но она относится к более сложным типам аппаратуры, нежели генераторы случайности, имеющие вид шаговых искателей. Если ученый стремится

гарантировать случайный характер процесса, снимая ограничения, скажем, на время цикла или каким-либо иным путем, то в конечном счете он все равно ограничивает возможности машины в разнообразии. Для обеспечения такой гарантии необходимо глубоко понимать принцип работы машины, которым она пользуется для достижения эквифинальности. Но сложная кибернетическая машина как раз и представляет собой такую машину, которая достигает поставленной перед ней цели заранее неизвестным методом, т. е. методом, возможно, и недоступным для разума ее создателя. Именно в этом отношении второй очевидный подход ученого оказывается несостоятельным для будущего, хотя и может быть использован для современных машин, еще не достигших требуемого совершенства.

В некоторых машинах, упоминаемых в этой книге, регулярны процессы на входе, в других — на выходе, но все эти машины характеризуются наличием стохастических процессов либо на входе, либо на выходе, либо на входе и выходе одновременно. В машине, предназначенной для решения стоящей перед нами задачи, процессы являются стохастическими как на входе, так и на выходе. Кроме того, эти процессы должны были бы быть мультипликативными, а *raison d'être*<sup>1)</sup> этой машины заключается именно в том, чтобы осуществлять преобразования таких процессов. Другими словами, в такую машину не требовалось бы вводить разнообразие как кибернетическое сырье для выполнения какой-либо конкретной работы, а она была бы предназначена исключительно для переработки имеющейся неопределенности на входе и на выходе. Именно с такой целью была создана стохастическая аналоговая машина SAM<sup>2)</sup>, подробное описание которой было опубликовано в работе [39] и которая рассматривается исключительно как вероятностное вычислительное устройство, предназначенное для моделирования задач теории исследования операций методом Монте-Карло. В этом смысле выполняемые машиной стохастические преобразования, очевидно, соответствуют

<sup>1)</sup> Смысл существования (фр.). (Прим. перев.)

<sup>2)</sup> Stochastic analogue machine. (Прим. перев.)

операционной модели задачи выбора оптимальных запасов на предприятии, рассмотренной нами в первой части настоящей главы. SAM была построена для моделирования задач именно такого рода. Она состоит из десяти генераторов S. D. G.<sup>1)</sup>, каждый из которых дает выход, моделирующий определенное распределение вероятностей. При условии, что каждый S. D. G. может иметь такой стохастический выход, ясно, что если соединить эти десять S. D. G. между собой, то SAM в целом сможет моделировать методом Монте-Карло сложные задачи с несколькими процессами на входе и на выходе.

В данном случае мы не собираемся вновь перечислять все возможности использования SAM для решения задач теории исследования операций, мы хотим только дать кибернетическую оценку модели неопределенности, содержащейся в каждом S. D. G. Выход S. D. G. представляет собой временную последовательность, характер которой определяется появлением небольшого металлического шарика. Появление шарика обозначает событие. Следующее событие (появление следующего шарика) наступает с некоторым запаздыванием, и это запаздывание непредсказуемо. Однако вся временная последовательность в целом подчиняется заранее заданному распределению вероятностей. Выполнение этих условий обеспечивается благодаря тому, что S. D. G. содержит модели как «закономерной», так и «чистой» случайности.

Модель закономерной случайности состоит из ряда блоков запаздывания, каждый из которых способен задерживать появление шарика на различные интервалы времени. Время запаздывания может составлять 1, 2, 3 и т. д. до 40 секунд. Как только шарик попадает в блок запаздывания, его будущее в дальнейшем полностью определено. Перед этим блоком расположен механизм закономерной случайности или устройство распределения. Это устройство состоит из 100 «равновероятных» ячеек, каждая из которых характеризуется одинаковой вероятностью попадания следующего шарика. Заданное распределение, получаемое с помощью этого устройства, устанавливается за счет деления площади, ограниченной

<sup>1)</sup> Synthetic data generator.

требуемой кривой распределения вероятностей, на 100 равных частей. В левой части кривой распределения находится участок, соответствующий, например, задержке в 15 секунд, в правой части — участок, требующий задержки, например, в 36 секунд. Таким образом, одна из «равновероятных» ячеек приключена к 15-секундной линии задержки, а другая — к 36-секундной. Остальные 98 участков распределены между лежащими в этом интервале 21 секундами задержки в соответствии с распределением их частот. Следовательно, если мода распределения соответствует 25 секундам и имеет частоту 18%, то не менее 18 «равновероятных» ячеек приключено к 25-секундной линии задержки. Таким образом, при достаточно большом числе опытов достигается «закономерный» эффект. Действительно, поскольку шарики попадают в 100 ячеек с одинаковой вероятностью, они появятся из машины спустя 15—36 секунд, а частота появления шариков после каждой задержки будет стремиться к величине, определяемой заданным заранее распределением. В то же время, поскольку каждый шарик вначале может попасть в любую из 100 ячеек, невозможно предсказать, какова будет действительно задержка между появлениями очередных шариков.

Таким способом SAM осуществляет «расчленение» модели неопределенности, о котором мы уже говорили, и обеспечивает требуемую закономерность этой неопределенности. Теперь остается пояснить, как в ней воспроизводится «чистая» случайность в требуемом входе из 100 ячеек.

Это осуществляется путем пропускания шарика через три различных механических «рандомизатора», назначение которых сводится к тому, чтобы сделать его путь совершенно случайным. Следует, однако, отметить, что при разработке конструкции механических «рандомизаторов» (подробности которой уже описаны в цитированной выше работе) были проведены многочисленные эксперименты, оценивающиеся по обычным статистическим критериям случайности, что является определенным допущением, на основе которого было достигнуто расчленение случайности. Мы уже признали, что понятие «чистой» случайности является несовершенным и временным

понятием при нынешнем состоянии теории вероятностей. Рассматривая SAM как машину, работающую по методу Монте-Карло, следует признать, что с точки зрения обычных критериев построения моделей, принятых в теории исследования операций, она недостаточно обоснована. Но рассматривая ее как потенциальную кибернетическую машину, мы приходим к выводу, что такая модель неопределенности, по-видимому, удовлетворяет требованиям, сформулированным в последнем разделе. Посмотрим, почему так происходит.

«Чистая» случайность вносит разнообразие в систему из внешнего мира. Поэтому она не связана с риском внести причинность по цепи обратной связи от основного процесса. Разнообразие, которым она оперирует, выражено на том же самом «языке», что и основной процесс, который связан с упорядоченным поведением (детерминированное приключение) маленьких металлических шариков. «Рандомизаторы» же оперируют в терминах беспорядочного поведения шариков. Их устройство настолько незамысловато, что трудно себе представить, чтобы их поведением управляли какие-либо законы, не понятые конструктором. Шарик просто подвергается механическим ударам, поэтому уж без всяких опасений можно утверждать, что их поведение для основной системы, «говоря на ее собственном языке», непредсказуемо. Единственным недостатком такой модели неопределенности, по моему мнению, является возможность вмешательства механических причин, например наклона. Но легче застраховаться от недостатков чисто механических путем высококачественного исполнения устройства, чем предупредить какие-либо неожиданные причины, которые могут, как известно, возникать при проведении численных преобразований (как в примере Кенделла) или в поведении альфа-частиц.

В созданной стохастической аналоговой машине имеется десять генераторов S. D. G., и я первый готов признать, что по своей конструкции вся эта машина с ее непрерывным треском и пощелкиванием металлических шариков весьма мало отражает тот уровень конструирования, на котором создается современная научная аппаратура. Но, насколько мне известно, она представляет

собой единственную машину, обладающую способностью преобразовывать два множества стохастических процессов на входе и на выходе в любую заданную закономерность. Кроме того, эта машина полностью наблюдаема в работе и поддается «управлению». Этим я хочу сказать, что значения параметров машины можно непрерывно изменять по собственному усмотрению в процессе моделирования, а экспериментируя с моделью, можно получать информацию о том, как действительно работает изучаемая с ее помощью система. На этом мы закончим рассмотрение возможностей данной машины как орудия теории исследования операций.

С точки зрения кибернетики SAM скорее, чем любой другой известный нам и гораздо более сложный электронный механизм, отвечает требованиям, предъявляемым к модели неопределенности. Например, при исследовании проблемы усиления умственных способностей с помощью этой машины не возникает принципиальных затруднений в оценке получаемых результатов, так как работа этой машины основана на очень простом и в то же время весьма совершенном источнике разнообразия. Нельзя допустить, чтобы постоянно возникали опасения в том, что используемое для решения подобных задач вычислительное устройство может выдать искаженные данные о протекающих в нем самом преобразованиях псевдослучайных чисел, в то время как по идее такое устройство должно выдавать результаты, превосходящие все, на что способен человеческий ум.

Таким образом, кибернетический метод создания моделей неопределенности в настоящее время сводится к расчленению случайного поведения, моделированию «закономерного» компонента (что может быть изящно выполнено различными способами) и выборке из этой закономерности «чистой» случайности. Этот метод может быть эффективным для кибернетических машин, но он недостаточен для устройств, работающих по принципу Монте-Карло. Однако до сих пор еще не предложено удовлетворительного общего метода решения проблемы построения модели неопределенности, а изложенный здесь подход является примитивно механическим, хотя и обладает, по-видимому, определенными теоретическими

достоинствами. Поиск идеальной модели «чистой» случайности, пожалуй, вообще является иллюзорным, ибо, чем более тщательному анализу мы подвергаем это понятие, стремясь установить его признаки, тем более внутренне противоречивым оно предстает перед нами. Необходимо исследовать проблемы неопределенности с иных позиций, ибо вряд ли какой-либо из подходов, удовлетворяющих некоторые области науки, может удовлетворить кибернетику. Это объясняется тем, что при описании реального мира другие науки вынуждены признавать очень сложную вероятность лишь в качестве одной из координат. А для кибернетики она является основным содержанием этого описания.

## Глава 20

### МОДЕЛЬ ЯЗЫКА

Совершенно очевидно, что если автор, пишущий научную книгу, злоупотребляет всякого рода «оговорками», то от этого изложение только проигрывает. Если автор попадает в такой грех, то в результате его текст изобилует весьма примитивными со стилистической точки зрения выражениями, вроде «так сказать», «если можно так выразиться» и т. п. По сути дела, все эти выражения совершенно излишни, так как читатель вообще не воспринимает их истинного смысла. Он просто считает, что автор страдает дефектом стиля, аналогичным в известном смысле нервному тик. Поэтому только в самом конце книги я даю подробное объяснение того факта, что язык, которым она написана, является лишь моделью языка кибернетических машин. Автор обращается ко всем, кто прочел хотя бы одну главу этой книги, с просьбой прочесть обязательно и это краткое заключение. Дело в том, что если читатель составит себе представление о кибернетике, не учитывая пояснений, данных в заключительной главе, то он сам будет в значительной мере повинен в неправильном истолковании того, что я хотел сказать.

Я обращусь вначале к примеру самой простой модели. «Небо затянуто облаками, но солнце пытается про-

биться сквозь них». Что мы имеем в виду, говоря «пытается»? Или возьмем другую фразу: «Вода стремится установиться на определенном уровне». Что означает в данном случае «стремится»? Очевидно, что мы пользуемся подобными словами только для удобства: природа нашего языка такова, что зачастую из словесного описания некоторых систем создается впечатление, что в них существуют целенаправленные стимулы, хотя на самом деле таких стимулов в этих системах нет. Иногда это не имеет значения, но при рассмотрении биологических систем описания такого рода приводят к недоразумениям. Действительно, что такое инстинкт? Физиологи определенно считают, что инстинктивное поведение есть не что иное, как проявление закономерности, заложенной в животном от рождения. Они, конечно, не утверждают, что животные формулируют для себя цели, к которым они сознательно стремятся. Однако в обычном изложении очень трудно описывать поведение животных так, чтобы такая идея не подразумевалась. Сам того не замечая, ученый постоянно употребляет выражения вроде «стремление животного сделать то-то и то-то». Один зоолог (Дж. А. Рамсей (J. A. Ramsay)) специально подчеркивает эти трудности. Он признает, что, описывая биологические системы, практически невозможно избежать телеологии, т. е. приписывания этим системам осознанной целенаправленности действия. Поэтому он называет такие описания «телеологической стенографией».

Язык, которым пользуется кибернетика, таков, что в кибернетических описаниях столь же трудно избежать приписывания рассматриваемым системам осознанной целенаправленности. Следовательно, язык кибернетики в значительной степени также является телеологической стенографией. Биолог всегда может отвести обвинения в телеологии, указав, что телеологической является не его философия, а лишь язык, которым он пользуется, т. е. телеологическая стенография. Кибернетик также может воспользоваться этим аргументом, но поскольку кибернетика занимается изучением систем любого вида и поскольку для нее несущественно, является система живой или неживой (и в первом случае обладает ли она сознанием или нет), то здесь речь идет не просто о неточном



употреблении слов, а о чем-то значительно более важном. Было уже неоднократно замечено, что люди, которые не осознают, что телеологические представления незаметно проникают в их суждения через язык, приходят к совершенно неправильным выводам. Единственной надежной гарантией от этой опасности является глубокое понимание методов теории исследования операций, используемых кибернетикой, в частности, в применении к моделированию.

Мы неоднократно отмечали, что «промышленное предприятие (фирма) представляет собой живой организм, реагирующий на изменения окружающей среды». Эта формулировка также выражена при помощи телеологической стенографии, так как в действительности мы отнюдь не считаем, что предприятие является живым организмом. Почему же в таком случае мы не используем сравнения: «предприятие подобно живому организму»? Мы не делаем этого потому, что такое высказывание подразумевало бы, что можно просто провести интересную аналогию между предприятием и живым организмом. Мы же хотим выразить гораздо более сложную мысль. Эту мысль в самом полном из всех возможных изложений можно представить следующим образом: «если принять, что предприятие является живым организмом, реагирующим на изменения окружающей среды, то отсюда вытекает ряд определенных следствий, а модель, построенная исходя из такого условия, представляет собой изоморфизм». Выводы, которые делает кибернетика, исходя из такого предположения, идентичны выводам, основанным на постулате «предприятие есть живой организм», но такие выводы никак не вытекают из сравнения «предприятие подобно живому организму». Следовательно, такая модель с учетом оговорки относительно телеологической стенографии является вполне обоснованной. Однако может случиться, что после построения кибернетической модели кто-нибудь из ее создателей заявит, к примеру, следующее: «Кибернетика показала, что предприятие действительно является живым организмом и поэтому рано или поздно оно погибнет». Но кибернетика ничего подобного не утверждает, ибо рассуждение начинается с условного «если». При решении

кибернетических задач (а также учитывая все, что мы вкладываем в понятия моделей и изоморфизмов) логика такого рассуждения совершенно безупречна. Однако в других областях, в которых не используются методы теории исследования операций, против этой логики можно выдвинуть весьма правдоподобные возражения, хотя на поверку они все-таки оказываются несостоятельными.

Ярким примером такого рода являются некоторые исследования психологии самого человека, представляющей собой особую систему. Предположим, что человек болен шизофренией, т. е. у него имеет место раздвоение личности. Его сознание расходится с окружающей его действительностью. Психиатрам известно, что такой синдром часто встречается у индивидуумов, которые подвергаются сильному эмоциональному потрясению. Шизофрения даже в начальной стадии делает человека неполноценным, и поэтому психологи начали считать (я тоже использовал эту методику), что само *отсутствие* признаков шизофрении служит свидетельством того, что человек является вполне положительным. Наряду с этим возникли такие оценки, как «цельная, уравновешенная личность», которые оказались весьма полезными. Следует, однако, учитывать, что формулировка этих оценок дается также в телеологической стенографии. Их истинный смысл в отличие от того смысла, который в них вкладывался в период, когда они впервые начали применяться, заключается в том, что человек должен стремиться к некоторому, более совершенному состоянию. По-моему, именно, таким неправильным пониманием телеологической стенографии психологов объясняется появление в середине нашего века мифического представления о «положительном» человеке. Принимая за *цель* то, что первоначально было просто *описанием* здорового состояния психики, человек подрывает свою инициативу, ограничивает воображение и ставит предел своим усилиям. У великих людей равновесие их разнообразных способностей и противоречивых страстей устанавливается благодаря широте взглядов и величию духа. Моделирование такого равновесия путем арифметического усреднения по времени и поступкам привело бы в лучшем случае к модели посредственности.

Неизбежность этого печального вывода блестяще обнаружена Уильямом Г. Уайтом (William H. Whyte) [40], который исследовал результаты подобного моделирования и разоблачил лежащий в его основе миф. Я не хочу приписать ему свое мнение, что происхождение этого мифа следует искать в том, что используемая нами телеологическая стенография незаметно приводит к подмене описаний «целями», но такой взгляд тем не менее находится в полном соответствии с положениями Уайта.

Теперь, когда мы выяснили всю пагубность неправильного понимания телеологической стенографии, проанализируем, чем является она для кибернетики как науки. В конце книги, после того как даны все объяснения, вполне уместно дать определение кибернетической машины как «моделирующей системы, операционное поведение которой является изоморфизмом участка мозга». Но такое определение в целом (особенно ряд входящих в него слов) было бы бессмысленным для тех, кто не знаком с ходом всех наших рассуждений. Поэтому в книгах для краткости часто пользуются выражением «думающие машины», которое, упрощая это определение, по существу не искажает его. Но как обстоит дело с телеологической стенографией такого выражения? «Так, значит, — заявляют некоторые, — могут существовать думающие машины. Отсюда мы можем сделать вывод, что, во-первых, человек в конечном счете тоже представляет собой машину и, во-вторых, что мы вступаем в эпоху, когда все стороны деятельности человека станут доступны для моделирования. И вопрос лишь в степени соответствия». Если исходить из первого положения, то мы вскоре придем к последовательному философскому детерминизму, а исходя из второго — к «науке о создании человека». Такое «развитие» кибернетических взглядов, связанное с неправильным пониманием языка, представляет полный абсурд.

Подобные претензии не следует приписывать кибернетике, которая представляет собой достаточно мощную во всех отношениях науку: она поднимает деятельность руководства производством на новую ступень и дает более совершенные принципы управления, чем выдвигавшиеся до сих пор как в технике, так и в сфере управле-

ния производством. Ее основной метод состоит в специфическом использовании моделей, что позволяет с подлинно научной точки зрения подойти к решению самых необычных задач. Развитие кибернетики, наряду с развитием новых форм энергии, позволит по-новому представить себе общество будущего. При построении моделей кибернетика прежде всего обращается к биологическим системам, пытаясь скопировать их основные свойства. Таким образом, значение кибернетики в настоящее время определяется не приписываемой ей способностью создать сверхмозг, а необходимостью в кратчайшее время расстаться с архаической системой взглядов на сущность управления вообще.

Мало что можно сказать о модели языка, не касаясь философских и логических проблем, выходящих за рамки этой книги. Но и это немного очень важно. Любая кибернетическая система выполняет определенные функции, которые можно описать. Чтобы устранить возможность неправильного понимания, необходимо выразить эти описания на языке самой системы. Каждый слышал, как хозяин собаки утверждает: «Она понимает все, что я ей говорю». И действительно, собака реагирует на речь своего хозяина, и если бы мы знали «язык собаки», то могли бы сказать, какой опыт такая реакция отражает. Но поскольку мы не знаем этого языка, то мы вынуждены применять его модель: «Она понимает все, что я ей говорю». Заключение здесь опасности самоочевидны.

Модель языка системы, которым пользуется кибернетика, вносит в описание такие смысловые оттенки, от которых нам хотелось бы избавиться. Но мы не в силах этого сделать и поэтому всегда должны помнить о возможности неверных «толкований» при обсуждении нервных систем, мозга и машин. Существуют ли люди, которые готовы отрицать роль этики и эстетики только потому, что создана механическая черепаха? Как это ни абсурдно, действительно существуют. Пусть же тот, кто хоть в какой-то мере понимает истинное могущество кибернетики и ее возможности, не следует их примеру.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Norbert Wiener, *Cybernetics*, John Wiley, New York, 1948. [Русский перевод: Норберт Винер, Кибернетика, или управление и связь в животном и машине, «Сов. радио», М., 1958.]
2. Stafford Beer, *The Scope for Operational Research in Industry*, Institution of Production Engineers, London, 1957.
3. Stafford Beer, *Operational Research and Cybernetics*, Proceedings of the First International Conference on Cybernetics, Namur, 1956.
4. Arnold Tustin, *The Mechanism of Economic Systems*, Heineemann, London, 1953.
5. Heinz von Foerster, *Quantum Theory of Memory*, Transactions of Sixth American Conference on Cybernetics, Josiah Macy Jr. Foundation, New York, 1950.
6. W. Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Chapman and Hall, London, 1956. [Русский перевод: У. Росс Эшби, Введение в кибернетику, ИЛ, М., 1959. Изд. 2. М.: КомКнига, 2005.]
7. Claude Shannon and Warren Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, 1949.
8. John R. Bowman, *Reduction of the Number of Possible Boolean Functions*, Transactions of the Ninth American Conference on Cybernetics, Josiah Macy Jr. Foundation, New York, 1953.
9. Sir Arthur Eddington, *Fundamental Theory*, Cambridge University Press, 1948.
10. Stafford Beer, *Operational Research and Financial Management*, Accounting Research, vol. 8, № 1, 1957.
11. Stafford Beer, *The Productivity Index in Active Service*, Applied Statistics, vol. 4, № 1, 1955.
12. A. K. Soper, Неопубликованная работа, 1956.
13. A. M. Turing, *On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem*, Proc. Lond. Math. Soc. (2), 42, 230, 1947.
14. John von Neumann, *The General and Logical Theory of Automata*, Cerebral Mechanisms in Behaviour, John Wiley, New York, 1951. [Русский перевод: Дж. фон Нейман, Общая и логическая теория автоматов. Статья в брошюре: А. Тьюринг, Может ли машина мыслить? Физматгиз, М., 1960. Изд. 2. М.: КомКнига, 2006.]

15. Warren S. McCulloch and Walter Pitts, A. Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 5, 1943. [Русский перевод: У. С. Маккалок, У. Питтс, Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности. В сборнике «Автоматы», ИЛ, М., 1956.]
16. S. C. Kleene, Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata, Automata Studies, Princeton University Press, New Jersey, 1956. [Русский перевод: С. К. Клини, Представление событий в нервных сетях и конечных автоматах. В сборнике «Автоматы» под редакцией К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти, ИЛ, М., 1956.]
17. Frank H. George, Logical Networks and Behaviour, Logical Networks and Probability, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 18 and vol. 19, 1956, 1957.
18. D. A. Sholl, The Organization of Cerebral Cortex, Methuen, London, 1956.
19. John von Neumann, Probabilistic Logic and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components, Automata Studies, Princeton University Press, New Jersey, 1956. [Русский перевод: Дж. Нейман, Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. В сборнике «Автоматы» под редакцией К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти, ИЛ, М., 1956.]
20. Nicholas Rashevsky, Mathematical Biophysics, University of Chicago Press, 1948.
21. Henry Quastler, Feedback Mechanisms in Cellular Biology, Transactions of Ninth American Conference on Cybernetics, Josiah Macy Jr. Foundation, New York, 1953.
22. Stafford Beer, The Impact of Cybernetics on the Concept of Industrial Organization, Proceedings of the First International Conference on Cybernetics, Namur, 1956.
23. Robert R. Bush and Frederick Mosteller, Stochastic Models for Learning, John Wiley, New York, 1955. [Русский перевод: Р. Буш и Ф. Мостеллер, Стохастические модели обучаемости, Физматгиз, М., 1962.]
24. W. Grey Walter, The Living Brain, Duckworth, London, 1953.
25. W. Ross Ashby, Design for a Brain, Chapman and Hall, London, 1954. [Русский перевод: Уильям Росс Эшби, Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения, ИЛ, М., 1962.]
26. A. M. Uttley, The Classification of Signals in the Nervous System, EEG Clin. Neurophysiol., vol. 6, pp. 479—494, 1954.
27. Frank H. George, Probabilistic Machines, Automation Progress, vol. 3, № 1, 1958.
28. Gordon Pask, Teaching Machines, Proceedings of the Second International Conference on Cybernetics, Namur, 1958.
29. W. Ross Ashby, Design for an Intelligence-Amplifier, Automata Studies, Princeton University Press, New Jersey, 1956.
30. Stafford Beer, Control Systems, An Introduction to Operational Research, English Universities Press, London, 1957.
31. Stafford Beer, A Technical Consideration of the Cybernetic Analogue for Planning and Programming, Process Control and Automation, vol. 3, № 8 and 9, 1956.

32. R. J. Goldacre and I. J. Lorch, Folding and Unfolding of Protein Molecules in Relation to Cytoplasmic Streaming, Ameboid Movement and Osmotic Work, *Nature*, vol. 166, p. 497, 1950.
33. Gordon Pask, Physical Analogues to the Growth of a Concept, Proceedings of Symposium on the Mechanization of Thought Processes, N. M. S. O., London, 1958.
34. A. Porter, Introduction to Servo-Mechanisms, Methuen, London, 1950.
35. Ludwig von Bertalanffy, The Theory of Open Systems in Physics and Biology, *Science*, vol. 111, 1950.
36. Herbert A. Simon, Models of Man, John Wiley, New York, 1957.
37. G. Spencer Brown, Probability and Scientific Inference, Longmans, Green, London, 1957.
38. M. G. Kendall, The Advanced Theory of Statistics, Charles Griffin, London, 1943.
39. Stafford Beer, The Mechanical Simulation of Stochastic Flow, Proceedings of the First International Conference on Operational Research, English Universities Press, London, 1957.
40. William H. Whyte, The Organization Man, Jonathan Cape, London, 1956.



# Стаффорд Бир

(1926–2002)

Родился в 1926 г. в Лондоне. Обучался философии в колледже, служил в армии, где впервые познакомился с исследованием операций. В 1949 г. поступил на работу в крупнейшую металлургическую компанию «Юнайтед Стил», где возглавил отдел исследования операций и кибернетики. В 1961 г. начал свой бизнес консультанта в области исследования операций, а в 1966 г. перешел в компанию IPC, где был инициатором использования новых компьютерных технологий. С 1970 г. работал независимым консультантом. В 1971 г. был приглашен правительством Чили для создания единой компьютеризированной системы управления экономикой в режиме реального времени «Киберсин». Позже консультировал правительства Мексики, Уругвая и Венесуэлы.

Стаффорд Бир — крупнейший теоретик и практик в области исследования операций и социальных систем, основоположник так называемой «организационной кибернетики». Имел звание профессора, читал лекции во многих университетах, был президентом Мировой организации систем и кибернетики, обладателем наград от Шведской королевской академии в области инженерных наук, Системного общества Великобритании, Американского общества кибернетики и Общества исследования операций Америки.

3673 ID 34866



9 785484 004348 >

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА



E-mail: [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru)

Каталог изданий в Интернете:

интернет-магазин

**OZON.RU**



16164027

Любые отзывы о настоящем издании, а также о других изданиях,  
по адресу [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru). Ваши замечания  
и отражены на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине <http://URSS.ru>