

П. Растринин

ЭТОТ СЛУЧАЙНЫЙ, СЛУЧАЙНЫЙ, СЛУЧАЙНЫЙ МИР

Дружка

Д. Растринин

ЭТОТ
СЛУЧАЙНЫЙ,
СЛУЧАЙНЫЙ,
СЛУЧАЙНЫЙ
МИР



Л. РАСТРИГИН

**ЭТОТ
СЛУЧАЙНЫЙ,
СЛУЧАЙНЫЙ,
СЛУЧАЙНЫЙ
МИР**

**Издательство
ЦК ВЛКСМ
„Молодая гвардия“**

1969

Попробуйте вспомнить, как часто случай вторгается в вашу жизнь. Если внимательно приглядеться, то нетрудно заметить, что случай буквально осаждает нас со всех сторон.

Мы живем в самом случайном мире, который может придумать самое буйное воображение.

Случай многолик и разнообразен. Один омрачает наше существование, путает наши планы, мешает осуществлению самых заветных желаний. Другой безразличен. А третий окрашивает нашу жизнь в радужные тона и приносит неожиданное счастье и удачу (Эврика!).

Но стоит ли говорить о случайности и много ли о ней можно сказать? Ведь случай случаен, и не более!

Сказать о нем, оказывается, можно многое. Еще больше можно задать вопросов.

Почему получается хаос? Зачем нужно управление? Как поступать в случайной обстановке? Каким образом можно смягчить неприятности, связанные со случайными помехами в нашей жизни? Что такое метод Монте-Карло? Зачем нужно обучение? Какова роль случая в эволюции и прогрессе? Почему наш трижды случайный мир неплохо устроен и как его сделать еще лучше?

На эти и многие другие вопросы отвечает эта книга.

ЧТО ТАКОЕ СЛУЧАЙ? **(Вместо предисловия)**

Прежде чем начать путешествие по миру случая, автор решил выяснить, как определяют случайность авторитетные книги.

Для начала я обратился к философскому словарю. На странице 323 этого словаря, изданного в 1968 году, четко и определенно написано: «СЛУЧАЙНОСТЬ — см. необходимость и случайность». Сразу же тем самым в душу были заронены первые крохи сомнения. Далее было не легче — в рекомендуемой статье словарь категорически отождествляет случайность и несущественность. «Случайность имеет свое основание не в сущности явления...»

После столь недвусмысленного замечания в философском словаре писать книгу о случайности просто неудобно — ведь научно-популярные книги следует писать лишь по существенному (а не случайному) поводу. Сказать прямо, после подобных размышлений у автора опустились руки. Стоит ли писать книгу о случайности?

Обращение к авторитету К. А. Тимирязева, который имел вполне определенный и (увы!) распространенный взгляд на случайность, тоже не принесло радости. Он сказал: «...что такое случай? Пустое слово, которым прикрывается невежество, уловка ленивого ума. Разве случай существует в природе? Разве он возможен? Разве возможно действие без причины?» («Краткий очерк теории Дарвина»). Правда, К. А. Тимирязева может извинить то, что жил он

в то время, когда ряда наук еще и в помине не было, а некоторые лишь зарождались.

После такого обращения со случайностью не написать книгу о случайности было нельзя, хотя бы для ее реабилитации. Ведь эдак можно теорию вероятностей зачислить в псевдонауку, а математическую статистику почитать «уловкой ленивого ума».

Во всех приведенных цитатах случайность рассматривается как нечто неприличное, стыдное, о чем не говорят в благовоспитанном обществе. Сквозь эти цитаты четко проглядывает следующая «педагогическая» мысль: «Случай — бяка! Не бери его в ручки, брось, запачкаешься! Возьми лучше поиграйся вот этим — необходимостью. Видишь, какая она чистенькая и понятненькая. Вот так и действуй!» И дитя, воспитанное подобным образом, немедленно убеждается, что случай действительно «не того», а необходимость — это то, что нужно. Если шел и дошел, то это строго необходимо, а если поскользнулся и расквасил нос, то это случайно.

Подобный взгляд на случайность страдает односторонностью и освещает лишь одну ее сторону — сторону неприятную и досадную. К сожалению, на тернистом пути развития человечества случай оборачивался чаще именно этой стороной (позже мы объясним, почему это так). Отсюда и пессимистический взгляд на случайность. Он выработался в результате многократного расквашивания носов на всей многострадальной истории человечества.

Какова роль случая в нашей жизни? Кто задумывался над этим вопросом, тот наверняка заметил, насколько мы зависим от случая. Случайности осаждают нас со всех сторон.

Случайность в науке и технике обычно рассматривалась как враг, как досадная помеха, препятствующая точному исследованию. Случайность мешает предвидеть даже ближайшее будущее, не говоря о том, что она делает невозможными более дальние прогнозы (вспомним хотя бы печальную славу бюро прогнозов погоды). Случайные помехи не только затрудняют, но часто и вовсе прерывают связь между далеко расположенными пунктами. Случай

приносит много неприятностей нам и в обыденной жизни.

Уже давно люди вступили в борьбу со случайностью. Эта борьба шла и идет по двум направлениям.

Первое характеризуется попытками выявить причины случайного события и тем самым изгнать случайность вообще. Например, до сих пор считалось, что пол новорожденного определяется случаем. А генетики совсем недавно выявили причины, от которых зависит пол ребенка. Таким образом, ученые вырвали новую тайну у природы и тем самым уничтожили случайность, которая здесь являлась лишь прикрытием нашего незнания.

Подобные ситуации складываются в жизни и в науке очень часто. Именно это заставило К. А. Тимирязева произнести свои гневные слова. Он, правда, отождествил случайность и беспричинность. А это далеко не одно и то же.

В самом деле, всякое событие имеет вполне определенную причину, то есть является следствием этой причины. Такую причину имеет и всякое случайное событие. В свою очередь, причина сама по себе является следствием какой-то иной причины и т. д. Хорошо, когда цепь причин и следствий проста, очевидна и легко просматривается. В этом разе событие нельзя считать случайным. Например, на вопрос: упадет брошенная монета на пол или на потолок, можно ответить определенно, и никакой случайности здесь быть не может, здесь все очевидно. Если же цепь причин и следствий сложна и не поддается обозрению, то событие становится непредсказуемым и называется случайным.

Так ответ на вопрос: ляжет ли подбрасываемая монета вверх цифрой или гербом, можно точно описать цепью причин и следствий. Но тогда придется ввести в рассмотрение такие факторы, как пульс бросающего, его эмоциональное настроение и т. д. Такую цепь проследить практически невозможно, так как неизвестно, как измерять, например, настроение человека, подбрасывающего монету. И выходит, что хотя причина и есть, но предсказать результат мы по-прежнему не можем и он в данном случае так

и остался невыявленным. Здесь сложная цепь причин и следствий приводит к тому, что событие становится непредсказуемым, то есть случайным.

Но что такое «непредсказуемое» событие? Неужели о нем ничего нельзя сказать? Неужели, 'столкнувшись со случайностью, нужно опускать руки?

Нет! Люди давно уже заметили, что случай имеет свои свойства и о «непредсказуемом» событии можно многое сказать. Так, в опыте с подбрасыванием монеты можно утверждать, что примерно в половине случаев она ляжет вверх гербом, а в половине — вверх цифрой. Следовательно, случайность можно и нужно исследовать. Именно поэтому еще в XVII веке были заложены основы теории вероятностей — науки о случайных событиях.

Это и является вторым направлением в борьбе со случайностью. Оно имеет своей целью изучение закономерности в случайных событиях. При исследовании этих закономерностей случайное событие не перестает быть случайным, однако становится ясной внутренней структурой случайности. Знание ее дает возможность вести эффективную борьбу с непредсказуемостью случайных событий.

Указанные исследования направлены на уменьшение роли случайности в науке, технике и общественной жизни. Разработаны многочисленные методы, позволяющие исключать случайность или, во всяком случае, снижать ее разрушительные последствия. Одной из интереснейших и важнейших проблем такого рода является проблема выделения полезного сигнала из смеси случайных помех и необходимого нам полезного сигнала (в обыденной жизни мы на каждом шагу неплохо решаем массу подобных задач, хотя и не задумываемся о том, как это делаем). В книге мы рассмотрим наиболее интересные и полезные методы снижения роли случая.

До сих пор говорилось о досадной случайности, которая вносит в нашу жизнь неопределенность, неуверенность и тревогу. Но давно замечено, что, кроме досадного, есть еще случай счастливый, полезный, желанный.

Если раньше люди ограничивались лишь констатацией полезных случаев и удивлением по этому по-

воду, то сейчас все чаще и чаще встречаются попытки использовать случайность, заставить ее служить человеку. Впервые, по-видимому, поняли пользу случайности и применили ее селекционеры при искусственном выведении новых растений, новых пород скота, птиц и рыб.

В последнее время случайностью стали интересоваться инженеры, сумевшие создать ряд удивительных машин, необыкновенные свойства которых получены за счет введения в их конструкцию элемента случайности.

Поняли и оценили важную и полезную роль случайности экономисты и военные, которым приходится решать задачи о выборе наилучшего поведения в конфликтной обстановке. Они убедились, что очень часто наилучшим поведением бывает случайное.

В этой книге мы рассмотрим наиболее важные способы использования случая.

Случайность не пассивна, она активно вмешивается в жизнь, путая планы и создавая возможности. Трудно переоценить влияние случайности на природу, на нашу жизнь. Достаточно сказать, что происхождение жизни является случайным процессом. Случай в природе неизбежен и закономерен. Он бывает слепым, а бывает и удивительно «прозорливым»; рушит так же неизбежно, как и созидает; вызывает сожаление столь же часто, как и восторг; препятствует и одновременно помогает.

Такая двойственность случайности делает ее необыкновенно опасным и соблазнительным партнером в борьбе, которую ведет человек против слепых и грозных сил природы.

Эта книга посвящена случаю в обоих его лицах: случаю-помехе и случаю-помощнику; случаю-разрушителю и случаю-созидателю; случаю-врагу и случаю-другу.

СЛУЧАЙ — ЭТО...

В предисловии был задан вопрос «Что такое случай?», на который автор толком так и не ответил. Этому были две причины.

Во-первых, таков стиль научно-популярного изложения, от которого автор не собирается отказываться. Этот стиль требует задать с виду элементарный вопрос, напустить побольше туману и показать, что-де все не так просто, а совсем наоборот, то есть очень сложно и не элементарно. После этого полагается солидно и с большим числом занятых, но доступных примеров открыть глаза изумленному читателю на его неосведомленность в этом вопросе и изложить современное состояние науки в выбранной области.

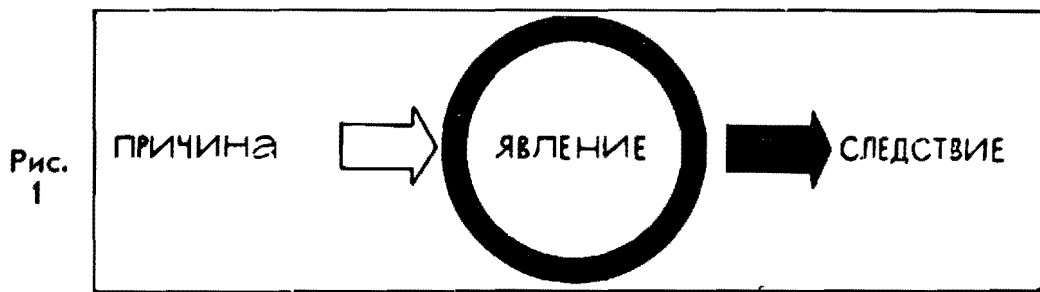
Другая причина была куда более важная. Дело в том, что у исследователей и ученых пока нет единого мнения о том, что называть случайностью. И поэтому автор, отвечая на поставленный вопрос, рискует вызвать в свой адрес нелестные замечания коллег. В этой истории он занимает самую неудобную позицию — ему нужно высказать свое мнение. И поэтому, собрав все свое мужество, попробуем все же ответить на вопрос: что такое случайность?

Так вот, случайность — это прежде всего... *непредсказуемость, которая является результатом нашего невежества*, результатом нашего незнания, нашей слабостью осведомленности, результатом отсутствия необходимой информации.

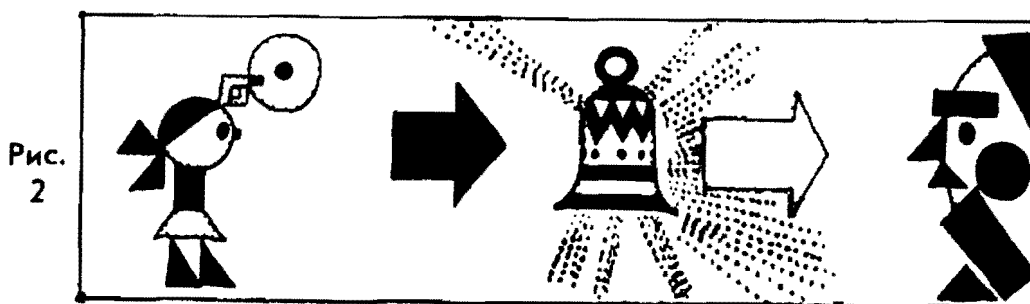
Такой случай является, по сути дела, мерой невежества! Чем меньше сведений мы имеем о предмете, тем случайнее его поведение; и наоборот, чем больше мы знаем о предмете, тем менее случайно он ведет себя и тем более определенно мы можем высказаться о его дальнейшем поведении.

С этой точки зрения К. А. Тимирязев совершенно прав. Ссылка на случайность какого-либо факта или процесса (в таком понимании) является подтверждением неосведомленности, некомпетентности исследователя в этом деле.

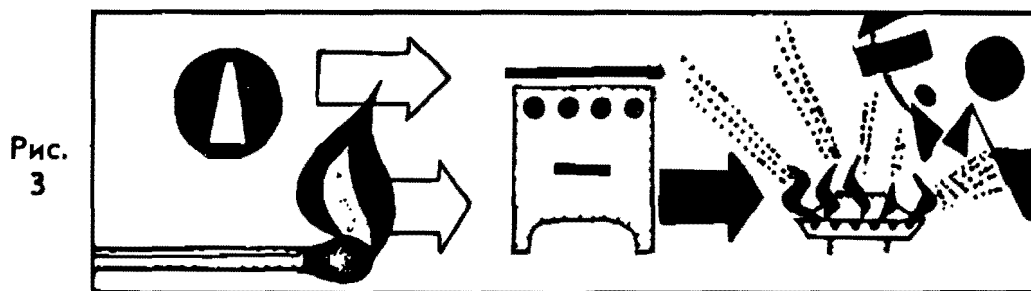
Построим модель такого случая. Будем причинно-следственную связь явлений выражать графически в виде круга и двух стрелок (рис. 1). Пусть стрелка, входящая слева в круг, символизирует причину явления, тогда стрелка, выходящая из круга справа, будет условным выражением следствия.



Нам приходится на каждом шагу встречаться с подобными преобразователями. Нажимая кнопку на двери, мы создаем причину, которая вызывает следствие — звон колокольчика в квартире (рис. 2).



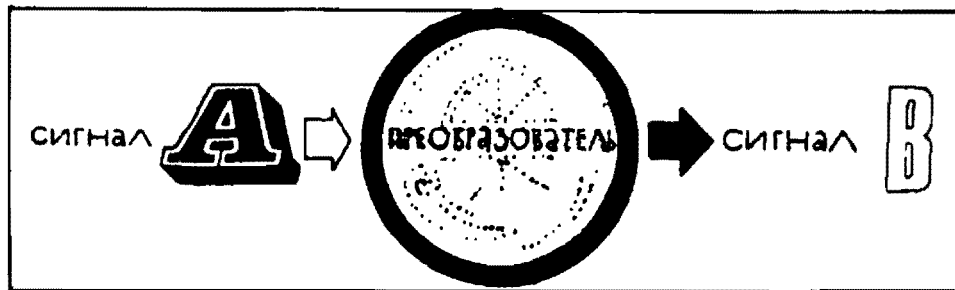
Чтобы зажечь горелку газовой плиты, нужно возбудить две причины: поворотом краника пустить газ и поднести к горелке зажженную спичку. Эти две причины вызовут следствие — работу горелки (рис. 3).



Такое представление причинно-следственных связей очень удобно и широко распространено в кибернетике (рис. 4). Здесь сигнал A является причиной возникновения сигнала B . Связь между сигналами A и B осуществляется преобразователем, который выдает на выход сигнал B , как только на входе появится сигнал A , то есть

$$A \rightarrow B.$$

Рис.
4



Вернемся к примеру со звонком. Можно ли быть твердо уверенным, что при нажатии кнопки всегда зазвонит звонок? Конечно, нет! Прежде чем утверждать, что вас услышат, нужно знать, есть ли напряжение в сети звонка.

Значит, чтобы зазвонил звонок, необходимы два условия: наличие напряжения в сети и нажатие кнопки. Только в этом случае звон колокольчика будет строго предопределен.

Но, подходя к двери, мы не знаем, есть ли напряжение в цепи звонка. Именно поэтому для нас звон колокольчика или его отсутствие является случайным событием. Эта случайность есть следствие нашей неосведомленности. Если бы предварительно мы спросили по телефону, работает ли звонок, то есть получили бы необходимую информацию, то для нас события «нажатие кнопки» и «звон звонка» уже были бы связаны строго необходимой связью и никакой случайности здесь бы не было.

Таким образом, случайность в данном примере возникла за счет того, что из двух необходимых причин звона колокольчика A_1 и A_2 (нажатия кнопки и наличия напряжения в цепи) обычно наблюдается только одна (нажатие кнопки), а неопределенность второй причины и вызывает случайный характер по-

Рис.
5

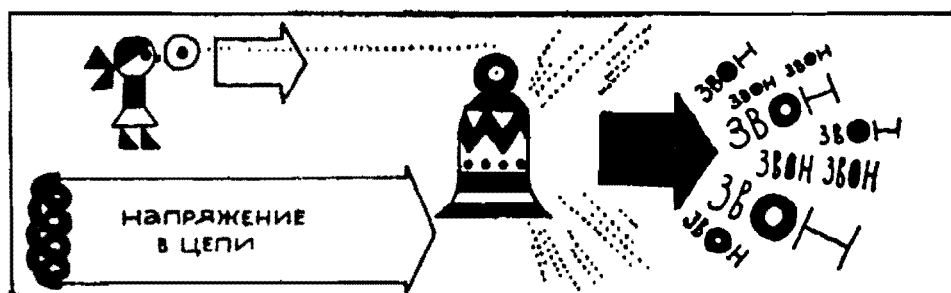
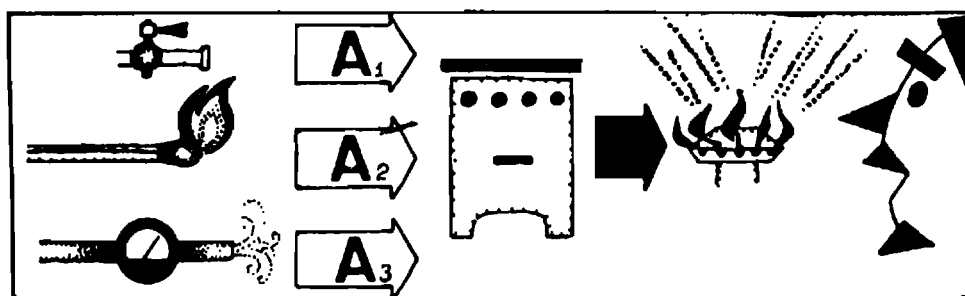


Рис.
6



ведения колокольчика (рис. 5). (Здесь молчаливо предполагается, что звонок исправен, иначе был бы еще один источник случайности.)

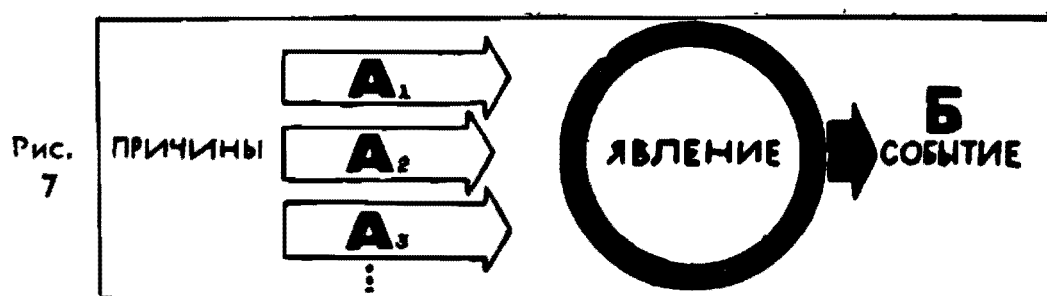
Аналогичная картина наблюдается при зажигании горелки газовой плиты (рис. 6). Кроме двух известных причин A_1 и A_2 (поворот краника и горение спички), необходимо знать состояние третьей причины — A_3 — наличия газа в сети (или баллоне). Если прежде чем зажечь газ, мы позвоним в управление газовой сетью и убедимся в ее исправности (или измерим давление в баллоне), то загорание горелки не будет случайным событием. Если же мы пренебрежем этой информацией, то должны смириться с тем, что горелка не всегда зажжется, и это событие станет случайным, то есть предсказуемым не на все 100 процентов.

Случайность, следовательно, по сути дела, зависит от уровня нашего незнания. Чем более невежествен человек, тем более для него случаен окружающий мир. И наоборот, ученому мир представляется не столь удручающе случайным.

Как видно, случайность — понятие субъективное, зависящее от запаса информации субъекта. Если бы бог существовал и если бы он был действительно «всеведущим», то наш мир для него, по-видимому, не был бы случайным. Но, к сожалению, «вездесущими» способностями легенда наделила только бога. Даже его ближайшие архангелы при всей своей внеземной святости были обделены столь сильной способностью к получению необходимой информации. О грешных людях и говорить не приходится. Где им тягаться со сверхтелепатическими возможностями всевышнего! По пяти узким каналам сбора информации (зрение, слух, обоняние, осязание и вкус) человек получает скудную информацию об окружающем

мире, и только за изворотливость ума его называли «царем природы». Эта изворотливость и позволяет человеку объяснить механизм случайности примерно следующим образом.

Всякое событие (*Б*) является следствием малого или большого ряда причин. (См. стрелки A_1, A_2, A_3, \dots на рис. 7, где точками символически обозначены другие стрелки — причины A_4, A_5, A_6, \dots которых может быть сколь угодно много.) Чтобы предсказать интересующее его событие, человеку необходимо точно узнать все причины, вызывающие появление этого события.



В первом случае, когда этих причин не много и все их можно наблюдать, событие считается не случайным (его часто называют регулярным или детерминированным). Например, бросая камень, можно точно предсказать, что он упадет на Землю, а не на Луну. Здесь знание закона тяготения несет исчерпывающую информацию о событии — месте падения камня.

Если же ряд причин слишком велик (например, если событие *Б* вызывается миллионом причин) и ввиду этого попросту не может быть охвачен одновременно, то интересующее нас событие уже нельзя предсказать точно, оно станет случайным, непредсказуемым. Здесь случайность образуется за счет недостаточного знания, за счет некомпетентности, за счет слабой осведомленности.

Означает ли это, что в одно прекрасное время, когда мы станем уж очень умными, случайность исчезнет с нашей планеты?

Вовсе нет! Этому будут препятствовать по крайней мере три обстоятельства, которые надежно защищают случайность.

Прежде всего надо упомянуть *бесконечную сложность мира*.

Нам никогда не удастся исчерпать все многообразие мира и полностью познать его. Расчет на подобное божественное «всеведение» — более чем вера в бога. Это претензия на то, чтобы самому стать богом — вездесущим и всезнающим.

Проще говоря, существует известный запрет на исчерпание окружающего нас мира: сколько бы мы его ни исследовали, всегда останется «недочерпанное», ибо мир неисчерпаем. Афоризм Козьмы Пруtkова «Нельзя объять необъятное» как нельзя лучше передает суть этого запрета.

По-видимому, никогда не удастся определить, какой стороной ляжет на пол подбрасываемая монета, поскольку ее судьба определяется по крайней мере четырьмя факторами: человеком, который ее подбрасывает; средой, в которой монета летит; поверхностью, на которую она упадет, и особенностями самой монеты. Каждый из этих факторов играет существенную роль и, в свою очередь, определяется огромным числом причин. Причем количество этих причин практически бесконечно и, вероятно, не сможет быть охвачено одновременно при определении результата хотя бы одного эксперимента с монетой.

Далее, надежная защита случайности и непредсказуемости нашего мира гарантируется *ограниченной точностью измерений*.

Известно, что точность предсказания какого-либо события часто зависит от точности измерения его причин (возмущающих факторов).

А точность всякого измерения ограничена. С развитием науки и техники эта точность возрастает, но всегда остается (и будет оставаться) конечной, то есть никакие измерения нигде и никогда не станут абсолютно точными (хотя бы в силу атомного строения вещества). Это ограничивает возможности предсказания и приводит к появлению неопределенности, случайности.

Например, для определения точки попадания баллистической ракеты необходимо знать с огромной точностью состояние всех факторов, влияющих на ее траекторию. Это прежде всего состояние слоев атмо-

сферы, через которую проходит ракета. Однако точное измерение движения масс воздуха в атмосфере, да еще в районе цели, представляет всегда огромные трудности и практически невозможно. Приходится ограничиваться приближенными оценками указанных факторов, что и определяет случайный, точно непредсказуемый характер попадания ракеты в цель.

И выходит, что невозможность наверняка поразить цель вызвана отсутствием точной информации, которая в данном случае связана прежде всего с приближенностью измерений.

И последнее. Случайность является результатом не только нашего незнания, бесконечной сложности мира и ограниченной точности измерения причин, но и знаменитого *соотношения неопределенностей*.

Дело вот в чем. Все события, исход которых определяется взаимодействием отдельных атомов, случайны по своей природе. Это положение опирается на уже названный принцип (соотношение) неопределенности, который впервые сформулировал известный немецкий физик В. Гейзенберг. Смысл этого принципа сводится к следующему.

Как известно, для определения любого будущего состояния какой-либо частицы в пространстве достаточно точно узнать ее исходное положение и скорость. Принцип неопределенности заключается в том, что он как бы накладывает ограничение на эту точность, если объектом исследования является микрочастица. А именно: точность определения одного из указанных параметров микрочастицы (например, положения) зависит от точности определения другого параметра — скорости, вернее — импульса. Это означает, что чем точнее будет определен один параметр, тем больше неточность в определении другого параметра; оба же параметра с необходимой высокой точностью одновременно определить нельзя. В этом состоит природа микромира. И никакое развитие техники измерения не позволит увеличить эту точность, так же как никакое развитие науки никогда не позволит нам активно вмешиваться в прошлое. (Заметим, что интерпретировать прошлое можно и мы часто пользуемся этим, однако изменить его нам не удастся.)

Действие принципа неопределенности хорошо иллюстрирует следующий простой опыт. Возьмем обычную телевизионную трубку — кинескоп. Внутри этой трубки имеется источник электронов — так называемая электронная пушка. Говоря проще, это обычная раскаленная спираль, какую мы видим в электролампочке, горящей вполнакала. Эта спираль и является источником электронов. Их можно ускорить в электрическом поле, а затем, пропуская через два следующих друг за другом маленьких отверстия в стволе пушки, получить тот самый пучок электронов, которым она «стреляет». Электроны, вылетающие из ствола «пушки», двигаются узким пучком в направлении к экрану, покрытому специальным слоем, чувствительным к ударам электронов.

Попадая на экран, разогнанный электрон дает видимую глазом вспышку-точку, а пучок электронов — светящееся пятно. Управляя движением электронного пучка (это легко осуществляется электрическим или магнитным полем), можно изменять положение пятна на экране, что и лежит в основе телевидения.

Однако сейчас нас интересует не это. Зададимся целью сделать пятно на экране кинескопа как можно меньше. Для этого следует утоньшать электронный пучок, вылетающий из жерла электронной пушки. Как добиться такого? Кажется, нет ничего проще: достаточно уменьшать жерло пушки. Представим, что нам удалось создать пушку с изменяющимся отверстием от большого до самого малого — диаметром в электрон (меньше делать не надо, так как электрон попросту «застрянет» в стволе). Вероятно, это будет нечто вроде диафрагмы фотоаппарата. «Диафрагмируя» электронную пушку, мы сможем воздействовать на толщину электронного пучка.

Теперь начнем эксперимент. Уменьшая диафрагму, первое время мы действительно будем уменьшать размер пятна на экране трубки. Но затем оно перестанет уменьшаться, и вокруг него образуются слабо светящиеся кольца, которые по мере дальнейшего уменьшения диафрагмы станут расширяться. А при самом маленьком диаметре жерла пушки, равном диаметру электрона, пятно исчезнет вовсе и по всему экрану

равномерно будут вспыхивать то там, то здесь точки, фиксирующие положения отдельных электронов.

Как объяснить такое поведение частиц-электронов? Ведь на первый взгляд кажется, что при самом узком отверстии пучок должен стать самым тонким и все электроны должны были бить в одну и ту же точку экрана, и, следовательно, световое пятно должно быть равным диаметру электрона. В эксперименте же ничего подобного не наблюдалось. В чем дело?

А дело в том, что предполагаемый результат эксперимента противоречит изложенному выше принципу неопределенности. Действительно, по мере сужения отверстия ошибка в определении положения пролетающих электронов становилась все меньше и меньше (эта ошибка равна разности диаметров отверстия и электрона, и она по мере уменьшения диаметра отверстия стремится к нулю). При совпадении этих диаметров положение электрона определяется точно: в момент пролета отверстия он находится внутри отверстия, и его координаты в точности совпадают с положением центра отверстия. В соответствии с принципом неопределенности такая точность в определении положения должна лечь тяжелым грузом на возможность определения дальнейшей судьбы электрона, то есть на его последующее движение (скорость). Это и наблюдалось в эксперименте, когда электрон можно было встретить с равной вероятностью в любой точке экрана.

Следовательно, фиксируя положение электрона, мы никак не можем (не в состоянии и никогда не будем в состоянии) определить направление его дальнейшего движения, то есть его скорость, с точностью большей, чем позволяет это принцип неопределенности Гейзенберга.

Случайность здесь имеет принципиальный характер, и она не снимается никакими мерами по повышению точности измерения.

Таков наш мир, таковы его объективные закономерности! Надежда, что в будущем удастся избавиться от этой случайности, так же беспочвенна, как и упование на путешествие в прошлое. (Хотя фантасты давно разрабатывают эту сомнительную жилу, что скорее напоминает предприимчивое умение делать из

мухи слона и торговать слоновой костью, чем попытку научного предвидения.)

Микрооснова нашего мира случайна, и опирается она на соотношение неопределенностей.

Из этого следует весьма важный и поучительный вывод об уникальности каждого конкретного эксперимента, вывод о строгой неповторимости результатов, который идет вразрез с классической наукой.

Действительно, старая добропорядочная наука прошлого века утверждала, что совершенно необходимо, чтобы в одних и тех же условиях всегда получались бы одни и те же результаты. Именно этого и не получается! Если даже и удастся вполне точно вторично воспроизвести все условия эксперимента, то и в этом гипотетическом случае мы получим иной результат. Что же это? Крах науки? Нет! Это новый шаг в познании. Вероятностный характер нашего мира в принципе накладывает запрет на точное предсказание. Всякая экстраполяция (предсказание) будущего имеет всегда принципиально случайный характер. «Тем не менее, — по остроумному замечанию известного американского физика Р. Файнемана, — несмотря на это, наука жива».

Как же жить в таком мире, где ничего нельзя точно предвидеть? Оказывается, ничего страшного в этом нет.

Во-первых, предел точности, допускаемый принципом неопределенности, очень мал (порядка размеров атомного ядра). И сказывается этот принцип лишь в измерениях на атомном уровне. А во-вторых, от наличия непредсказуемости наш мир не становится менее уютным.

В самом деле, эту непредсказуемость можно рассматривать как помеху, мешающую точным измерениям. Но современная наука выработала мощные средства борьбы с погрешностями в измерении (о них мы будем говорить позже) и позволяет снимать (точнее, делать безболезненными) неприятности, связанные с непредсказуемостью.

Но вернемся к макромиру.

В микромире мы, грубо говоря, никогда не сможем точно предсказать будущее положение микрочастицы. Но всякое макровзаимодействие, то есть

взаимодействие крупных тел, складывается из большого числа микровзаимодействий, результат которых в соответствии с принципом неопределенности точно предсказать нельзя. Следовательно, будущее поведение тел мы можем определить не точно, а лишь приближенно, с некоторой неабсолютной достоверностью.

Проиллюстрируем сказанное на простом примере. Рассмотрим опыт с обычной игровой рулеткой, которая представляет собой мелкую тарелку с сотней лунок на дне. В эту тарелку с определенной скоростью выпускается маленький легкий шарик, который, многократно ударяясь о края тарелки, постепенно теряет свою скорость и попадает в одну из лунок, определяя тем самым выигрыш. Пусть шарик и рулетка выполнены идеально гладко, гладко даже на атомном уровне (предположим на минутку, что это удалось сделать). Представим также, что шарик выпускается некоторым гипотетическим идеально-точным механизмом из одного и того же положения в строго определенном направлении со строго одинаковой скоростью. Означает ли это, что он в конечном счете будет попадать в одну и ту же лунку?

Нет, не означает! После каждого соприкосновения со стенкой рулетки шарик ввиду рассмотренного принципа неопределенности будет отскакивать в направлении, которое можно предугадать лишь вероятностным образом. Каждую же конкретную траекторию предугадать будет нельзя, ибо она определяется на атомном уровне (здесь имеются в виду атомы стенки и шарика в точке их соприкосновения). А так как скорость шарика по условию нам известна с достаточной точностью, то его конечное положение будет несколько неопределенно.

Очевидно, что с каждым отскоком неопределенность в положении шарика возрастает (она как бы складывается) и к моменту его остановки становится максимальной. Это обстоятельство и делает игровую рулетку принципиально случайной машиной, результат работы которой можно предугадывать лишь приближенно. И никакие новые, самые точные методы измерения не помогут нам предугадать поло-

жение шарика в момент остановки более точно, чем это допускает принцип неопределенности.

Заметим еще раз, что речь шла об *идеальной* рулетке, которая, несмотря на свою «идеальность», все же является случайной машиной. Реальная же рулетка имеет значительно большую непредсказуемость, вытекающую из естественной шероховатости и неоднородности поверхности реального шарика и корытца рулетки. Значит, неопределенность реальной рулетки складывается из неопределенности, вызванной принципом Гейзенберга, и неопределенностью, порожденной шероховатостью соприкасающихся поверхностей. При этом доля второй неопределенности значительно превышает первую, то есть реальная рулетка — это случайная машина, где основным источник случайности находится не на атомном уровне, а получен за счет неидеальности соприкасающихся поверхностей, за счет плохой обработки этих поверхностей. Однако и поведение «идеальной» рулетки также непредсказуемо.

Любопытно, что хозяин рулетки всегда заинтересован в ее максимальной непредсказуемости. В самом деле, если бы в рулетке наблюдалось предпочтение каких-либо лунок и шарик попадал бы в них чаще, чем в другие, то игроки, заметив это, начали бы делать ставки именно на эти лунки и разорили бы хозяина. И чтобы этого избежать, он стремится свою рулетку делать максимально случайной машиной с максимальной непредсказуемостью результата.

По упомянутым причинам окружающий нас мир является миром случайным, вероятностным. Его случайный характер образуется как за счет свойств самого мира, так и из-за ограниченных возможностей людей, для которых часто не очень важно, где именно сидит случайность — в существе ли явления или появляется в результате взаимодействия человека с окружающим его миром.

Резюмируя, можно сказать, что случайность нашего мира держится на следующих трех китах:

- 1) на принципе неопределенности;
- 2) на неисчерпаемости вселенной;
- 3) на ограниченности человеческих возможностей (на данный момент времени, разумеется).

Взаимодействие этих трех факторов и формирует неопределенность в нашем трижды случайном мире.

Как же действовать в такой обстановке?

Прежде всего следует расстаться с иллюзией, что от случайности можно избавиться насовсем. Для этого придется придумать новый мир, отличный от того, в котором мы живем.

Такой мир, например, придумал когда-то ученый Лаплас. Он говорил, что все явления в мире строго предопределены предыдущим его состоянием. Вот его слова, в которых формулируется эта точка зрения.

«Мы должны рассматривать настоящее состояние вселенной как следствие ее предыдущего состояния.

Ум, которому были известны для какого-либо данного момента времени все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составных частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения величайших тел вселенной наравне с движениями легчайших атомов; не осталось бы ничего, что было бы для него не достоверно: и будущее, так же как и прошедшее, предстало бы перед его взором».

Как видно, мир Лапласа не что иное, как фильм, записанный на бесконечной ленте, который также бесконечно развертывается перед нами. Мы являемся участниками этого фильма и действуем в строгом соответствии со сценарием, написанным бог знает кем.

Несостоятельность подобного мира очевидна. Это не наш мир!

Кроме простой обидности — действительно, очень обидно быть марионеткой в чьих-либо руках, — лапласова вселенная вызывает более серьезные возражения. Мир Лапласа предопределен, а следовательно, фаталистичен. Будет так, как написано в сценарии, и все тут! Как ни бейся — ничего нового не добьешься. А то, что ты бьешься, — это тоже записано в сценарии!

Таков мир по Лапласу.

А как же быть с нашей трижды случайной вселенной? Как поступать в той или иной случайной ситуации, которую нельзя предвидеть? Можно ли

разумно действовать в случайной обстановке? Как «утилизировать» случайность?

На все эти вопросы попробуем ответить в следующих разделах книги, посвященных несчастному и счастливому случаям. В первом разделе рассмотрены меры борьбы со случайностью; во втором обсуждаются способы использования случая во благо человека.

I. СЛУЧАЙ — ПОМЕХА

Случай играет в мире столь большую роль, что обыкновенно я стараюсь отвести ему как можно меньше места в уверенности, что и без моей помощи он позаботится о себе.

А. Д ю м а

1. СЛУЧАЙ У КОЛЫБЕЛИ КИБЕРНЕТИКИ

Шел 1940 год. Фашистская Германия, развязавшая вторую мировую войну, имела господство в воздухе. Немецкие самолеты обладали высокой скоростью и без труда уходили от огня английских зенитных батарей. Дело в том, что скорость боевых самолетов того времени была уже сравнима со скоростью зенитного снаряда. Поэтому стало необходимо стрелять не прямо в цель, а в некоторую достаточно удаленную точку, в которой согласно расчетам должны встретиться самолет и снаряд. При малой скорости самолета эта точка легко определялась наводчиком интуитивно. Охотники хорошо знают это правило: надо стрелять в движущуюся дичь, на полкорпуса или на корпус упреждая ее движение (все зависит от скорости движения и расстояния до цели). Так же поступали и в зенитной артиллерии того времени.

С появлением скоростных истребителей и пикирующих бомбардировщиков нужно было упреждать цель на двадцать-тридцать корпусов. С подобной задачей наводчик уже справиться не мог. Более того, попадая в зону зенитного огня, самолеты стали выполнять так называемый противозенитный маневр, который сводил на нет эффект указанного упреждения. Сущность маневра следующая. Попадая в зону обстрела, летчик намеренно переходил на криволинейный полет. Это давало ему возможность уклониться от нежелательной встречи с уже выпущенными снарядами.

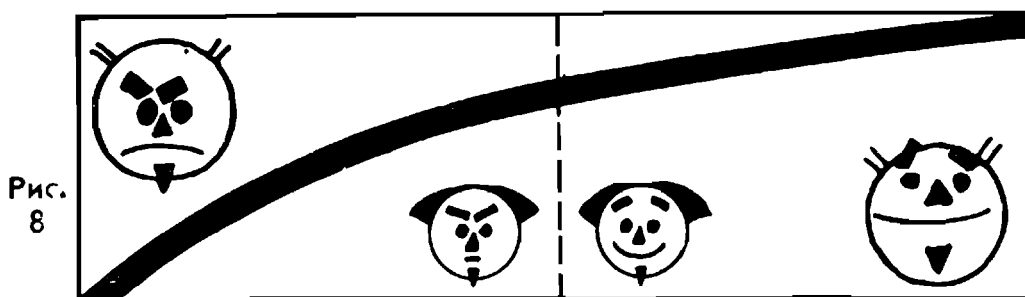
В результате немецкие самолеты почти безнаказанно бомбили города Великобритании, нанося им серьезный ущерб. Английское командование вынуждено было обратиться к ведущим ученым стран союзников с просьбой решить задачу о предсказании

положения самолета, выполняющего противозенитный маневр. Сложность этой задачи заключалась прежде всего в том, что самолетом управлял человек, действия которого следовало угадать заранее. Естественно, что летчик вел самолет так, чтобы зенитчик не смог предугадать будущее положение самолета, то есть старался добиться максимальной непредсказуемости поведения самолета. Зенитчик же, наоборот, старался угадать намерения летчика. И для него эволюции самолета были случайными, ибо он не мог предугадать, в какую сторону повернет летчик штурвал самолета. Значит ли это, что самолет всегда окажется неуязвимым и зенитную артиллерию следует упразднить?

Нет, не значит!

Дело в том, что намерения летчика и их осуществление не совпадают. Решив повернуть самолет, он поворачивает штурвал, самолет при этом поворачивается не сразу, а лишь через некоторое время. И выходит, что пилот не имеет возможности неограниченного маневра. Более того, поведение самолета отстает от желания пилота, то есть самолет движется так, как им управляли несколько мгновений назад. Это и дает возможность зенитчику, следя за эволюцией самолета, предугадывать его поведение в ближайшем будущем. Но как это сделать?

Задача сводится к предсказанию случайного поведения. То, что это возможно, легко убедиться на следующем простом опыте. На рисунке 8 в виде кривой изображено поведение какого-то аппарата или существа. Закройте бумагой правую часть рисунка и попросите знакомых, пусть они продолжат эту кривую за пунктирный барьер, глядя лишь на левую ветвь. Для них правая ветвь кривой неизвестна и по-



этому случаю. Однако, несмотря на это, большинство довольно точно угадают поведение кривой.

В чем дело?

Оказывается, в наблюдаемой левой ветви кривой содержится информация о поведении правой ветви, и поэтому наблюдатель без труда предсказывает ее поведение.

Если вы спросите у него, почему он именно так продолжил кривую, а не иначе — толкового ответа не дождетесь, в лучшем случае прозвучит: «Ну просто так мне кажется наиболее правильным».

Значит, человек эту задачу решить может (неизвестно как, но может). А что, если попытаться создать автомат, который делал бы все это не хуже человека, но быстрее его? И если заставить этот автомат управлять огнем зенитного орудия, то получится великолепная система для эффективного поражения самолета, выполняющего самые хитрые противозенитные маневры.

Но прежде чем сделать автомат, нужно уметь решать поставленную задачу математическим образом. Эта труднейшая задача называется задачей об экстраполяции (продолжении) случайных траекторий.

И именно за нее взялся американский математик Норберт Винер — создатель кибернетики. Он блестяще решил ее, и вскоре все зенитные батареи союзников были оснащены новыми приборами для автоматического определения точки, в которую должен быть направлен ствол зенитки в момент выстрела.

Так был сделан первый шаг еще не сформировавшейся в то время науки — кибернетики. Здесь кибернетика выступила против случайности, преодолела ее и показала, что далеко не все случайные события так уж непроходимо случайны. Многие из них можно предугадать и тем самым лишить покрова таинственной непредсказуемости. Для этого нужно только внимательней присмотреться к процессу и попытаться его экстраполировать.

Самое интересное здесь в том, что совершенно не играет роли физическая сущность объекта. Этим способом можно предугадать (конечно, приближенно) не только траекторию управляемого полета, но и поведение животных; предугадывать будущий спрос на

определенного вида продукцию; величину паводка на реке и другие самые разнообразные «случайные» процессы.

Удается это сделать за счет того, что окружающий нас мир не столь случаен, как представляется с первого взгляда. За дымкой случайности при внимательном рассмотрении часто можно увидеть отчетливые контуры закономерностей, что и позволяет преодолевать случайность и делать довольно точные прогнозы.

Здесь случай имеет негативную роль, он препятствует познанию, создает трудности, мешает жить человечеству и в конечном счете препятствует прогрессу. Можно смело утверждать, что борьба за прогресс в значительной мере заключается в борьбе со случайностью.

Случай редко помогает, чаще он выступает в роли разрушителя. Но и здесь ему препятствует мощный фактор прогресса — управление. К нему мы и перейдем.

2. УПРАВЛЕНИЕ

Библейская легенда на кибернетический лад

В соответствии с известной библейской легендой бог Саваоф и его ангелы, создав вселенную в течение шести дней, лишь сутки наслаждались ее блеском, новизной и гармонией. На другой день мир уже имел однодневную историю, в течение которой кое-что поломалось, кое-где сошел глянец, а кое-кто успел поссориться со своими соседями и нарушил первоначанную гармонию. Однодневный мир уже не был образцом порядка и добродетели и, как повествует та же легенда, с каждым днем становился все хуже и хуже. Говорят, что здесь не обошлось без вмешательства сатаны. Но сатана не работал по мелочам, он предпочитал глобальные операции. Например, опорочить человечество в целом или выдумать огнедышащие вулканы.

Нет, мир стал хуже в основном не по вине сатаны, хотя тот и немало постарался. Глянец с мира сошел потому, что всевышний перестал прикладывать к нему руки, перестал управлять. Оттого

и пошла по земле всякая мерзость и неблагоустройство. А когда он спохватился, было уже поздно: процесс распада зашел слишком далеко и поправлять что-либо было бессмысленно, так как исправлять нужно было все! Поэтому по божьей воле и был произведен всемирный потоп, назначение которого заключалось в уничтожении всех земных безобразий. А чтоб жизнь на Земле не прекратилась, кто-то подсказал всевышнему идею ковчега, куда божьим ставленником и капитаном Ноем были собраны лучшие экземпляры земной фауны и флоры, включая и самого Ноя с сыновьями. Они-то по идее и должны были дать начало новому, благоустроенному миру.

Но не оправдались и эти надежды. Ной спился, а сыновья его перессорились. Мир явно нуждался в постоянном вмешательстве, а господь наш был лентяем и лежебокой. Лишь иногда, осатанев от безделья, он принимался за благоустройство. Но, будучи натурой импульсивной, он не мог систематически улучшать (корректировать) условия жизни на Земле. И продолжали расцветать мерзость и безобразие.

Будучи мужчиной неглупым, Саваоф, наконец, понял, что миром нужно управлять систематически. А чтобы управлять хорошо и надежно, следует оперативно собирать информацию о состоянии управляемого объекта. Сидя на небесах, эффективно управлять нельзя (сейчас это понимает каждый чертенок, но тогда это было большим откровением). Поэтому послал Саваоф на Землю своего сына Христа с заданием: наладить надежную систему сбора информации о положении дел на Земле. Но Христос не выполнил возложенной на него миссии. По молодости лет он увлекся различными эффективными жульничествами (чудесами): ходил по морю, накормил семью батонами народец и исцелил кого-то. Это еще можно было стерпеть. Но после того как он собрал вокруг себя шайку бездельников-апостолов и начал создавать культ своей личности, терпение всевышнего лопнуло и Христос был распят.

С тех пор господь махнул рукой на земные дела. Втайне он надеялся, что сатана воспользуется этим и отомстит неразумным людям за нежелание жить по божьим законам.

На первых порах сатане многое удалось. Это он, опираясь на божий авторитет и при прямом божьем попустительстве, зажег костры инквизиции в темные времена средневековья. Сатанинская идея была коварна и проста: сжигать все новое, все прогрессивное, все, что в состоянии изменить существующий «божий» порядок. Если бог в эксперименте с потопом уничтожил все безобразие, оставив лучшее, то сатана (на то он и сатана) поступал строго наоборот: уничтожалось все лучшее, а мерзость цвела пышным цветом. При таком образе жизни она гарантировала себе стабильное процветание.

Однако человечество к тому времени настолько выросло, что взяло функции управления на себя и скинуло сатану с пьедестала. Теперь ему приходится работать только по мелочам.

В этой немудреной сказке, как и во всякой сказке, нашли отражение наивные представления людей того времени о поразивших их силах природы.

Не нужно быть очень наблюдательным, чтобы заметить две мощные тенденции в окружающем нас мире. Одна из них связана с разрушением, а другая — с созиданием. «Благодаря» первой тенденции наш мир сотрясают различные катастрофы, вызывающие массу неприятностей и неудобств. Рушатся мосты и дома, стареют и гибнут растения и живые существа и т. д. Эта «злая» тенденция, очевидно, в свое время и породила суеверное понятие дьявола (сатаны), олицетворяющего разрушительное начало нашего мира. В современной науке эта сторона явлений связана со вторым законом (началом) термодинамики, который по праву может быть назван законом хаоса.

хаос

Второе начало термодинамики впервые было сформулировано французом Сади Карно в 1829 году. Смысл этого закона заключается в следующем: каждая замкнутая система, то есть полностью изолированная и ничем не связанная с другими системами, стремится к своему *наиболее вероятному состоянию*. Таким наиболее вероятным состоянием

является полный хаос. Поэтому в соответствии со вторым началом все замкнутые системы со временем разрушаются, дезорганизуются, умирают. В технике этот процесс часто называют амортизацией. В биологии — старением. В химии — деструкцией. В социологии — разложением. В истории — распадом.

В качестве меры неупорядоченности (меры хаоса) системы обычно вводят понятие *энтропии*, которая показывает степень хаотичности системы, степень ее распада. Теперь второй закон термодинамики можно сформулировать следующим образом: *энтропия замкнутой системы не уменьшается*, то есть замкнутая система сама по себе не может упорядочиться.

Заметим, что второе начало — это экспериментально установленный закон. Но еще не было ни одного случая, когда бы он не имел силы.

Естественно задать вопрос: почему же окружающий нас мир не является хаосом и, как видно, к нему не стремится, как предписывает второй закон термодинамики? Так, например, биологические (живые) системы являются высокоорганизованными системами с крайне низким уровнем энтропии. Как увязать существование таких маловероятных систем со вторым началом? Более того, прогресс современной жизни направлен на ее организацию, направлен против второго начала. И успехи прогресса очевидны.

Противоречия здесь нет, и абсолютный характер второго начала пока еще никем серьезно не оспаривался. Дело все в том, что понятие «замкнутая система», для которой высказан этот закон, является довольно сильной абстракцией. В нашем реальном мире замкнутых систем попросту нет; все реальные системы взаимосвязаны и взаимообусловлены. Эти связи могут быть сильными или слабыми, но они всегда существуют. Более того, нельзя выделить систему в замкнутую и искусственным образом; она всегда будет испытывать тепловое и гравитационное воздействия других систем.

Так, мы на нашей Земле не можем считаться замкнутой системой, ибо Земля получает энергию от Солнца.

Наша солнечная система так же не является замкнутой, потому что на нее воздействует излучение

и тяготение Галактики. Это излучение мало, но за миллиарды лет его существования оно оказало существенное влияние на солнечную систему.

Указанные обстоятельства придают второму началу несколько академический характер и снимают эмоциональное напряжение, связанное с «тепловой смертью» вселенной.

О призраке «тепловой смерти» вселенной стоит рассказать подробнее. В прошлом веке многие ученые (да иные и в наше время) второе начало термодинамики ошибочно распространяли на всю вселенную, считая тем самым ее замкнутой системой! Это и приводило к идее «тепловой смерти» вселенной, которая представлялась в виде равномерно нагретой материи, без скачков и перепадов температуры. Действительно, возрастание энтропии замкнутой системы приводит к выравниванию температур во всех точках этой системы. Жизнь в подобной «теплой» вселенной невозможна. Ведь всякая машина (в широком смысле) может функционировать лишь при наличии перепада температур. При этом работа машины происходит за счет охлаждения нагретой части и нагревания холодной.

Живое существо не представляет исключения из данного правила. Оно — сложнейшая машина, для работы которой необходимо также иметь перепад температур с окружающей средой. При отсутствии такого перепада жизнь прекращается. Это и есть «тепловая смерть».

При всей внешней убедительности и неотвратимости идея «тепловой смерти» страдает одним недостатком — она является результатом неправильной предпосылки. Все страсти «тепловой смерти» возможны только в замкнутых системах, которые, к счастью, не существуют. Спасителем от «тепловой смерти» выступает, таким образом, известный *закон всеобщей взаимосвязи и взаимообусловленности явлений и предметов в мире*. Ни вселенная, ни ее части никак не могут считаться замкнутыми системами, и действие второго закона термодинамики на них не распространяется. Значит, «тепловая смерть» нам не грозит.

Но вернемся ко второму началу. Оно не исключает возможности местного понижения энтропии даже в

замкнутой системе, то есть допускает местную организацию, но за счет более интенсивного разрушения остального. Местное упорядочение некоторой части замкнутой системы возможно только при условии, что оставшаяся часть будет более дезорганизована.

Суммарная же упорядоченность не увеличится в соответствии со вторым началом.

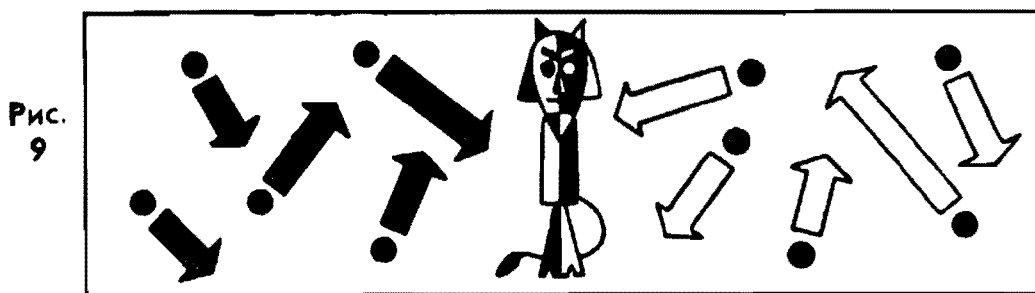
Проблема повышения упорядоченности впервые затронута Максвеллом в 1871 году и сформулирована им в виде парадокса, который назван несколько необычно — *демон Максвелла*. (Не путать с дьяволом, демон — это хорошо, в противоположность дьяволу он выполняет полезные функции и может считаться нашим союзником в борьбе с дьяволом хаоса.)

демон максвелла

Остроумный парадокс Максвелла в 1871 году, то есть до появления кибернетики, был несовместим со вторым началом термодинамики. И вот почему.

Представим себе изолированный пустой ящик, внутри которого имеется перегородка, разделяющая его внутренность на две части (рис. 9). Наполним обе половинки этого ящика газом одной и той же начальной температуры. Такая система (ящик с газом одинаковой температуры) имеет максимальную энтропию. Если бы температура газа в одном отсеке отличалась бы от температуры газа в другом отсеке, то система была бы более организованной и ее энтропия соответственно уменьшилась бы. В соответствии со вторым началом термодинамики температуры обоих отсеков имеют тенденцию к выравниванию (это, как известно, наблюдается и экспериментально).

Теперь сделаем в перегородке отверстие и закроем его заслонкой, которую можно открывать и закрывать по необходимости. Пусть заслонкой управ-



ляет некоторое гипотетическое существо — демон (обязанности, возлагаемые на него, под силу только мифическому существу с неограниченными возможностями). Демон действует в соответствии со следующей инструкцией (алгоритмом). Он открывает заслонку и пропускает из одного отсека в другой только «быстрые» молекулы газа. В обратном направлении он пропускает только молекулы, движущиеся с малой скоростью.

Движение молекул газа в ящике можно уподобить движению бильярдных шаров. Они движутся с разными скоростями, сталкиваются, отскакивают, снова сталкиваются и обмениваются энергией.

Скорость этих молекул-шаров газа различна и является случайной величиной для данной молекулы. Среднее значение скорости связано с температурой этого газа — чем больше средняя скорость, тем больше температура, и наоборот. Следовательно, в обоих отсеках ящика всегда найдутся и «быстрые» молекулы, двигающиеся по направлению к отверстию, закрытому заслонкой, и «медленные». Задача демона заключается в том, чтобы пускать или не пускать эти молекулы в другой отсек в зависимости от их скорости.

Как нетрудно заметить, через некоторое время такой работы демона в одном отсеке повысится концентрация «быстрых» молекул, а в другом — «медленных». Температура газа в одном отсеке соответственно повысится, а в другом — понизится. Энтропия такой системы будет ниже, чем исходной, так как появится перепад температур.

На первый взгляд получается явный парадокс! Замкнутая система (ящик с газом и демоном внутри) вопреки второму началу увеличивает свою организацию! Этот парадокс удалось раскрыть лишь после создания кибернетики.

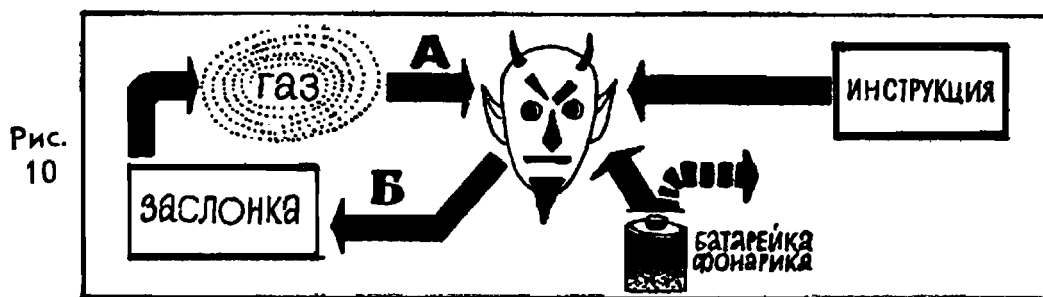
Дело тут в том, что демон, манипулируя заслонкой, вносит *информацию*, которая и организует систему. «Сортируя» молекулы, он делает систему более организованной, он управляет этой системой, то есть так воздействует на нее, что она становится более упорядоченной.

Но это не обходится даром! Чтобы управлять,

демон должен получить информацию о скорости движения молекул. А так как система предполагается замкнутой (внутри ящика не может проникать даже свет извне, иначе нарушится замкнутость), то для получения информации демон *должен* затратить свою энергию (например «осветить» молекулу фонариком) и тем самым частично разрушить батарейку.

Следовательно, полученная организация имеет лишь локальный характер (повышается упорядоченность газа), причем это локальное уменьшение энтропии газа происходит за счет повышения энтропии батарейки. Суммарное же значение неупорядоченности рассматриваемой замкнутой системы (газ и батарейка) увеличится.

Взаимоотношения между газом, демоном и батарейкой показаны схематично на рисунке 10. Здесь



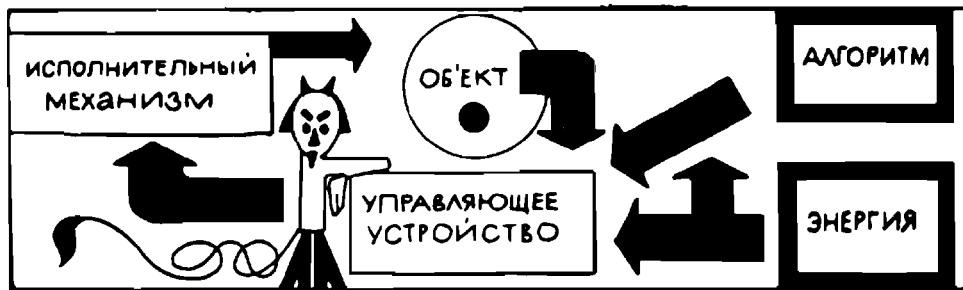
демон по каналу А получает информацию о движении молекул и на основе этой информации управляет по каналу Б заслонкой. При этом он пользуется энергией батарейки. В результате функционирования этой схемы *организация* будет как бы «перекачиваться» из батарейки в газ (пунктирной стрелкой на рисунке изображены неизбежные потери организации).

В схеме есть все, что необходимо для любой системы управления: объектом управления в данном случае является газ; демон выступает в роли управляющего устройства, действующего в соответствии с заданным алгоритмом (инструкцией); а источником организации является энергия батарейки.

Наша схема не является досужей. В ней заложена глубокая идея управления. На рисунке 11 показана схема управления любым объектом. Хорошо видно, что она практически повторяет рассмотренную выше «демоническую» схему.

Здесь информация о состоянии объекта, образуе-

Рис.
11



мая ценой определенных энергетических затрат, направляется в управляющее устройство, которое выполняет роль демона. Оно на основе заданного алгоритма управления (этот алгоритм показан на рисунке прямоугольником) и используя полученную информацию строит управление объектом.

Как видно, для функционирования схемы совершенно необходимы два фактора:

1. Источник понижения энтропии (организация).
2. Алгоритм управления (правило, позволяющее на основе полученной информации управлять).

Если вопрос об источнике энергии, необходимой для управления, не стоит остро и решается современной энергетикой довольно простыми средствами, то задача определения (синтеза) алгоритма управления далеко не всегда проста.

Всякое управление есть процесс организации объекта, то есть такое целенаправленное воздействие, которое переводит объект из более вероятного состояния в требуемое менее вероятное состояние.

Задача синтеза управления и анализа его работы есть информационная задача и составляет основу современной кибернетики как науки. Управление является средством воздействия на окружающую нас природу, средством подчинения этой природы человеку, средством разумного изменения мира.

В этом смысле управление антагонистично второму началу термодинамики, оно понижает энтропию объекта, в то время как второе начало постулирует его дезорганизацию.

Но управление создает лишь местную (локальную) организацию, а второе начало обесценивает замкнутую систему в целом. Нельзя говорить, что управление действует против второго начала. Они функционируют в разных плоскостях.

Управление всегда локально, а второе начало — интегрально — это всеобъемлющий закон.

Для иллюстрации рассмотрим процессы старения и лечения как процессы дезорганизации и управления. Старение является типичным процессом повышения энтропии, а лечение — управлением, которое снижает энтропию живого существа.

Старение протекает во всех органах одновременно и параллельно. Это всеобщий (интегральный) процесс, охватывающий все клетки живого организма. Лечение же локально. Оно направлено на улучшение работы одного органа, а не организма в целом. Недаром современная медицина расчленена на множество разделов, каждый из которых занимается лечением (управлением) лишь одного органа; допустим, кардиология — лечением сердца, нейрофизиология — лечением мозга, стоматология — лечением полости рта и т. д.

Как видно, старение обесценивает весь организм в целом, а лечение нацелено на управление лишь его отдельными частями.

Далее, второе начало — всегда и везде действующий закон, а управление действует только там, где имеются информационные процессы, где есть программа, указывающая на то, что нужно делать для того, чтобы управлять.

Подобная программа является продуктом целенаправленной деятельности, то есть результатом функционирования живых существ.

Это дает основание связывать управление с жизнью.

Более того, можно утверждать, что всякое управление является результатом деятельности живых и только живых организмов. Это означает, что до возникновения жизни на Земле ни о каком управлении и организации не могло быть и речи.

А кристаллы! — скажет внимательный читатель. Действительно, кто не любовался причудливыми и строго правильными гранями минеральных кристаллов и снежинок? Разве это не высочайшая форма организованности вещества? Но ведь образуются кристаллы и без чьего-либо целенаправленного воздействия и тем более человека. В чем здесь дело? Как

решить это противоречие? Прежде всего следует отметить, что кристаллизация происходит с отдачей энергии. В процессе кристаллизации система перестает быть замкнутой и, следовательно, на нее не распространяется второе начало. Но есть еще одно существенное обстоятельство.

Для объяснения проведем следующий простой опыт. В стакан воды положим ложку песка, не сахарного, а обычного, морского, силикатного, и попытаемся «размешать» его. Пока мы затрачиваем усилие и мешаем ложкой, песок с водой образуют довольно равномерную смесь. Но достаточно прекратить подачу энергии, как песок сразу же осядет на дно, и вода и песок разделятся.

Какое же из этих двух состояний содержимого стакана следует считать более организованным?

На первый взгляд четкая грань между песком и водой во втором состоянии дает основание говорить о его высокой организации. Взболтанный же песок больше напоминает хаос, и первое состояние воспринимается как полностью лишенное организации.

В действительности все обстоит наоборот: взболтанный песок имеет пониженную энтропию, что обеспечивается непрерывной подачей энергии, а четкая грань между песком и водой в спокойном состоянии получена за счет отбора энергии, за счет снижения потенциальной энергии. Известно, что все процессы идут в направлении уменьшения потенциальной энергии; и это обстоятельство лежит в основе одной из формулировок второго начала.

Так и с кристаллами. Образование кристаллов есть процесс повышения энтропии и, следовательно, процесс потери организации; хотя внешне это воспринимается как образование высшей формы организации. Здесь процесс образования кристаллов является процессом перехода в более устойчивое состояние с потерей энергии.

Как видно, понятие порядка в обыденной жизни и в кибернетике имеет часто различный характер.

Порядком в кибернетике называют такое состояние, которое удовлетворяет определенным целям. Иногда поставленная цель совпадет с результатом действия второго начала. Тогда она достигается очень

легко. Например, желая разрушить здание, достаточно его взорвать. О дальнейшем «постарается» второе начало термодинамики — оно превратит здание в грудку камней, что знаменует собой наибольшую энтропию — торжество хаоса. Именно это произошло в стакане с песком. Осаждение песка на дно стакана происходит под действием силы тяжести и, следовательно, является прямым проявлением второго начала для замкнутой системы: стакан с водой и песком — Земля (Земля сюда включена как источник силы тяжести, без которой песок не осядет на дно стакана). Действительно, энтропия этой системы до осаждения песка меньше, чем после осаждения, так как легко себе представить устройство, которое использует энергию осаждающегося песка, — например, крыльчатку, которая будет вращаться под действием опускающихся песчинок.

Однако, желая реставрировать здание (а это идет вразрез второму началу), придется много потрудиться, чтобы понизить его энтропию и вернуть в упорядоченное состояние. Здесь под словом «труд» подразумеваются не энергетические затраты (хотя без них не обойтись), а информационные, затраты на управление.

Здесь мы сталкиваемся с новой трактовкой управления, где понятие цели играет решающую роль.

управление как средство достижения заданных целей

Как вы думаете, что объединяет демона Максвелла, терморегулятор, дворника, рабочего-станочника, администратора, проектировщика и научного сотрудника?

Демон Максвелла — гипотетическое существо, придуманное Максвеллом для того, чтобы построить парадокс, необъяснимый без привлечения понятия управления.

Терморегулятор — прибор для управления температурой. Он работает следующим образом. Если температура в комнате ниже заданной — терморегулятор включает нагреватель, а если выше заданной, то выключает.

Дворник, рабочий-станочник, администратор, проектировщик и научный работник — люди, выполняющие определенные функции в человеческом обществе.

На первый взгляд никакой связи между ними нет, их нельзя даже объединить материальностью, так как демон, например, существо придуманное и реально не существует.

И все-таки связь есть!

Их объединяет целенаправленная деятельность — они являются управляющими устройствами, действуют в направлении достижения заданных целей. Этим они организуют объект и делают его более совершенным, понижают его энтропию.

Отличительная особенность всякого управляющего устройства заключается в целесообразном поведении, направленном на выполнение заданной цели, при этом его «деятельность» приложена к объекту управления и нацелена на одно: чтобы объект достиг вполне определенного идеала — цели.

Так, целью демона Максвелла является увеличение концентрации «быстрых» молекул в одной секции ящика, а «медленных» — в другой. Цель терморегулятора — поддержание температуры в комнате на заданном уровне.

Читатель без труда сможет самостоятельно описать цели, стоящие перед такими управляющими устройствами, как дворник, рабочий-станочник, администратор и т. д.

Однако для эффективного управления мало знать цель. Нужно уметь ее достигать, то есть так воздействовать на объект управления, чтобы в результате план был выполнен.

А это часто бывает значительно труднее, чем поставить цель. В иных случаях задача решается сравнительно просто. Так, в случае терморегулятора совершенно ясно, что при понижении температуры в комнате нужно включать нагреватель, а не ехать греться в Африку, если же температура стала выше необходимой, следует выключить нагреватель или включить охладитель.

Однако подобная простота является скорее исключением, чем правилом. Обычно определить, как достигнуть поставленную цель, чрезвычайно трудно.

Здесь мы подходим к одному из самых фундаментальных понятий современной кибернетики — к понятию *алгоритма управления*.

Алгоритм управления есть способ (правило) достижения поставленной цели. Для демона Максвелла таким правилом является указание по сортировке молекул в зависимости от их «быстроты». Алгоритм работы терморегулятора — правило, по которому включается и выключается нагреватель (или холодильник). Дворник достигает цели — чистоты на улице — путем алгоритма сбора мусора, который реализуется при помощи метлы и совка. Рабочий-станочник достигает цели — изготовление детали по чертежу, — применяя алгоритм снятия ненужного металла при помощи металлорежущего станка. Администратор, добиваясь цели — выполнения плана, использует собственные алгоритмы управления в виде поощрения и наказания своих сотрудников в зависимости от их усердия по достижению поставленной цели. Перечень примеров можно продолжать бесконечно. Но лучше представить схему управления объектом вне зависимости от специфических особенностей объекта и его управления.

На рисунке 12 показана схема управления объектом. Здесь взаимодействие объекта с управляющим устройством представлено в виде двух стрелок *A* и *B*, которые являются каналами связи между объектом и управляющим устройством. По каналу *B* управляющее устройство получает информацию о состоянии объекта (не зная, что творится с объектом, управлять нельзя!). По другому каналу (стрелка *A*) управляющее устройство воздействует на объект, управляет им (без воздействия на объект управлять также нельзя).

Однако, как сказано выше, для управления этого мало; нужно знать, *как* распорядиться полученной информацией, *как* на ее основе управлять объектом и *к чему* следует при этом стремиться. Для этого управляющему устройству сообщаются цели управления (стрелка *B*) и способ — алгоритм — управления — стрелка *Г* на рисунке. Эти данные должны быть заранее «заложены» в управляющее устройство. Значит, чтобы управление могло бы упорядочивать

Таким образом, прогресс и улучшение объектов связан прежде всего с определенными алгоритмами управления, благодаря которым достигается данный прогресс.

Однако алгоритмы сами по себе тоже продукт организации. Действительно, чтобы знать, как управлять объектом, нужно получить необходимую инструкцию от кого-то. Так для умения зажигать лампу, надо предварительно у *кого-то* научиться. Этот «кто-то» уже *знал* о назначении кнопки и передал свое знание нам в процессе обучения. Значит, для создания (синтеза) алгоритма и реализации его в виде управления необходима работа другого алгоритма.

На примере демона Максвелла видно, что для повышения организации газа необходимо сначала «придумать» сам алгоритм управления (сортировка молекул по большим и малым скоростям в разные отсеки ящика), а затем нужно «построить» демона — такое устройство, которое действует в соответствии с заданным алгоритмом. Но что значит «придумать» и «сделать»?

Эти действия также целесообразны и должны быть образованы в результате понижения энтропии, то есть чтобы «придумать» и «сделать», необходимы алгоритмы «как придумать» и «как сделать» и т. д.

Нетрудно представить себе подобную цепочку алгоритмов, в начале которой должен находиться простейший алгоритм управления, способный запустить эту бесконечную цепочку. То есть вначале необходимо иметь нечто вроде «акта творения».

В библейской легенде о сотворении мира «творит» бог: разумная высокоорганизованная система, знающая, «как творить» (на то он и бог). А кто сотворил бога и научил его творить? Об этом в Библии не говорится.

Вспомним еще красивую легенду о Прометее, который, по мнению древних греков, научил людей добывать и использовать огонь. В терминах кибернетики Прометей знал алгоритм добывания огня, знал алгоритмы приготовления жаркого,ковки и плавки металла и владел множеством всяких других полезных сведений. А кто научил его этому? Кто сообщил

Прометею эти алгоритмы? Вы скажете — Зевс?!
А кто сообщил Зевсу?

Так рассуждая, мы всегда заходим в тупик. Действительно, если всякое управление есть результат функционирования живых существ, а они сами являются результатом управления (точнее самоуправления), то естественно задать вопрос: откуда взялось первое управление на Земле, то есть откуда пошла земная жизнь.

Спасительным ответом (а правильнее, уклонением от ответа) является ссылка на внеземное, космическое происхождение жизни. Это утверждает теория панспермии. На вопрос «Откуда взялась эта внеземная, космическая жизнь?» теория панспермии не отвечает и считает этот вопрос праздным. Жизнь есть жизнь! И все тут! А если есть жизнь, то есть и управление.

Автору такой ответ представляется вполне корректным, но и вполне недостаточным. Управление как средство понижения энтропии, как способ улучшения организации могло иметь свою бурную и интересную историю. И это будет другим выходом из тупика.

Для этого достаточно считать, что процесс создания алгоритмов управления происходит не только путем наследственной передачи, но путем их *самоорганизации*, самовозникновения.

Сказанное означает, что алгоритмы управления могут самосоздаваться, самосинтезироваться.

Как это происходит?

За время существования управления образовалось много способов создания (синтеза) алгоритмов управления. Историю управления можно подразделить на четыре этапа, каждый из которых характеризовался появлением новых способов синтеза алгоритмов управления.

Этапы эти назовем так:

- первый — *вероятностный*,
- второй — *стихийный*,
- третий — *осмысленный*,
- четвертый — *универсальный*,

Рассмотрим каждый этап в отдельности.

3. ИСТОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ

первый этап

С *вероятностного* этапа началось управление на Земле. (В данном случае обсуждается история развития управления на Земле. Это вовсе не исключает других путей развития, которые возможны в других условиях на других планетных или звездных системах.) Заключается он в случайном образовании простейших более или менее организованных систем в виде молекул различных элементарных белков и аминокислот. Такие молекулы случайно образовывались под действием электрических разрядов в атмосфере Земли, которая в то время состояла из водяных паров (H_2O), метана (CH_4), аммиака (NH_3) и водорода (H_2).

Эти вещества, *случайно* взаимодействуя друг с другом, образовывали более сложные структуры. Если они оказывались устойчивыми, то некоторое время существовали и взаимодействовали с другими аналогичными структурами. Неустойчивые же быстро распадались, чтобы немедленно создать новые, также случайные комбинации.

В результате случайного перебора различных комбинаций структур на дальнейшую ступень «развития» поступали самые устойчивые структуры, причем наиболее активные из них участвовали в дальнейшей «игре», а пассивные выбывали. Необходимым условием для протекания такого рода процесса являлось энергичное перемещение.

В бурлящей и клокочущей атмосфере первобытной Земли этот процесс протекал хорошо. С. Миллер провел следующий довольно простой, интересный и очень поучительный опыт. Он сделал смесь, которая, как считается, была первоначальной атмосферой Земли, и стал пропускать через эту смесь электрические разряды, имитирующие молнии. Через неделю был произведен тщательный химический анализ смеси. Каково же было его удивление, когда в колбе обнаружилась смесь аминокислот! А аминокислоты — это кирпичи, из которых состоит белок — основа жизни. В частности, абсолютно точно было установлено присутствие наиболее часто встречающихся

в белках аминокислот — глицина и аланина, структура которых очень сложна.

Как они образовались?

Единственным разумным ответом может служить случайность. Именно благодаря многообразию случайных комбинаций и соотношений, которые могут образоваться между молекулами воды, аммиака, метана и водорода, в сочетании с действием высоких температур от искровых разрядов могли случайно образоваться молекулы более сложных соединений. Времени на это было достаточно.

Много миллионов лет бушевали атмосфера и гидросфера Земли, пока не образовался питательный бульон жизни — раствор молекул различных аминокислот. Роль случайности в этом процессе была определяющей.

Дальнейшая судьба бульона складывалась уже под действием второго начала термодинамики. В соответствии с этим законом большие молекулы не могут быть равномерно распределены в воде.

Подобно тому, как пересыщенный водяной пар конденсируется в туман — мельчайшие капельки воды, большие молекулы в растворе под действием электростатических сил объединяются в отдельные рои. Рои, достигнув определенной плотности, выделяются из раствора в виде так называемых коацерватных капель, плавающих в растворе. Капли же отделены от среды хорошо выраженной поверхностью раздела.

Если сама тенденция к образованию капель не случайна, то комбинации молекул аминокислот в каждой капле были случайными — каждая капля имела сугубо индивидуальную конструкцию. С этого момента начинает работать своеобразный отбор, который был подмечен и описан академиком А. И. Опариным.

Действительно, если случайная структура капли неустойчива, капля разваливается под действием внешних факторов. Следовательно, сохранялись лишь устойчивые комбинации молекул в капле. А все неустойчивые как бы «вымирали», и из их осколков образовывались другие варианты случайных конструкций. Ясно, что по прошествии достаточного времени

в результате этого процесса остаться должны только устойчивые капли, которые «умели» противостоять разрушительному действию среды.

Устойчивая капля, как и всякое тело, абсорбировала (осаждала) на своей поверхности различные молекулы из раствора и тем самым увеличивалась в объеме. Новые молекулы, «оседающие» на ее поверхности, располагались уже не случайно, а в соответствии с индивидуальной структурой поверхности капли. Капля как бы «растет», увеличивая свою массу. Увеличение размеров происходит не случайно, а в строгом соответствии с индивидуальностью каждой капли.

Достигнув определенных размеров, капля, не будучи прочной, разваливалась на две-три части под действием внешних механических сил, наподобие дробления капель эмульсии при ее встряхивании. Образовавшиеся капли по структуре совпадали с первоначальной. Они как бы «унаследовали» от исходной капли ее индивидуальные особенности. Они начинали «расти», дробились и т. д.

Но это еще не жизнь; это так называемая предбиологическая структура. Она обладает почти всеми свойствами жизни, но в очень карикатурной форме. Действительно, капля похожа на клетку. Оседание молекул раствора на поверхности капли можно рассматривать как некое подобие питания, а ее дробление в результате механического воздействия при желании легко представить как деление. Такое «деление» даже обладает элементами наследственности.

Все как в жизни!

Но до жизни пока очень далеко. Пройдет еще много миллионов лет, прежде чем эти капли в результате естественного отбора превратятся в живые клетки. Но главное уже есть. Дело только за временем.

А времени у природы было предостаточно.

Каких-нибудь один-полтора миллиарда лет, и появились многоклеточные организмы. Жизнь из плесневой и слизистой формы становится активной жизнью привычных нам существ

Таким образом, вероятностный этап истории уп-

равления характеризуется прежде всего обилием случайностей, которые и позволили создать жизнь на Земле.

Поэтому можно смело утверждать, что случай лежит в основе процесса появления жизни на Земле!

Сам по себе акт возникновения жизни в питательном бульоне является случайным процессом. Но, с другой стороны, процесс возникновения жизни был в таких условиях и неизбежным. Ведь в результате указанного случайного перебора возможных комбинаций структур различных органических молекул в течение миллиарда лет с неизбежностью должна быть найдена хотя бы одна удачная комбинация, которая обладала бы свойствами живой клетки.

С этого момента начинается история жизни. И на этом, по-видимому, заканчивается вероятностный этап управления, отличающийся тем, что здесь процесс локального понижения энтропии происходил случайно, как результат проявления статистических закономерностей.

С появлением жизни появились и новые способы управления.

второй этап

Стихийный этап истории управления связан с развитием и усовершенствованием живых организмов. Здесь основным алгоритмом управления был открытый Ч. Дарвином алгоритм естественного отбора.

В соответствии с этим алгоритмом с большей вероятностью даст потомство тот индивид, который более приспособлен к окружающей среде. Менее приспособленный погибнет и не сохранит свою непригодность в потомстве. В результате функционирования алгоритма естественного отбора появилось огромное число различных алгоритмов управления. Так возникли алгоритмы, управляющие механическим поведением живых существ: плавание, ползание, летание, ходьба. Алгоритмы, управляющие психическими функциями: агрессивность, уклонение, избегание, замирание и т. д. Алгоритмы, управляющие функционированием нервной системы, и т. д.

Так или иначе, но во время стихийного этапа управления синтез всякого нового алгоритма контролировался и подчинялся закону естественного отбора. «Выжили» и сохранились лишь те алгоритмы самоуправления живых организмов, которые делали этот организм более эффективным с точки зрения требований окружающей среды.

Не обошлось без курьезов. Так, известно, что страус в некоторых чрезвычайно опасных ситуациях зарывает голову в песок. Эта «страусова политика» вошла в поговорку как образец глупости. Почему же образовался такой с первого взгляда бессмысленный алгоритм поведения в минуты опасности? Не лучше ли уж бежать или нападать? Не промахнулась ли природа?

При внимательном рассмотрении оказывается, что такой алгоритм поступков для страуса, не имеющего ни зубов, ни рогов, ни копыт, является оптимальным именно в тех ситуациях, когда убежать невозможно.

Зарыв голову в песок, страус не видит опасности и не движется, что, как ни странно, часто помогает ему спастись от когтей зверя. Дело в том, что большинство хищников питается мясом только что убитых ими животных (в этом есть также своя приспособительная логика, особенно в теплых странах). Неподвижный страус не вызывает аппетита, и хищник скорее бросится вдогонку за антилопой, бегущей у горизонта, чем на неподвижную гору перьев в двух шагах! Это и спасает страуса.

Для чего же зарывать голову в песок? Не лучше ли просто стоять неподвижно? А это для того, чтобы не подкачали нервы: не так страшно реализовать выбранный алгоритм поведения.

Этим же приемом, но уже осмысленно, не зарывая голову в песок, пользуется человек при встрече с медведем. Во всяком случае, так рассказывается в назидательных книжках.

Как видно, этот этап развития управления целиком определяется стихийным характером отбора эффективных алгоритмов управления в живых организмах.

третий этап

Следующий этап синтеза алгоритмов управления связан уже с человеческой деятельностью. Человек, выйдя на орбиту истории, сразу заявил о своей способности создавать алгоритмы управления не стихийно, а вполне осмысленно. Этим он и отличается от всех других животных.

Точнее, этап *осмысленного* синтеза алгоритмов управления начинается не с появления человека, а с его разумной деятельности. Этот этап отличается от предыдущих тем, что алгоритмы управления теперь создаются человеком.

Развитие ремесел и наук составляет основу управляющей деятельности человека. Человечество начинает упорядочивать окружающий его мир, изобретая многочисленные алгоритмы управления и целесообразного изменения природы. Каждый из этих алгоритмов отличался строгой индивидуальностью ввиду того, что применялись они к различным объектам природы. Например, ремесло гончара отличалось от ремесла кузнеца, потому что отличались объекты обработки: с одной стороны, была сырая глина, а с другой — раскаленный металл. Поэтому отличались и алгоритмы управления формоизменением этих объектов.

Создавать алгоритмы изменения окружающего мира невозможно без хорошего его понимания и знания, без развития науки — системы упорядоченных знаний о природе. Эти знания получают в результате осмысливания происходящих явлений, понимания их сути, выяснения их природы.

Но что такое *осмысливание, понимание, выяснение природы?* Что такое *познание?* Нельзя ли эти туманные понятия выразить в четкой и определенной форме, поддающейся количественной оценке?

Можно! Для этого достаточно уметь предсказывать ход и поведение интересующего нас явления природы. Возможность предсказания в значительной мере определяет уровень осведомленности об объекте исследования. Если вы хорошо разбираетесь в процессе, то вам удастся довольно точно предсказывать его течение в различных ситуациях. Откло-

нение хода реального процесса от его предсказанного поведения и характеризует эффективность предсказания и одновременно определяет величину вашего невежества. Чем меньше это отклонение, тем более вы осведомлены об этом процессе, тем, очевидно, выше следует оценивать ваше понимание природы исследуемого процесса.

Нельзя, конечно, утверждать, что всегда умение что-либо точно предсказать эквивалентно глубокому знанию. Но безусловно, что эти понятия связаны друг с другом, и возможность предсказания поведения какого-либо процесса, как правило, опирается на глубокое понимание природы этого процесса.

В связи с этим очень удобно познание определить как умение предвидеть, предсказывать. Систему суждений и заключений, позволяющих определенным образом предсказывать поведение анализируемого явления, будем называть *моделью* этого явления.

Например, рассмотрим явление падения камня. Бросая камень с различных высот и замеряя время его падения, можно установить связь между этими величинами и сформулировать закон свободного падения. Этот закон и является моделью, позволяющей предвидеть поведение камня при падении с различных высот.

Другой пример. Скрещивая два сорта гороха с красными и белыми цветками, Г. Мендель установил законы наследственности. Он показал, что в процессе наследования свойств родителей существуют определенные единицы наследственности, которые не могут измельчаться. Подобно тому, как энергия передается квантами — строго определенными наименьшими неделимыми порциями, — наследственность так же квантуется. Квантами наследственности являются *гены* — материальные носители неделимых свойств. Так, в опытах Г. Менделя с горошком при скрещивании появлялись только красные или только белые цветы; промежуточных — розовых — не было. Это означает, что цвет цветка определяется одним из двух генов: геном красного цветка и геном белого. Других генов не существует.

Свое наблюдение Г. Мендель сформулировал в виде закона наследственности: родительские признаки

не усредняются, а передаются в виде отдельных свойств (нос папы, глаза мамы, а характер бабушки). Этот закон является моделью, позволяющей предвидеть характер наследования родительских признаков.

Таким образом, познание окружающего нас мира является не чем иным, как созданием его моделей. Они позволяют предвидеть последствия нашего взаимодействия с объектами этого мира. Так, не зная закона свободного падения, нельзя использовать баллистическую ракету, потому что точка ее приземления определяется (предвидится) с его помощью.

Очевидно, что создание (синтез) моделей так же является процессом повышения организации мышления человека. Эта психическая организация материализуется в виде целенаправленных действий, которые совершает человек на основе имеющихся у него моделей.

Скажем, зверолов в процессе обучения (по книгам, рассказам и показам) и самообучения (на собственном опыте) узнает особенности поведения различных животных. Это означает, что в его мозгу создаются модели поведения, которые он и использует при организации охоты. Здесь нематериальная — психическая — модель поведения дала возможность эффективно управлять отловом, получая при этом вполне материальные выгоды.

Итак, объяснение механизма явлений природы считается управлением, ибо при этом создаются модели этих явлений. Процесс познания, то есть синтез моделей, есть процесс целенаправленного упорядочения, процесс понижения энтропии. В этом случае целенаправленность определяет такой способ действия, при котором синтезируемая модель в своем проявлении должна наименьшим образом отличаться от анализируемого (моделируемого) объекта, и чем меньше отличие, тем лучше модель. Так, например, известные законы Ньютона являются приближенными, но вполне удовлетворительными моделями медленного механического движения в нашем мире. Более удачлив тот зверолов, чьи модели поведения животных лучше, то есть тот, кто лучше предвидит их поведение в той или иной ситуации.

Система таких моделей, синтезированных человеком для эффективного управления окружающим его миром, и образует *науку*.

Как видно, на этапе осмысленного синтеза алгоритмов управления деятельность человека носит двоякий характер. С одной стороны, он изменяет окружающий его мир, материально управляя природой, а с другой — объясняет мир, то есть создает модели, необходимые для изменения этого мира. Эти две функции человека неразрывно связаны друг с другом. Действительно, чтобы осмысленно изменять мир и приспособлять его к своим потребностям, нужно знать, к каким последствиям приведет тот или иной шаг. Нетрудно представить себе, к какому ералашу привели бы действия, результат которых не предвиделся хотя бы приближенно.

Но предвидеть можно только на основе моделей. Следовательно, никакая разумная деятельность невозможна без моделей, на которых предварительно «разыгрывается» эта деятельность. Нельзя сделать разумный поступок, не прикинув, к чему он может привести.

Так, желая запустить ракету на Луну, нужно создать модель полета ракеты: уметь рассчитывать ее положение в зависимости от времени и других факторов. В противном случае это занятие будет пустой забавой.

Нельзя целенаправленно изменять мир без создания моделей.

Очевидно, что способы решения этих задач различны. Человечество создало огромное число алгоритмов для объяснения и изменения природы. Каждый из этих алгоритмов носил строго локальный, частный, специализированный характер.

Так, для создания модели поведения животного у капкана или на водопое существует много различных рецептов. Каждый зверолов выбирает свой индивидуальный способ (алгоритм) изучения повадок. Аналогично можно по-разному воспользоваться своими знаниями для достижения целей. Так в случае со звероловом расположение капкана выбирается в зависимости от имеющихся моделей поведения животных и собственного опыта.

четвертый этап

С появлением кибернетики, науки об управлении в живых организмах и машинах, начался следующий и, по-видимому, последний период — период синтеза *универсальных* алгоритмов управления. Их можно применять к любым объектам, независимо от их физической природы. Кибернетика рассматривает процессы управления вообще, а не применительно к конкретной ситуации. Она имеет дело лишь с моделью объекта, которая отражает не физическую, а информационную суть явлений, происходящих в объекте во время управления им.

Одна и та же модель может описывать процессы управления в объектах различной физической природы. Так, колебательное звено является математической моделью таких различных объектов, как колебания механического маятника, процессов в электрическом контуре и изменения количества хищников. Процесс управления этими объектами будет одним и тем же.

Рассмотрим этот пример подробнее.

сказка про девочку на качелях, злого волка и электрический контур

Жили-были Девочка — она любила качаться на качелях, злой Волк — он любил есть зайцев, и Электрический контур. Девочка и Волк обычные, сказочные. Девочка хорошая и умная, а Волк злой и разбойник. А вот Электрический контур пришел из учебника радиотехники.

Он очень гордился этим обстоятельством, задирал нос и важничал. Дело в том, что процессы, которые происходят в контуре, имеют электромагнитный характер и поэтому часто бывают доступны не всем. Именно потому Электрический контур и был преисполнен чувства собственной загадочности и мудрености.

Собрались они однажды вместе. Девочка, как всегда, качалась на качелях, Волк лениво щелкал зубами, он был голоден и зол, а Электрический контур важничал.

— Перестань болтаться, — прорычал Волк. Он был невоспитанный, и это была его самая вежливая фраза.

— Она не болтается, а совершает механические колебания относительно точки равновесия, — важно сказал Электрический контур.

— Ну и зануда ты, Контур! Какие такие колебания, если всем видно, что девчонка болтается без дела!

— Перестаньте ссориться! Вечно вы ругаетесь. Контур прав, эти механические колебания мне очень нравятся, — вмешалась Девочка.

— Как могут нравиться механические колебания? — возмутился Электрический контур. — Нет ничего лучше электромагнитных колебаний! — И он углубился в себя. Глядя на Контур, нельзя сказать, работает он или бездельничает, ведь электромагнитные колебания можно заметить только при помощи специального прибора.

У Волка было свое мнение относительно того, что лучше всего. Но он его не высказал и, вспомнив о зайце, только щелкнул зубами.

— И почему только мир так скверно устроен? — задумчиво спросил Волк. — В прошлом году полон лес был зайцев! А в этом хоть шаром покати. Каждому паршивому зайцу приходится в ноги кланяться и со своим братом волком грызться!

— А в позапрошлом? — спросила Девочка.

— В позапрошлом с зайцами было тоже туго.

— А еще годом раньше?

— Опять полно. Постой! — встрепенулся Волк. — Неужто год пусто, а год густо? А ведь верно! Ишь косые как неровно плодятся!

— Это тоже колебания — колебания численности популяции — заметил Контур.

— Чего, чего? Ты мне мозги не вкручивай. Никаких твоих колебаний и популяций я и знать не хочу. Мне бы только брюхо набить! — Волк был еще и циник. — Что же это получается? У тебя колебания, у девчонки колебания, и у зайцев тоже колебания! Может, и у меня найдутся какие-нибудь колебания? — саркастически заметил Волк.

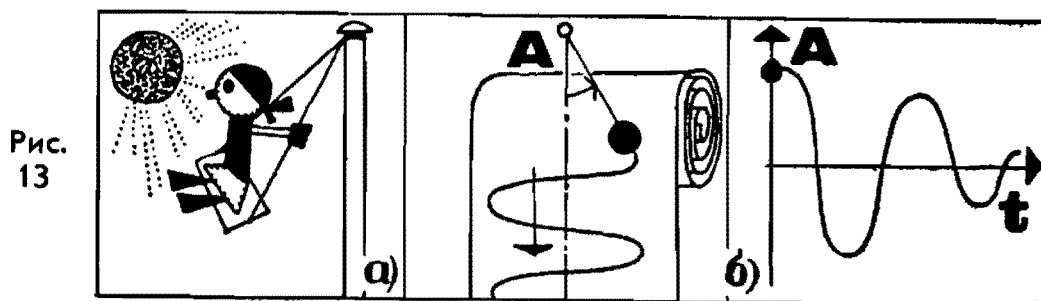
— Конечно! Число волков обратно пропорцио-

нально количеству зайцев. Чем больше волков, тем меньше зайцев, и наоборот, с уменьшением числа волков, количество зайцев увеличивается. Вот и получаются колебания.

— Постой, давай начнем с девчонки, это проще, — после изрядной паузы рыкнул Волк...

Не будем далее подслушивать их разговор. Давайте сами выясним, что общего в колебаниях качелей, в процессах в электрических контурах и количеством волков в лесу. На первый взгляд общего очень мало, но, присмотревшись внимательнее, можно заметить, что все три явления имеют колебательный характер поведения.

Убедимся в этом.



Качели являются простым маятником (рис. 13а). Положение маятника удобно характеризовать углом A между осью маятника и вертикалью, к которой стремится эта ось. Угол A будем считать положительным, если маятник отклонен вправо от вертикали, и отрицательным при его отклонении влево. Отклоним маятник на угол A — это будет его исходное состояние — и отпустим. Под действием силы тяжести маятник двинется к положению равновесия — к вертикальной оси, достигнет его и проскочит под действием набранной инерции. Потом сила тяжести снова вернет его в положение равновесия, и опять вследствие инерции маятник проскочит его и т. д. Размах колебаний будет уменьшаться, пока маятник не остановится.

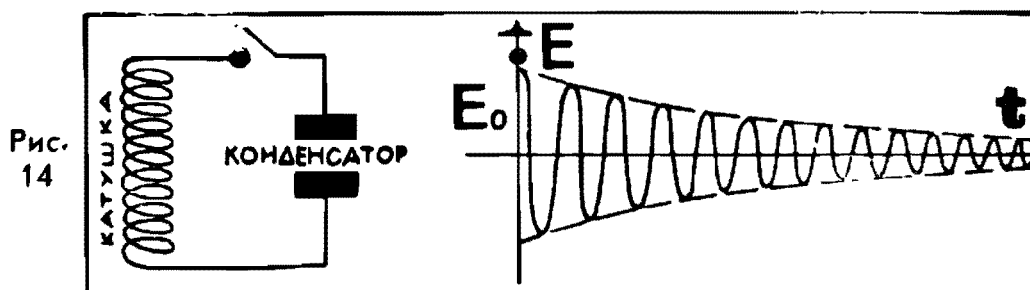
Если к маятнику прикрепить грифель и протаскивать под ним лист бумаги поперек направления колебаний (рис. 13б), то грифель оставит след, форма которого показана рядом в виде графика. Это и есть типичный вид затухающих колебаний.

Отметим здесь два существенных фактора, благодаря которым совершаются колебания. Это прежде всего сила тяжести, за счет которой маятник всегда стремится к положению равновесия, и его инерция, благодаря которой маятник стремится сохранить свое движение. Эти две противоречивые тенденции, взаимодействуя, и приводят к колебательному движению маятника.

Будем первую тенденцию называть тенденцией к устойчивости, а вторую — динамической тенденцией (тенденцией к движению).

Теперь рассмотрим электрический контур. Он состоит из двух деталей: конденсатора и катушки (рис. 14), соединенных через включатель в электрическую цепь. Конденсатор обладает свойством хранить электрический заряд. Если поднести к нему батарейку, то он зарядится, причем величина этого заряда будет тем больше, чем больше напряжение батарейки.

Пусть начальный заряд конденсатора равен E_0 . Замкнем включатель. Заряженный конденсатор начнет немедленно разряжаться, через провод катушки пойдет электрический ток и внутри катушки образуется так называемое электромагнитное поле. Это поле и является причиной намагничивания куска железа, если его вставить в катушку.



Возникшее электромагнитное поле сейчас же наводит (индуцирует) в катушке другой электрический ток, но обратного направления. Этот ток заряжает конденсатор, но зарядом обратного знака. Таким образом, все возвращается к исходному положению, только плюс и минус поменялись местами.

Дальнейшая работа контура проходит аналогично.

Как видно, поведение электрического заряда на конденсаторе в контуре имеет ярко выраженный колебательный характер, аналогичный поведению маятника. Здесь также четко проглядываются две тенденции, взаимодействие которых приводит к колебаниям. Это прежде всего стремление к разрядке конденсатора, то есть стремление к устойчивому состоянию, и индукция, благодаря которой электромагнитное поле вызывает обратный ток, что и не позволяет контуру зафиксироваться в положении равновесия ($E = 0$). Очевидно, что в разрядке проявляется тенденция процесса к устойчивости, а его динамическая тенденция связана с индукцией.

Теперь о взаимоотношениях волков и зайцев, или вообще о динамике контактирующих популяций.

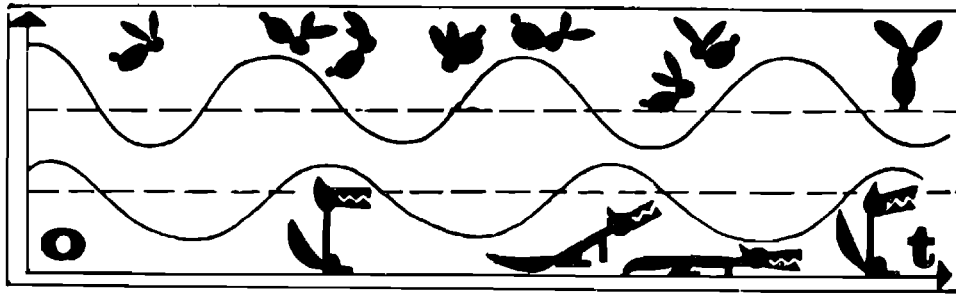
Популяцией в биологии называют группу тесно связанных между собой организмов, принадлежащих к одному виду. Так мы будем говорить о популяции волков и о популяции зайцев. Обе популяции взаимодействуют друг с другом, так как волки с удовольствием питаются зайцами. Рассмотрим следующую лесную ситуацию.

Пусть число зайцев и волков находится в равновесии, то есть на смену съеденному зайцу рождается новый, а гибель волка компенсируется рождением одного волчонка. Эту картину трудно назвать идиллией, но она возможна.

Пусть внезапно число зайцев увеличилось, например разбежался заячий питомник. Волки начнут получать более обильную пищу, что создаст благоприятные условия для их размножения. В результате число зайцев будет уменьшаться, а число волков расти. Когда зайцев станет совсем мало, настанут черные дни и у волков. Их стало много, и они начнут гибнуть от недоедания и болезней, пока волчья популяция значительно не сократится. Уменьшение числа волков приведет к сильному росту заячьей популяции и т. д.

Как видно, возникнут колебания численности обеих популяций относительно положения равновесия (рис. 15). Эти колебания есть результат двух факторов. Один из них связан с волчьим аппетитом и заячьей плодовитостью: за счет него система зай-

Рис.
15



цы — волки стремится к своему состоянию равновесия (на рис. 15 это состояние обозначено пунктиром).

Другим фактором является отставание числа особей популяции от условий жизни. Если условия жизни изменяются, то популяция изменяется не сразу, а через некоторое время, связанное с рождаемостью. Это динамический фактор.

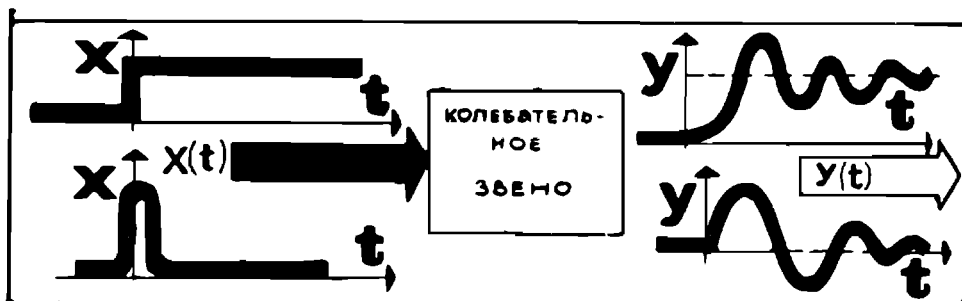
Таким образом, маятник, электрический контур и популяция зайцев являются системами с колебательным характером поведения. С точки зрения кибернетики они объединяются одним понятием — колебательным звеном.

Что же такое колебательное звено?

Под колебательным звеном понимается такой преобразователь входа X в выход Y , при котором выход колебательным образом откликается на изменение входа (рис. 16). Это означает, что при скачкообразном изменении входа выход откликается так, как показано на верхнем графике. Нижний график этого рисунка показывает поведение выхода при импульсном (ударном) входе. Такое звено, как видно, ведет себя так же, как рассмотренные выше примеры. Но оно лишено физического содержания. Здесь остался лишь смысл — характер изменения выхода при определенном воздействии на входе.

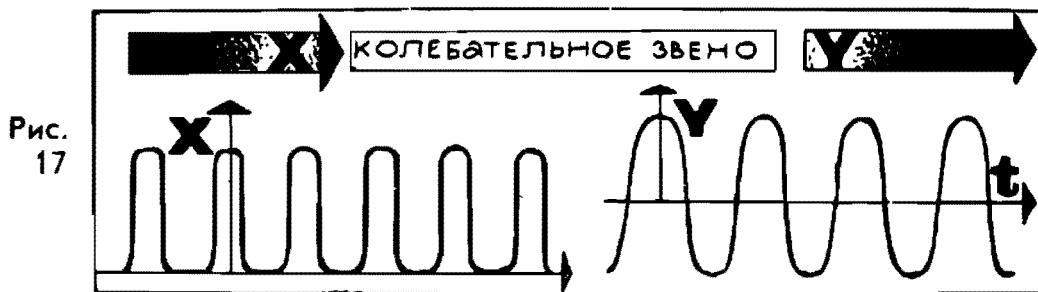
Для управления таким звеном этого вполне до-

Рис
16

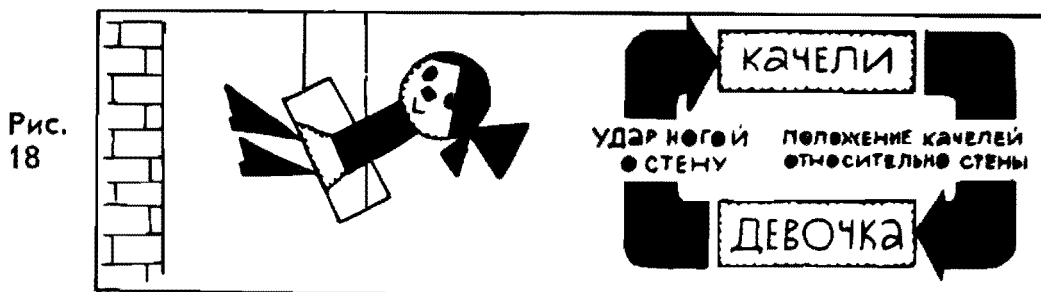


статочно, так как управление имеет всеобщий, а не частный характер. Проиллюстрируем это на одном из рассмотренных выше примеров.

Девочка на качелях может раскачиваться с постоянным размахом только в том случае, если строго определенным образом будет прикладывать усилие. Например, ударяя ногой по стенке, стоящей перед ней. В терминах кибернетики это означает, что на вход колебательного звена периодически действуют импульсы, причем время между импульсами строго равно периоду колебаний звена. В этом случае на выходе будут вот такие незатухающие колебания (рис. 17).



Ударять по стенке следует в строго определенные моменты времени — когда качели приблизились к ней. Источником периодических импульсов является девочка, которая, наблюдая за положением качелей, при приближении к стенке пинает ее. Значит, чтобы колебательное звено (качели) функционировало бы незатухающим образом, необходимо ввести регулятор (девочку), который, получая информацию о состоянии выхода, в определенные моменты сообщал бы импульс (пинок ногой по стенке) на вход колебательного звена. Эта схема показана на рисунке 18.



Именно так устроен электрический генератор — источник периодических колебаний. Роль качелей в нем выполняет электрический контур, который, как показано выше, является колебательным звеном. Девочку в генераторе заменяет регулятор, который преобразует колебания выхода в последовательность импульсов, поступающих на его вход.

Итак, управление имеет универсальный характер и не зависит от физической природы управляемого объекта. Такой всеобщий подход к процессам управления в объектах различного физического содержания впервые сформулировал Норберт Винер, по праву названный «отцом кибернетики».

Так, до появления кибернетики процессы управления в электрическом генераторе рассматривались электротехникой, управление движением часового маятника (качелей) исследовалось в механике, а управление динамикой популяций — в биологии. Н. Винер впервые указал на универсальность управления и показал, что процесс упорядочения объекта (понижения его энтропии) можно производить стандартными приемами, то есть применять методы кибернетики независимо от физических особенностей объектов.

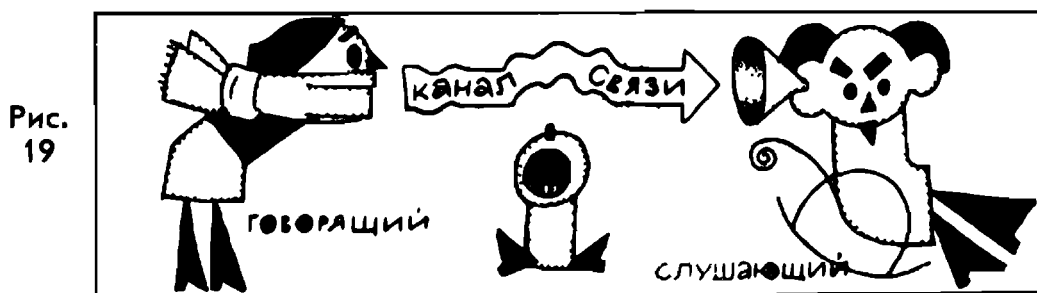
Такие универсальные методы управления находятся пока в самом начале своего развития. В настоящее время в науке происходит то, что называют *кибернетизацией*, то есть применение и использование универсальных методов управления. Методы эти разрабатываются кибернетикой и находят применение в различных областях науки и техники для целей познания и управления.

Последний этап истории управления открывает такие широкие перспективы для развития науки и техники, что Н. Винер по праву назвал его второй промышленной революцией.

Но вернемся к случаю-помехе и борьбе с ним. На этом пути человечество добилось больших успехов. Разработаны и широко применяются различные методы как борьбы с помехой, так и «сосуществования» с нею. В последнем случае принимаются меры к тому, чтобы это сосуществование было бы не столь тягостным.

4. БИТВА СО СЛУЧАЙНОЙ ПОМЕХОЙ

Война, которую ведет человек со случайностью, имеет два фронта. На одном оружием являются средства подавления и уничтожения случайности, как, например, звукоизоляция — защитная мера, препятствующая проникновению шума в вашу квартиру. Другой фронт разрабатывает «мирные» средства сосуществования со случайными помехами. Эти «дипломатические» средства позволяют вырабатывать такие способы поведения, чтобы действующие случайные помехи не очень мешали бы нам. Примером может служить повышение голоса при телефонном разговоре с помехами, повторение отдельных слов и предложений и т. д. Здесь случайные помехи остаются на том же уровне, а специальное поведение в процессе связи позволяет поддерживать связь, несмотря на действие помех.



Для иллюстрации рассмотрим работу простейшего канала связи между двумя говорящими лицами, показанного на рисунке 19. На эту систему воздействуют три вида помех.

Помеха № 1 оказывается помехой передающего. Она проявляется в неправильном произношении слов. Причиной могут быть косноязычие, шепелявенье, глотание окончаний, заикание — все, что называют плохой дикцией.

Помеха № 2 порождается внешней средой — посторонний шум, грохот трамвая, разговор других лиц, плач или смех ребенка и т. д.

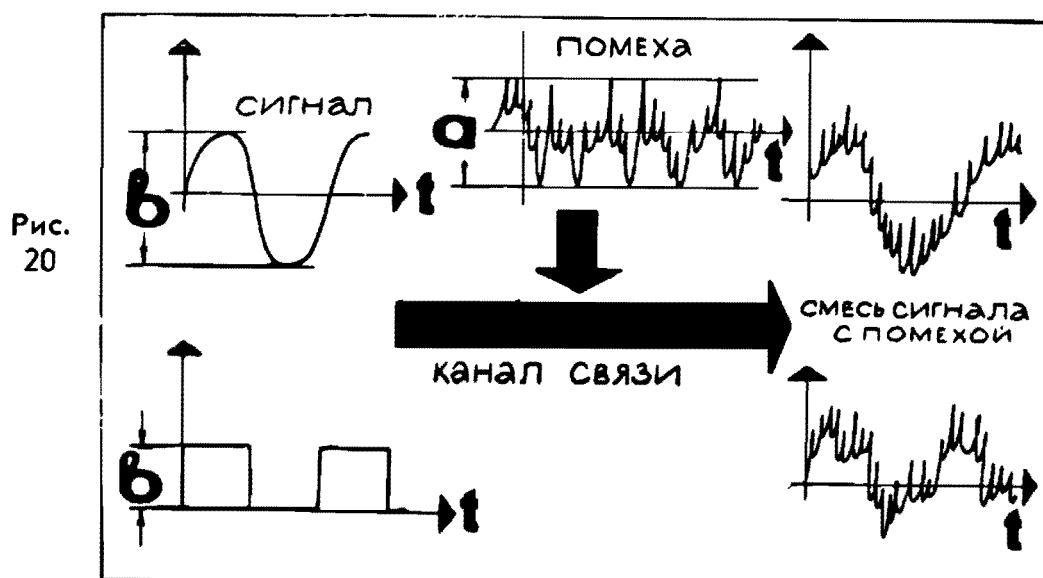
Помеха № 3 характеризует эффективность приемника — в данном случае слушающего. Эта помеха вызывается плохим слухом, плохим знанием языка, плохим зрением (известно, что, глядя на мимику говорящего, его легче понимать), плохим состоянием

нервной системы слушающего (звон в ушах, алкогольное опьянение и т. д.).

Все три помехи воздействуют на эффективность общения (разговора) и при их высоком уровне могут вообще прервать это общение. Мы не будем рассматривать помехи № 1 и № 3, порожденные передатчиком и приемником, так как они уж больно специфичные и зависят от физической сути приемника и передатчика. Для преодоления помехи заикания, скажем, нужно приглашать не специалиста в области кибернетики, а хорошего логопеда. Аналогично при глухоте следует обращаться к врачу. При реализации этой схемы связи на радиоканале этими вопросами должны заниматься радиоспециалисты. А при изучении связи между домашними животными помехи анализирует ветеринар.

Нас будет интересовать помеха № 2, то есть помеха, возникающая в канале связи. Она имеет ту же физическую структуру, что и сигнал, несущий сообщение. Помеха как бы «рядится» под сигнал — иначе нам бы она не мешала. Действительно, при разговоре в трамвае нам мешает грохот его колес и крики кондуктора, а не искрение в токоснимателе. Здесь акустический канал забивается акустическими же помехами. Аналогично на оптический канал связи действуют оптические помехи, а радиоканал забивается радиопомехами.

На рисунке 20 показаны два примера взаимодействия полезного сигнала, который несет информацию,



и случайной помехи. Как видно, помеха сильно искажает полезный сигнал.

Каждый канал связи характеризуется определенной «зашумленностью», то есть искажением сигнала помехой. Чтобы характеризовать эффективность канала, очень удобно ввести меру его зашумленности: какое-то число, которое показывало бы, насколько плохо этот канал пропускает информацию из-за действия помех. Такой мерой зашумленности принято называть отношение $\frac{\text{помеха}}{\text{сигнал}}$. Оно получается делением размаха колебаний помехи (a) на размах колебаний полезного сигнала (b):

$$K = \frac{a}{b}.$$

Эта величина и определяет зашумленность канала. Чтобы хоть как-нибудь представить себе величину этой зашумленности в практических каналах связи, достаточно сказать, что при $K = 1$ разговор прерывается, так как помеха настолько подавляет сигнал, что человек не в состоянии понять смысл сообщения.

Глядя на эту формулу, хорошо видно, что для снижения величины зашумленности имеются две возможности:

а) подавлять помеху a , то есть снижать ее уровень (эта мера и образует первый фронт борьбы с помехой), и

б) увеличивать уровень полезного сигнала или повышать размах b .

В обоих случаях эффективность связи возрастает.

Но вторая возможность (увеличение мощности полезного сигнала) довольно быстро исчерпывается. В самом деле, в разговоре мы в силу устройства нашего голосового аппарата не можем все время кричать, да и крик ограничен по своим возможностям — сколько не кричи, а поговорить с собеседником, находящимся на другом конце города, без телефона не удастся. При работе с радиоканалом интенсивность его ограничена мощностью передатчика и никак не может быть больше. Значит, этот путь для нас следует считать закрытым.

Но есть другой путь — повышать избыточность

сообщения, то есть повторять его, переспрашивать при подозрении, что оно ошибочно, и т. д. Эти меры и образуют второй фронт борьбы со случайными по-
мехами.

Рассмотрим арсенал обоих фронтов.

5. ФРОНТ ПОДАВЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОСТИ

Первой и наиболее эффективной мерой против случая была обратная связь, с которой мы и начнем.

обратная связь

С понятием обратной связи мы впервые познакомились при описании работы демона Максвелла. Этот демон представлял собой управляющее устройство, понижающее энтропию объекта управления (ящика с молекулами) путем «сортировки» молекул по скоростям. Здесь обратная связь заключалась в том, что демон, наблюдая за поведением молекул, манипулировал заслонкой, то есть воздействовал на их распределение по отсекам ящика. Такая обратная связь, как было показано, «оживляла» систему.

Вообще обратная связь заключается в организации определенного воздействия на объект управления. Причем это воздействие строится на основе полученной информации о поведении этого объекта.

В живой природе обратная связь распространена чрезвычайно широко. Можно смело утверждать, что животные и растения существуют за ее счет.

Рассмотрим пример обратной связи, созданной самим человеком для борьбы со случайностью.

Деятельность людей прежде всего направлена на то, чтобы не зависеть от капризов своенравной природы, которые мы вправе считать случайными. Живя в таком случайном окружении, человек прежде всего заботится о том, чтобы стабилизировать на должном уровне свое непосредственное окружение, обеспечить постоянство своего микроклимата независимо от состояния погоды. Именно это заставило его строить жилище и разводить в нем огонь. А разведение согревающего огня является проявлением обратной связи, защитной реакцией человека на холод, которая

направлена на создание приемлемой температуры микроклимата.

В современном жилище функция поддержания постоянной температуры возложена на кондиционер. Как он работает?

Наше жилье является объектом действия двух факторов. Один из них — стихия. Это прежде всего температура воздуха, окружающего наш дом; затем ветер, который ожесточает погоду, и влажность воздуха. Все эти стихийные силы воздействуют на температуру в доме. Если бы стихия была единственным воздействующим фактором, то температура в комнате изменялась бы так же, как и снаружи, разве что с некоторым опозданием. Обратная же связь служит для поддержания температуры в комнате на постоянном уровне. Делается это так: измеряется температура помещения, сравнивается с требуемой, и включается либо выключается нагреватель кондиционера. В этом и заключается обратная связь.

Осуществляет ее регулятор, который командует кондиционером. Получая сведения о температуре от термометра, регулятор сопоставляет ее с заданной температурой и тем самым перерабатывает информацию. Переработав, он осуществляет затем управление, то есть отдает команду нагревателю. В результате удается поддерживать температуру в комнате на заданном уровне независимо от случайного поведения стихии.

Так обратная связь позволяет преодолеть влияние случайного фактора.

Другой мерой борьбы со случайностью является накопление.

семь раз отмерь...

Эта известная поговорка великолепно иллюстрирует применение накопления для целей борьбы со случайными помехами. Известно, что любое измерение происходит с погрешностью. Погрешность имеет случайный характер и препятствует точным измерениям. Всякий измерительный прибор — линейка, часы, термометр и др. — имеет вполне определенную точность, которая зависит от качества изготовления прибора.

Чем выше качество, тем более точные измерения позволяет он сделать. К примеру обычные ручные часы измеряют сутки с точностью до минуты. Хронометр это сделает с секундной ошибкой. А самые дорогие атомные часы ошибаются за сутки лишь на миллионную долю секунды. Как видно, точные измерения требуют дорогих приборов.

А можно ли производить точные измерения на неточных приборах? Или можно ли сделать измерения точнее, чем допускает самый точный прибор?

Можно!

Здесь борьба со случайными погрешностями измерений производится путем многократных измерений и последующего осреднения. Это среднее значение отличается от истинного на величину, меньшую, чем в одном измерении. Другими словами, среднее нескольких измерений всегда точнее одного измерения.

Попробуйте сами проделать простой эксперимент (автор неоднократно проводил его на лекциях, и каждый раз с неизменным успехом). Предложите своим гостям на глаз определить длину какого-либо предмета, например карандаша. Запишите все ответы и определите среднее значение записанных цифр. Полученная величина будет довольно точно совпадать с действительным размером карандаша! Почему это так происходит?

Дело в том, что каждый определил длину карандаша очень грубо, но погрешность такого «измерения» могла в равной мере увеличивать и уменьшать размер карандаша. В результате сложения эти погрешности как бы компенсируют друг друга. И если сумму разделить на число замеров, то результат окажется точнее одного измерения.

Очевидно, что точность при этом возрастает с увеличением числа измерений, и, строго говоря, таким способом можно добиться любой точности.

И все же очень высокой точности добиться путем накопления трудно. Здесь действует закон квадратного корня: точность в результате накопления пропорциональна квадратному корню из числа измерений. Так, для двукратного увеличения точности достаточно четырех измерений, а для того, чтобы точность по-

высить на порядок — в десять раз, — необходимо сделать и усреднить уже сто измерений.

Рассмотрим еще один случай применения накопления.

На некоторых химических предприятиях непрерывно изготавливаемый раствор все время меняет концентрацию, или, как говорят, флуктурует. Эти флуктуации очень сложно зависят от большого числа факторов и могут считаться случайными. Как определить среднюю концентрацию этого раствора за смену, если его химический анализ занимает длительное время?

На первый взгляд следует брать частые пробы, подвергать их химическому анализу и полученные за смену результаты осреднять. Это правильно, но связано с большими затратами. Есть более простое и изящное решение, позволяющее дать ответ путем одного анализа.

Будем периодически отбирать строго одинаковые пробы интересующего нас раствора, но не относить их в лабораторию, а собирать в один бак. За смену в этом баке накопится определенное число таких проб. Теперь достаточно перемешать содержимое и сделать химический анализ. Результаты этого анализа и дают среднюю за смену концентрацию раствора. В данном случае осреднение было произведено в баке путем перемешивания, а один точный химический анализ дал численное значение концентрации осредненного раствора. Подобный способ на производстве называют «баковой пробой».

Итак, для подавления случайных факторов при измерениях можно пользоваться универсальным методом — накоплением, который позволяет значительно снизить влияние случайности на результат измерения.

К накоплению непосредственно примыкает другой способ борьбы со случайной помехой, который носит название *фильтрации*.

фильтрация

В обыденной жизни под фильтрацией понимается отделение интересующей нас жидкости от всяческих нежидких примесей — помех. Для этого смесь пропускают через фильтр, который представляет собой

мелкую сетку, задерживающую твердую фазу. Значит, фильтрация есть разделение смеси на две ее составляющие: жидкую и твердую.

И вот эта очень ходовая в быту операция перекочевала в радиосвязь, а затем в радиолокацию. Разумеется, здесь фильтруют не яблочный сок, а радиосигналы.

Известно, что в каналах связи — в проводах при телефонии и в атмосфере при радиосвязи — действуют электрические помехи, которые попадают в канал и смешиваются с полезными сигналами. Эти помехи бывают естественного и искусственного происхождения.

Естественные помехи порождаются атмосферным электричеством и особенно разрядами молний. Кому приходилось включать радиоприемник во время грозы, тот хорошо помнит сухой треск молний, принятых антенной радиоприемника.

Искусственные помехи являются результатом искрения различных технических и бытовых электроаппаратов — электросварки, неисправных электромоторов, трамваев и троллейбусов и т. д. Они порождают маленькие молнии, которые и засоряют наши каналы связи.

Эти случайные помехи складываются с полезными сигналами и образуют весьма «неаппетитную» смесь, в которой очень часто нельзя разобраться. Именно поэтому научная борьба с помехами началась с рождения радио.

Что значит бороться с помехами? Чтобы разобраться в сообщении, нужно прежде всего определить полезный сигнал, отфильтровать его от случайных помех. Эта задача возлагается на электрический фильтр, выделяющий полезный сигнал из смеси помех и полезного сигнала. На вход этого фильтра подается указанная смесь, а на его выходе должен появиться отфильтрованный сигнал. Такова идея фильтрации.

Но до появления радиолокации проблема выделения полезного сигнала не стояла столь остро. Для целей связи можно было допустить избыточность сообщения, например многократно его повторить, и тем самым повысить надежность канала связи в условиях помех. Радиолокация — определение положения

предметов по радиосигналу, отраженному от этого предмета, — потребовала особенно тщательной фильтрации ввиду того, что отраженный сигнал всегда в миллионы раз слабее основного сигнала, излучаемого передатчиком. Дело в том, что отражение происходит во всех направлениях и отраженный сигнал рассеивается чрезвычайно быстро. Именно поэтому антенны радиолокаторов, предназначенные для приема отраженного сигнала, делаются как можно больше.

Этот эффект быстрого рассеяния можно проиллюстрировать на следующем простом опыте. В солнечный день поставьте рядом большой металлический шарик от бильярда или шарикоподшипника и таких же размеров зеркальце. Если такого зеркала не найдется, то возьмите любое и заклейте его черной бумагой, оставив дырочку размером в шарик. Шарик будет служить моделью цели для радиолокатора, солнце — моделью радиолокатора, а ваш глаз моделью антенны радиолокационного приемника. Осталось зеркальце. Оно моделирует идеальный отражатель, который отражает весь сигнал почти без рассеяния. (В действительности зеркало так же рассеивает, но доля этого рассеяния в данном эксперименте мала и может не приниматься во внимание.)

Расположим зеркало и шарик на уровне наших глаз так, чтобы отраженный зеркальцем луч шел горизонтально и его можно было бы всегда увидеть. Теперь начнем отходить от зеркала и шарика, все время находясь в луче зеркала. Пройдя несколько шагов, мы заметим, что солнечный зайчик от зеркала почти не изменил своей яркости, а блика от шарика почти не видно. Вскоре он совсем затеряется и не будет виден глазом, в то время как зеркальце будет по-прежнему ярко сиять.

Точно так же теряется отраженный от самолета сигнал радиолокатора. И чем он меньше, тем легче забивается помехами, которые в обилии имеются как в атмосфере, так и в самом приемнике. Но этого мало. Противник, обнаружив, что его облучает радиолокатор, принимает противомеры и имитирует помехи с целью затруднить работу приемника локатора.

Таким образом, отраженный сигнал, принимаемый локатором, так мал, а помехи так велики, что только

очень надежная фильтрация дает возможность радиолокатору выполнять свои функции.

Как же выделять сигнал?

Существует несколько способов фильтрации. Рассмотрим некоторые из них.

осредняющий фильтр

Этот вид фильтрации использует описанную выше процедуру осреднения в течение некоторого промежутка времени T . Работает он следующим образом.

Если на вход подобного фильтра подать какой-то сигнал, то на его выходе в момент времени t_1 появится сигнал, равный средней величине входного сигнала в промежутке времени от $t_1 - T$ до t_1 . На рисунке 21 хорошо видно, что такой фильтр является сглаживающим. Этому следовало ожидать, так как всякое осреднение «сглаживает», нивелирует полученную информацию, что и дает возможность избавиться от помех в виде случайных «дрожаний». Помехи дрожания в радиотехнике называют белым шумом — он является смесью различных колебаний, так же как белый свет получается от смешения различных цветов.



Однако осреднение не только позволяет избавиться от помехи типа белого шума, но и искажает основной сигнал. Эти искажения приводят к тому, что сигнал как бы «размазывается» во времени. Чем он короче, тем сильнее искажается фильтром, так как фильтр охотнее всего срезает дрожания, а короткий сигнал очень похож на одно вздрагивание помехи.

Следовательно, осредняющий фильтр, избавляя полезный сигнал от случайных помех, искажает его тоже.

Этот недостаток отсутствует в корреляционном фильтре.

Но прежде чем рассказывать о нем, выясним, что такое *корреляция*.

корреляция

Слово «корреляция» обозначает наличие взаимосвязи. Если два явления чем-то объединены друг с другом, каким-то образом взаимосвязаны, то говорят, что они коррелированы. Определить корреляцию — это значит частично избавиться от случайности.

Рассмотрим понятие корреляции на следующем примере. Известно, что, просматривая семейные альбомы, следует на радость хозяевам угадывать близких родственников. Доставить приятные минуты хозяевам достаточно легко, ибо близкие родственники, как правило, похожи друг на друга, их лица коррелируют. Будем выражать эту «похожесть» для двух фотографий в виде числа K , расположенного между нулем и единицей. Причем договоримся, что нуль обозначает, что лица на фотографии совсем не похожи, а единица — что они совпадают полностью, как близнецы. Все промежуточные значения этого коэффициента «похожести» характеризуют различную степень близости сравниваемых лиц. А так как «похожесть» характеризует взаимосвязь, то естественно коэффициент K назвать коэффициентом корреляции.

Но как выяснить значение коэффициента корреляции? Воспользуемся накоплением, о котором говорилось выше.

Возьмите три фотографии: сына, отца и деда (желательно в одном возрасте, чтобы не смущала борода дедушки и вихор внука), и попросите своих знакомых оценить степень «похожести», то есть величину коэффициентов корреляции всех трех фотографий, по следующей шкале:

| | |
|------------------------|-------------|
| совпадают | $K = 1,$ |
| очень похожи | $K = 0,75,$ |
| похожи | $K = 0,5,$ |
| мало похожи | $K = 0,25,$ |
| не похожи | $K = 0.$ |

Результаты следует свести в таблицу, которая может выглядеть так.

| № отзывов | Сын — отец | Отец — дед | Сын — дед |
|------------|------------|------------|-----------|
| 1 | 0,75 | 0,5 | 0,5 |
| 2 | 0,75 | 0,75 | 0,25 |
| 3 | 0,25 | 0,5 | 0,5 |
| 4 | 0,5 | 0,75 | 0,5 |
| 5 | 0,75 | 0,75 | 0,5 |
| 6 | 0,5 | 0,5 | 0,25 |
| среднее... | 0,58 | 0,64 | 0,37 |

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что сын похож на отца так же, как отец на деду (0,58 примерно равно 0,64). Этого следовало ожидать, так как в обоих случаях рассматривается связь между сыном и отцом (отец по отношению к деду относится как сын к отцу).

А теперь построим зависимость коэффициента корреляции от поколений. Пусть N — номер поколения, причем будем для будущего считать N положительным, а для прошлого — отрицательным. Так, $N = 0$ — это мое поколение, $N = 1$ — это поколение моих детей, $N = 2$ — поколение моих внуков, $N = -1$ — поколение моих родителей, $N = -2$ — поколение моих дедушек и бабушек.

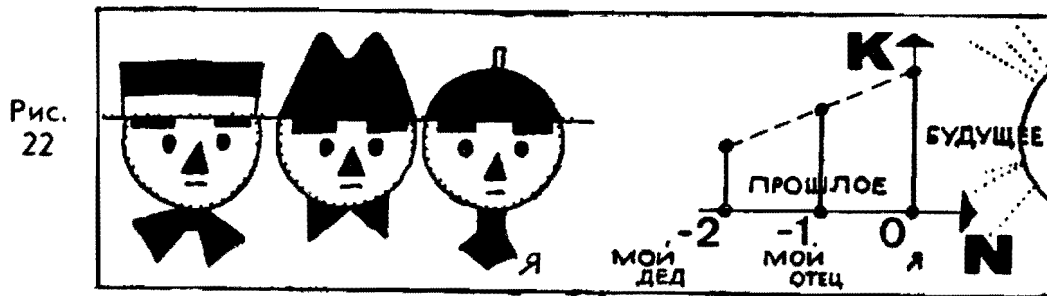
Будем обозначать коэффициент корреляции нулевого поколения с N -м в виде $K(N)$, что выражает, насколько я похож на N -е поколение. Очевидно, что $K(N)$ имеет следующее свойство:

$$K(N) = K(-N),$$

означающее, что я так же похож на N -е поколение, как N -е поколение на меня.

Будем сначала рассуждать относительно сына (сын — это я). Нулевое поколение ($N = 0$) — это я сам; в этом случае, коэффициент корреляции равен

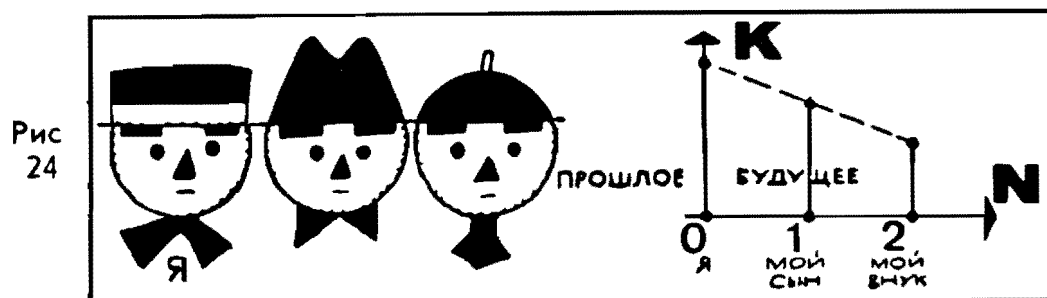
единице (предельно большое значение), так как я больше всего похож только на самого себя. Мой отец ($N = -1$) коррелирован со мной на 58 процентов ($K = 0,58$), а мой дед — на 37 процентов ($K = 0,37$). Поэтому график корреляции меня с моими предками имеет вид, указанный на рисунке 22.



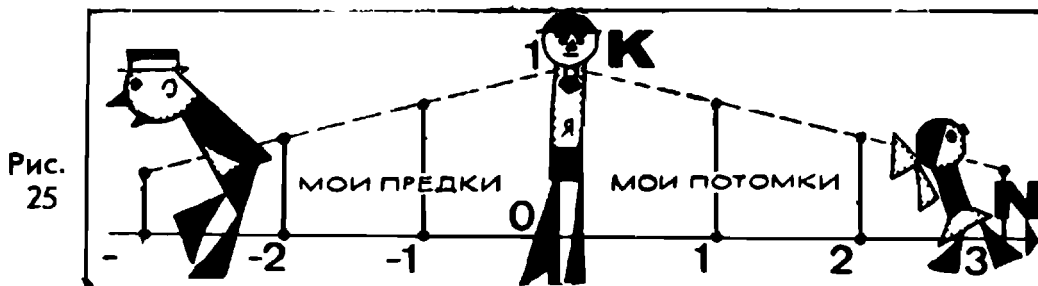
Рассмотрим все относительно отца (теперь я — это отец). Я коррелирован с сыном на 58 процентов, а с отцом — на 64 процента, и мою связь с поколениями отражает график рисунка 23.



Пусть теперь я — дед. Тогда график корреляции с моими потомками имеет вид, показанный на рисунке 24.



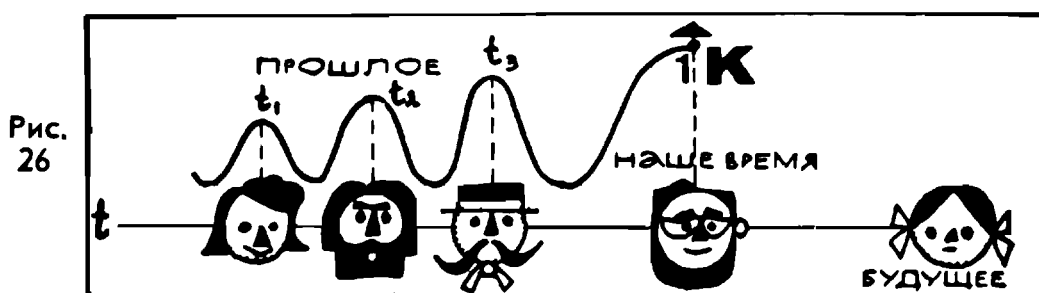
Внимательно присмотревшись к этим графикам, легко заметить, что они оказываются кусками одного и того же графика преемственности поколений, показанного на рисунке 25. Этот график симметричен и



означает, что процесс унаследования внешних черт одинаков как в прошлом, так и в будущем. При очень больших значениях N , то есть в далеком будущем, $K = 0$. И действительно, мои отдаленные потомки не будут похожи на меня — это довольно логичный вывод, которому трудно возразить. Аналогично ведет себя график при больших отрицательных N , выражающий очевидную истину, что мои отдаленные предки и я совсем не похожи друг на друга.

Зависимость коэффициента корреляции от времени, рассмотренная выше, носит название *корреляционной функции*. Она очень распространена и полезна при изучении явлений нашего случайного мира, так как показывает взаимосвязь случайных процессов от времени.

Например, капризы моды в одежде совсем не случайны, а строго коррелированы. Можно построить корреляционную связь современной одежды с одеждой прошлых времен. Она имеет характерный график, приведенный на рисунке 26, с несколькими пиками.

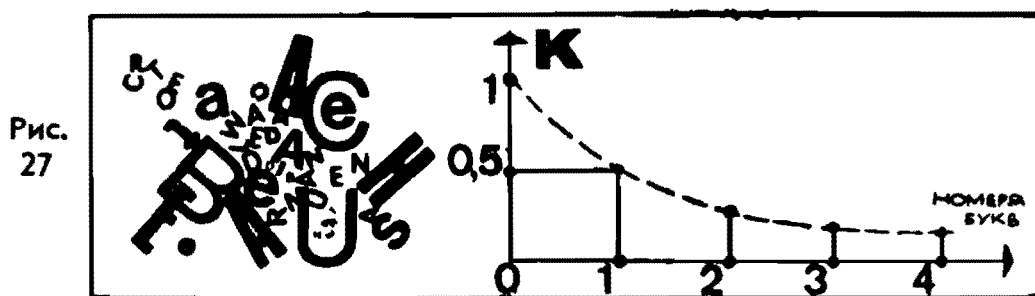


Пики показывают существование связи современной моды с модой прошлых лет, отстоящих от нас на t_1 , t_2 и t_3 лет. Опытные модельеры хорошо знают эту связь и черпают вдохновение в старых журналах мод. Они работают по принципу: «Новое — это хорошо забытое старое», который и приводит к подобным колебаниям моды.

много ли информации в словах?

Любопытно применение корреляционного метода к анализу взаимосвязанности букв в слове и слов в фразе. Давайте определим корреляцию между буквами в отдельных словах и между словами в отдельных предложениях.

Проведем простой эксперимент. Возьмите наугад десяток-полтора слов и попросите кого-нибудь угадывать последовательно каждую следующую букву слова. Если бы между буквами не было никакой связи, то коэффициент корреляции (относительное число угадываний) был бы близок к нулю. А опыт показывает, что число угадываний большое и в среднем составляет более 50 процентов всех попыток. Это означает, что буквы в словах связаны между собой ярко выраженной корреляционной зависимостью. Она показана на рисунке 27.



Наличие корреляции делает наш язык избыточным и позволяет довольно легко угадывать слова даже при большом числе ошибок и описок. Указанная избыточность является хорошей защитой от действия случайных помех. Так, получив телеграмму со словами «...целую лампочку», довольно легко догадаться, что корреспондент хочет поцеловать «лапочку», а не «лампочку».

Если проделать тот же эксперимент со словами в фразе, то результат (вероятность угадывания) получится не столь сильным, но вполне чувствительным. Вероятность угадывания слова в среднем русском тексте равна примерно $1/10$, то есть угадывается примерно одно из десяти слов.

Эта величина, правда, колеблется в значительных

пределах для различных текстов. Так, специальная литература имеет очень большую избыточность, которая и облегчает ее беглый просмотр и чтение на незнакомом языке. Особо избыточны разговоры по радио между пилотом и дежурным на аэродроме. Здесь подобная избыточность связана с тяжелыми или даже трагическими последствиями ошибок, вероятность которых при высокой избыточности крайне мала. Наименьшую избыточность, то есть наименьшую корреляцию между словами, имеет язык художественных произведений за счет нестандартности, яркости и неожиданности речи писателей.

Интересно сравнить избыточность написанного текста и живой устной речи. Оказывается, последняя имеет бóльшую избыточность, чем письменная речь. Действительно, в разговоре всегда много повторений, меньше заботы о «красоте стиля» и много «лишних слов», дающих говорящему возможность обдумать, что сказать дальше.

Но живая речь обладает возможностями, недоступными письменной. Она позволяет сообщать дополнительную информацию в виде ударений, в интонации, в индивидуальной особенности голоса. Эта дополнительная информация может составлять 50—70 процентов «смысловой информации», что понижает избыточность устной речи. Так, фраза «Что ты сделал?» в зависимости от постановки ударения может иметь различный смысл.

Рассмотрим теперь применение корреляционных зависимостей к фильтрации полезного сигнала из смеси полезного сигнала и случайной помехи.

корреляционный фильтр

Существенной особенностью этого фильтра является использование информации о форме принимаемого полезного сигнала. (Осредняющий фильтр не использует подобную информацию.) Сведения о форме полезного сигнала несут очень большую информацию и помогают довольно надежно выделять сигнал.

Известно, что нельзя, или, во всяком случае, не эффективно, ходить в лес за грибами и ягодами одновременно, хотя многие любители именно так и посту-

пают. Ни того, ни другого не найдешь. Когда мы что-либо ищем, то это «что-либо» есть конкретная вещь с конкретными свойствами. Здесь знание свойств этой вещи помогает быстро ее найти. Если же искать сразу две и больше вещей с разными свойствами, то подобный поиск неэффективен. Лучше сначала искать и найти одну, потом перейти к отысканию другой и т. д.

По утверждению моей жены, поиск фасонов в журнале мод также следует производить последовательно. Сначала перелистать его с целью найти подходящее вечернее платье, затем начать поиск пляжного костюма и т. д. Если же искать сразу все, то, даже многократно перелистав журнал, рискуешь ничего не найти.

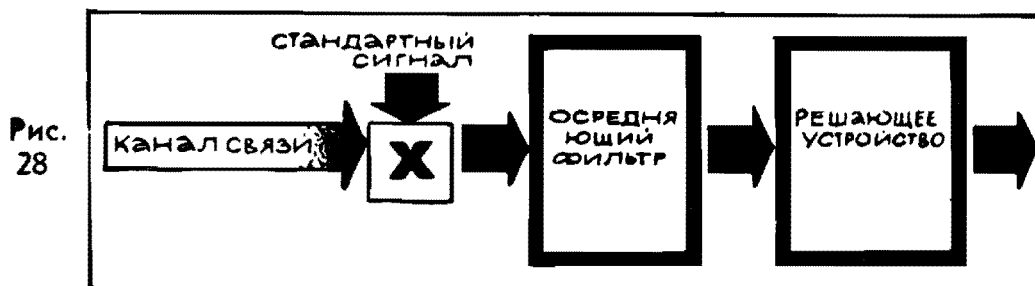
Но вернемся к корреляционному фильтру. Идея корреляционного способа проста и изящна: определяется коэффициент корреляции между принятым сигналом и тем сигналом, который должен быть принят, — назовем его стандартным (сведения о нем заложены в фильтр). Если этот коэффициент велик, что означает наличие корреляции между принятым сигналом и стандартным, то между ними есть взаимосвязь и в принятом сообщении содержится полезный сигнал.

В противном случае, когда коэффициент корреляции мал, полезный сигнал отсутствует.

Как же определить коэффициент корреляции принятого и стандартного сигналов?

Для этого достаточно их перемножить и результат осреднить, то есть пропустить через осредняющий фильтр, выход которого в данном случае определяет коэффициент корреляции. Останется принять решение, считать ли этот коэффициент большим, и, соответственно, признать, что в принятом импульсе содержится полезный — стандартный — сигнал, или считать этот коэффициент малым и решить, что в полученном сообщении нет полезного сигнала. Это выполняет решающее устройство, работа которого будет рассмотрена позже.

Схема корреляционного фильтра показана на рисунке 28. Здесь блок произведения перемножает принятый и стандартный сигналы, а на выходе решаю-



шего устройства сигнал появляется лишь в том случае, если полученный коэффициент корреляции велик.

Чтобы разобраться в том, как работает корреляционный фильтр, рассмотрим несколько примеров. Они показаны в таблице на рисунке 29, откуда хорошо видно, как применение операции умножения позволило избавиться от значительной части помех. В этом и состоит преимущество корреляционного приема.

Рис. 29

| | | принятый сигнал | стандартный сигнал | их произведение | после осреднения | решения |
|-----------|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|---------|
| БЕЗ ПОМЕХ | Есть полезный сигнал | | | | | 1 |
| | Нет полезного сигнала | | | | | 0 |
| СПОМЕХАМИ | Есть полезный сигнал | | | | | 1 |
| | Нет полезного сигнала | | | | | 0 |

Корреляционный прием информации чрезвычайно распространен в жизни, и мы широко им пользуемся. Действительно, знание сигнала, который предстоит принять, является не чем иным, как ожиданием этого сигнала; и тогда пропустить его почти невозможно. Известно, как важен «внутренний настрой» на прием определенной информации. Отыскивая в толпе приятеля, мы можем встретить и не узнать множество других знакомых, а нужного нам человека увидим еще

издали. В этом и состоит существо корреляционного приема, который отфильтровывает помехи ради получения ожидаемой информации. Ведь знакомые в данном случае были помехой, затрудняющей отыскание ожидаемого лица, и наш внутренний корреляционный фильтр их «срезал».

6. СОСУЩЕСТВОВАНИЕ СО СЛУЧАЙНОЙ ПОМЕХОЙ

Выше было показано, что всякое подавление случайных помех не может «додавить» их до конца. Всегда останутся случайные искажения, с которыми необходимо считаться. Значит, наш трижды случайный мир даже после подавления случайности останется, хотя и в меньшей мере, но все же случайным.

Естественно задать вопрос: а можно ли в таком неизбежно случайном мире получать очень точную информацию и совершать очень точные поступки? Коротче, можно ли в обстановке помех действовать с малым и очень малым числом ошибок? Или мы обречены на безрадостную жизнь с постоянно высоким уровнем промахов?

Ответ на этот вопрос уже дала история развития человечества, история развития средств общения — языка и письма. Очевидно, что в мире, где действуют случайные помехи (неслучайные помехи не страшны — к ним всегда можно приспособиться и тем самым отключить), стихийно, в процессе эволюции, человечество *должно* было создать средства надежного общения, которые позволили бы осуществлять почти безошибочную связь между членами общества. Таким универсальным средством является *избыточность*, о которой мы уже упоминали выше.

Что такое избыточность при организации канала связи?

Это прежде всего такая система кодирования сообщений, при которой ошибки, допущенные при передаче или приеме, могут быть исправлены.

Существует два подхода к решению этой задачи. В одном подходе предлагается к передаваемому сообщению добавлять контрольный знак, позволяющий

проверить правильность приема этого сообщения. Если допущена ошибка и по контрольному знаку обнаружена, то принимающий переспрашивает передающего и просит повторить тот кусок сообщения, в котором обнаружена ошибка. Такие системы связи носят название *связи с переспросом*.

Примером подобной связи является телеграф. Например, в обычной телеграмме всегда указывается число слов. Его можно использовать как контрольный знак, позволяющий хотя и грубо, но проверить правильность телеграммы. Действительно, пересчитав число слов в телеграмме и сравнив ее с контрольной суммой, легко проверить эффективность работы телеграфной связи. Если число слов окажется меньше контрольной суммы, то ясно, что в телеграмме потеряны слова. Правда, такая проверка очень груба и не дает возможности отличить две разные телеграммы с одинаковым числом слов. И все же это проверка.

Другой подход к решению задачи о надежной связи заключается в создании специального кода, который позволял бы не только обнаруживать ошибки, но и самостоятельно исправлять их, не запрашивая пункт передачи сообщения. Такой код называется *самокорректирующимся*, или *кодом с исправлением ошибок*.

Примером его может служить обычный человеческий язык, позволяющий исправлять орфографические ошибки сообщения без обращения к тому, кто передал сообщение, а возможно, и сделал ошибку. Приняв, допустим, сообщение — *карова*, можно смело исправлять его на *корову*, но для этого корректирующее устройство должно быть знакомо с грамматикой, правилами и исключениями русского языка.

Рассмотрим каждый способ в отдельности.

канал с переспросом

Основной задачей здесь является обнаружение ошибки, поскольку сам по себе «переспрос» не представляет трудности. Каким же образом можно закодировать сообщение, чтобы иметь возможность обнаружить ошибку?

Будем рассматривать так называемый двоичный

код, в котором имеется только два символа 0 и 1. Пусть 0 соответствует отсутствию сигнала в канале связи (пауза), а 1 соответствует сигналу. (Заметим, что известный код Морзе — знаменитая азбука Морзе — типичный пример троичного кода, состоящего из трех символов: точка, тире и пропуск).

Всякий код состоит из блоков с одним и тем же числом символов. Например, для кодирования русского алфавита можно предложить блок из пяти символов:

$A = 00001$

$B = 00010$

$B = 00011$

$\overset{\cdot}{\text{Э}} = 11101$

$\overset{\cdot}{\text{Ю}} = 11110$

$\overset{\cdot}{\text{Я}} = 11111$

Этот код полностью лишен избыточности.

Действительно, сообщение «ЭВА ЯВА», которое кодируется следующим образом: «11101 00011 00001 11111 00011 00001», теряет смысл при наличии хотя бы одной ошибки. Это означает, что при подобном кодировании ошибки не выявляются. Как повысить избыточность этого кода, чтобы суметь исправлять допущенные ошибки?

Первый пришедший в голову простейший прием заключается в дублировании, то есть предлагается каждый сигнал повторять дважды. В таком дублированном коде то же сообщение будет выглядеть так:

«1111110011 0000001111 0000000011
1111111111 0000001111 0000000011»

Эта мера действительно даст возможность выявить ошибку, если будет замечено, что в такой-то паре сигналов символы не совпадают. Но тогда понадобилось бы удвоить число символов. А это слишком дорогая плата за повышение надежности сообщения. Давайте прикинем, что дает дублирование.

Эффективность введенной избыточности естественно характеризовать двумя числами:

1. Числом (или процентом) неисправленных и пропущенных ошибок.

2. Удлинением кода (в процентах).

Очевидно, что для хорошего кода оба этих числа должны быть достаточно малыми.

В случае простого дублирования удлинение кода равно 100 процентам (код удваивается).

Теперь определим число пропущенных ошибок при дублировании.

Пусть помехи в канале связи изменяют передаваемый символ на обратный (вносят ошибку) в среднем в одном символе из ста. В этом случае говорят, что канал связи работает с вероятностью ошибок, равной одной сотой ($1/100$).

Ошибка при дублировании останется не замеченной только в том случае, если изменятся на обратный оба символа — основной и дублирующий. Вероятность того, что один из них будет передан неверно, равна $1/100$.

Но одиночная ошибка будет немедленно исправлена после переспроса. Команда на переспрос появится, как только основной символ и его дублирующий не совпадут. Если же оба символа совпадают, то переспроса не последует и ошибка будет пропущена.

Очевидно, что это событие (две ошибки подряд) встречается значительно реже, чем одна ошибка, — в данном случае в сто раз реже. Следовательно, при дублировании из ста ошибок в среднем лишь одна будет пропущена, а остальные исправятся. Итак, в рассмотренном примере дублирование уменьшает процент ошибок в сто раз. Это очень хорошо. Но получено это слишком дорогой ценой — двукратным увеличением длины кода.

Поэтому простое дублирование текста сообщения хотя и применяется, но не является оптимальным способом повышения избыточности. Рассмотрим другой, более экономный способ.

Будем добавлять к блоку еще один символ, равный единице, если сумма чисел этого блока равна нечетному числу, и нулю, если эта сумма четна (нуль

тоже четное число). Тогда для рассмотренного выше примера получим:

Для буквы A : $0+0+0+0+1=1$ — нечетное число, поэтому новый блок имеет вид $A = 000011$.

Для буквы B : $0+0+0+1+1=2$ — четное число, следовательно, новый блок для B запишется так:

$$B = 000110.$$

Тогда новый код принимает вид:

$$A = 000011$$

$$B = 000101$$

$$B = 000110$$

$$\dot{\mathcal{E}} = 111010$$

$$\mathcal{Ю} = 111100$$

$$\mathcal{Я} = 111111.$$

Данный код уже имеет так называемую контрольную сумму (последний символ каждого блока). Эта сумма и позволяет проверить правильность передачи сообщения путем проверки каждого блока на четность и сопоставления результата с контрольной суммой.

Помехи в канале связи или в приемном и передающем устройствах могут изменить символ на обратный, то есть 0 сделать 1 или наоборот 1 сделать 0. Как легко убедиться, указанная выше проверка на четность позволяет выявить одиночную ошибку, поскольку она изменяет четность. Если же в одном блоке произошло две ошибки, то четность не изменится и ошибка не будет замечена. Аналогично три ошибки в блоке дадут сигнал на переспрос и исправление ошибки, а четыре пройдут незамеченными и т. д.

Следовательно, проверка на четность позволяет выявить не все ошибки. Часть из них так и останется незамеченной. Естественно определить: а велика ли эта часть? Какой процент ошибок не удастся выявить при таком способе введения избыточности?

Давайте определим процент пропущенных ошибок при кодировании с контрольной суммой. Пусть, как и в предыдущем случае, канал связи передает каждый символ с вероятностью ошибки, равной $1/100$ (в сред-

нем одна ошибка на сто правильно переданных символов).

Рассмотрим один блок. Теперь он состоит не из пяти, а из шести символов — добавлена контрольная сумма, которую тоже нужно правильно передавать. Пусть в этом блоке один символ был передан неправильно. Тогда, если все остальные символы, включая контрольную сумму, будут переданы правильно, то четность нарушится. Это немедленно установит контрольное устройство и отдаст команду на переспрос, в результате чего ошибка будет устранена.

Если же один из остальных пяти символов тоже был передан ошибочно, то четность не нарушится и ошибка будет пропущена. Как часто это будет происходить?

Если вероятность ошибки в одном символе равна $1/100$, то вероятность ошибки в одном из пяти символов будет примерно в пять раз больше. Действительно, число возможностей для ошибок увеличивается, а значит, соответственно увеличивается и вероятность ошибки, которая в этом случае равна $1/20$ (одна повторная ошибка в том же блоке на двадцать одиночных).

Это означает, что число ошибок при подобном введении избыточности уменьшается примерно в 20 раз.

Следовательно, проверка на четность дала в этом случае возможность повысить эффективность кода в 20 раз! Соответственно в 20 раз снижена роль случайных помех. Причем, как видно, никаких попыток снизить уровень помех в данном случае не производилось. Канал связи остался тем же, с той же одной ошибкой в среднем на сто передаваемых символов. Этот великолепный результат получен только за счет эффективного кодирования, то есть за счет введения проверки блоков кода на четность. Длина кода при этом возросла лишь на 20 процентов (один добавочный символ на пять символов одного блока).

Рассмотренные методы введения избыточности позволяют ценой некоторого удлинения кода значительно повысить его надежность и эффективно использовать при передаче сообщений по каналам связи, в которых действует случайная помеха.

Полезность применения такого рода избыточности

для передачи телеграфных сообщений очевидна. Но этот метод может быть использован и в других ситуациях, внешне ничем не похожих на телеграфную задачу. Так, одним из приложений избыточности могут служить современные быстродействующие вычислительные машины.

Обильную пищу для введения избыточности предоставляет эксплуатация вычислительных машин. Необходимость избыточности здесь диктуется двумя «шумящими» факторами:

1) человеком, обслуживающим машину, и 2) ненадежностью самой машины.

Чтобы понять, почему «шумный» (ошибающийся) человек, обслуживающий вычислительную машину, может повлиять на эффективность работы машины, рассмотрим, как вводится информация в современную вычислительную машину?

Для решения поставленной задачи, в вычислительную машину необходимо ввести информацию о том, «как считать» и «что считать».

Первый вопрос связан с созданием программы работы машины для решения поставленной задачи и с введением этой программы в вычислительную машину в виде определенных числовых кодов типа тех, избыточность которых рассматривалась выше.

Так, например, чтобы решить уравнение $ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0$ на универсальной вычислительной машине, необходимо составить программу работы этой машины (как считать) и ввести ее в машину. Вторая категория информации, вводимой в машину, отвечает на вопрос «что считать» и составляет все исходные данные для необходимого расчета. Так, в указанном примере исходными данными являются заданные значения коэффициентов этого уравнения, то есть числа a, b, c, d, e .

Вся эта информация может вводиться в машину различными способами. Ее могут вводить оператор, перфолента и перфокарта.

Оператор на пульте — это самый неэффективный способ введения информации в машину, поскольку оператор работает слишком медленно.

Перфолента — так называется бумажная или целлулоидная лента с дырочками (перфорацией), кото-

рые несут в определенном коде необходимую информацию в машину. Каждая дырка соответствует единице кода, а ее отсутствие — нулю этого кода. Эту ленту вставляют в специальное «Устройство ввода» вычислительной машины, где она протаскивается с большой скоростью между рядами лампочек и фотоэлементов. Каждая дырка перфоленты, проходя мимо фотоэлемента, пропускает световой импульс, который и вызывает соответствующий ему импульс тока в фотоэлементе. Так, в машину вводится «1» кода. «0» получается при отсутствии импульса.

Это очень эффективный способ введения информации в машину, так как перфоленту можно протаскивать с большой скоростью через вводное устройство.

И наконец, перфокарты — бумажные карты (разом в три больше обычных игральных) — с дырками, при помощи которых кодируется информация. Колода перфокарт и несет в себе все необходимые для расчетов сведения. В настоящее время перфокарты являются наиболее эффективным способом введения информации в машину. Дело тут в том, что перфокарту устройство считывает сразу всю целиком, что значительно убыстряет ввод информации в машину. С другой стороны программу на перфокартах очень удобно переделывать — для этого достаточно заменить одну-две перфокарты на новые. Перфоленту в этом случае нужно клеить, и клеить очень аккуратно, так как ей предстоит с большой скоростью двигаться во вводном устройстве.

Всем хороши перфокарты! Но...

Тут есть одно но...

печальный рассказ со счастливым концом

Все дело в том, что дырки на перфокартах делаются, так сказать, при непосредственном вмешательстве «человеческого разума». Чаще всего их пробивают милые тихие девушки, обычно выпускницы средних школ, и их интересует все, что должно интересовать молодых девушек в их юном возрасте. Они сидят за перфоратором (прибором для пробивания дырок в перфокарте, который умеет делать дырки, но

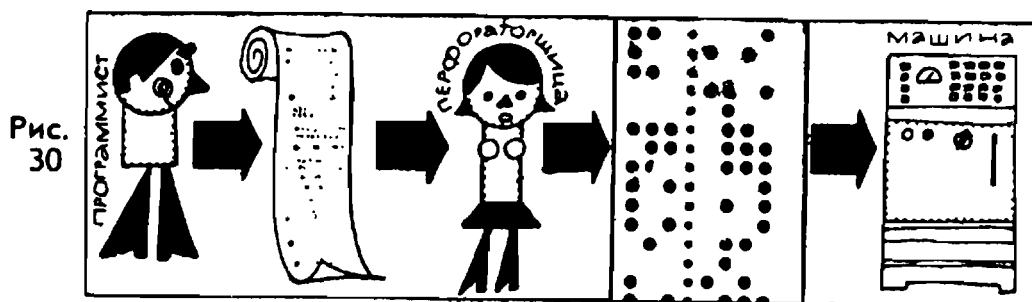
не знает, где их поставить), смотрят в программу, написанную программистом (тоже грешным человеком), и нажимают на клавиши аппарата, пробивая тем самым отверстия в перфокарте.

Поскольку эта работа очень монотонная, то девушки обычно переговариваются между собой на всякие темы. Время от времени из перфоратора выпадает готовая перфокарта, которая несет необходимую для машины информацию и... ошибки.

Если взять эти перфокарты и ввести в машину (так это и делается), то жизнь оператора и программиста сразу окрасится в мрачные тона (так это и бывает). Все кажется в порядке — программа проверена несколько раз, машина работает превосходно (все тесты выполнены без ошибок), а задача не идет!

А виной всему симпатичная девушка-перфораторщица, которая и забыть позабыла про эту задачу, сейчас она набивает новую, обсуждая новый фильм и делая новые ошибки.

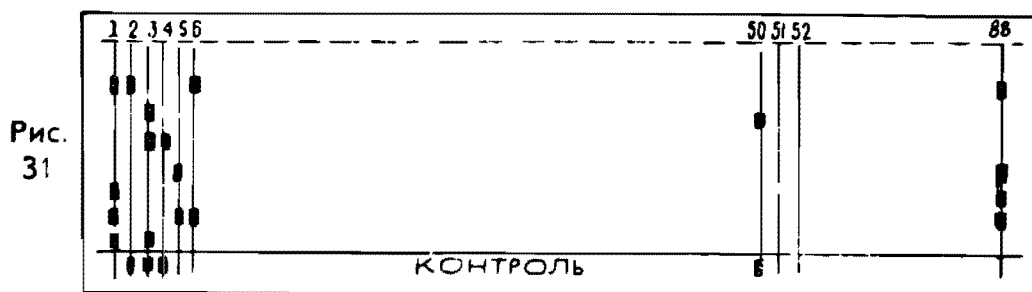
Если внимательно присмотреться к этой ситуации, то нетрудно заметить, что наша девушка является каналом связи между написанной от руки программой и машиной (рис. 30). Причем канал этот имеет собственные случайные помехи, которые трудно подавить (если вы ее отругаете — она расплачется, а не дадите премии — уйдет). Вот и приходится мириться с этим источником случайных ошибок в перфокартах и выявлять их при отладке программы на машине. А это очень тяжелая задача.



Но если всему виной канал связи с помехами, которые нельзя отфильтровать, то не воспользоваться ли изложенным выше способом кодирования с проверкой на четность? Ведь он позволяет выявить прак-

тически почти все ошибки, возникающие в канале связи!

Так пришли к выводу, что нужно ввести проверку на четность в самой перфокарте. Чтобы понять, как это сделать, рассмотрим одну перфокарту. Состоит она обычно из 88 вертикальных колонок. В колонках пробиваются отверстия (рис. 31), которые в определенном коде (не важно каком) несут информацию.



Последняя строка перфокарты контрольная. В ней делается дырка, если сумма дырок в соответствующей колонке нечетная, и не делается — если соответствующая сумма дырок четна. Контрольная строка заранее определяется программистом и записана им в программе.

В перфоратор встроено несложное устройство, которое делает проверку указанных блоков — колонок на четность, точно так же, как было показано выше.

Если проверка не оправдывается: сумма четна, а на контроле дырка — или наоборот, — то включается звонок, извещающий о том, что кем-то (программистом или перфораторщицей) допущена ошибка.

Выяснить, кто виноват, довольно легко: нужно просто вычислить, а затем либо молча перебить перфокарту, либо устроить скандал программисту, который не сумел отличить четное число от нечетного.

И все довольны! Доволен программист — ему не нужно искать чужих ошибок в программе; довольна девушка — ее больше не ругают и даже дали возможность высказываться в адрес программиста; доволен оператор — не нужно обуздывать «одичавшую» машину; доволен и дежурный инженер — меньше упреков в адрес машины, а то чуть что — и все валят на машину, она, конечно, не ого-го какая, но все же!..

можно ли делать безошибочные вычисления на ошибающейся машине?

В ответ на этот вопрос мне однажды пришлось услышать весьма любопытное мнение. Речь шла о быстродействующих вычислительных машинах и об их неизбежных сбоях. Эти сбои портят кровь и характер всем, кому приходится сталкиваться с машинами. Дело в том, что современная вычислительная машина средней производительности и среднего качества сбивается примерно один раз в час работы. В жизни же весьма часто встречаются задачи, на решение которых приходится тратить десятки и даже сотни часов машинного времени. Выходит, что задача наверняка будет решена с ошибкой! Отсюда делается вывод, что либо нужно отказаться от решения подобных «сверхзадач», либо для их решения нужно создавать машины, которые имеют один сбой за 100—1000 часов непрерывной работы.

Спорунет, такие машины нужны, но правильно ли, что эти сверхзадачи нельзя решать на машинах, которые ошибаются «всего» в сто раз чаще? Давайте подумаем, как решать большую задачу на ненадежной машине.

Обычным приемом в этом случае является повторный счет. На первый взгляд кажется, что достаточно задачу решить несколько раз и если встретятся одинаковые результаты, то их и считать правильным решением.

А если вероятность правильного решения мала? Кстати, это так и есть для очень сложных задач. В этом случае машину придется «крутить» слишком долго, прежде чем будут получены два одинаковых результата.

Скажем, машина делает один сбой в среднем за один час работы. Нужно решить пятичасовую задачу, то есть такую задачу, на которую при безошибочной работе машины затрачивается 5 часов времени. Вероятность того, что машина ни разу не собьется в течение пяти часов, равна $1/32$. (Действительно, вероятность безошибочного счета в течение одного часа равна $1/2$. Вероятность двухчасовой работы без ошибок будет равна в два раза меньше и т. д.) Это значит,

что для получения одного правильного решения пятичасовой задачи нужно в среднем 32 раза решить эту задачу. А всего будет затрачено примерно: $32 \cdot 5 = 160$ часов!

Более месяца пришлось бы решать пятичасовую задачу (по 7 часов в день)! Есть над чем задуматься: может быть, правы скептики, утверждающие, что подобные задачи нам еще не по зубам, что нужно еще дорасти до этих задач, а поэтому «неча на зеркало пенять, коли...» не умеем делать хороших и надежных вычислительных машин.

Однако если разобраться, то 160 часов — это неоправданная и бесхозяйственная плата за... недомыслие.

Нужно ли повторять все решение? Может быть, пересчитывать лишь небольшие куски, где мог произойти случайный сбсй? Это и есть ключ к решению!

Разобьем задачу на несколько последовательных этапов. Начнем с первого и будем пересчитывать его до тех пор, пока результаты не совпадут. После этого можно быть уверенным, что первый этап решен правильно (вероятность одинаковых ошибок практически равна нулю и может не учитываться). Далее переходим к вычислению второго этапа и так же повторяем его до совпадения двух вариантов расчета. Переходим к третьему этапу задачи и т. д.

Проиллюстрируем эффективность такого подхода на том же примере пятичасовой задачи, решаемой на той же машине, которая делает в среднем все ту же одну роковую ошибку в час. Разобьем эту задачу, например, на пять одночасовых этапов. На каждом таком этапе машина ошибается в половине всех случаев. Поэтому одно правильное значение будет получено в среднем за два прогона, и следовательно, для двух правильных решений нужно сделать в среднем примерно четыре просчета. Тогда общие затраты будут иметь вид:

$$(2 + 2) \cdot 5 = 20 \text{ часов,}$$

то есть в 8 раз меньше, чем при первом варианте решения той же задачи.

Но это еще не наилучший вариант!

На ненадежных машинах можно решать и очень большие задачи. Нужно только уметь разбивать их на оптимальное число этапов.

Таким образом, применение специальных приемов для решения больших задач дает возможность пользоваться ненадежными вычислительными машинами. Это тоже преодоление случайного фактора, но не путем его подавления (машина как ошибалась раньше, так продолжает ошибаться в том же духе), а путем специальной организации работ на машине.

Задачу надежной работы на ненадежной машине можно представить как задачу связи по очень сильно шумящему каналу. В этом случае передача сообщения должна быть очень избыточна. Но повторять все сообщение многократно до совпадения двух принятых сообщений при больших помехах крайне невыгодно (что мы показали выше). Поэтому целесообразно разбить все сообщения на блоки (этапы), которые следует передавать до тех пор, пока они не будут приняты правильно, то есть дважды совпадут у приемника. Очевидно, что существует такая оптимальная разбивка на блоки, такой оптимальный размер блоков, который обеспечивает надежную передачу сообщения в минимальное время. Следует при этом помнить, что подобная высокая избыточность уместна лишь при передаче по каналу с высоким уровнем помех.

Теперь рассмотрим коды с исправлением ошибок, или самокорректирующие коды. Они имеют несомненное преимущество перед кодами, работающими в канале с переспросом. Действительно, в последнем случае нужно иметь обратную связь, позволяющую осуществить переспрос. А это очень дорогое удовольствие, так как требует удвоения приемо-передаточной аппаратуры и прерывания передачи для ответа на переспрос.

Применение самокорректирующихся кодов упрощает приемо-передаточные устройства, которые работают в программном режиме (без обратной связи). Правда, покупается это ценой значительного усложнения декодирующей аппаратуры и усложнением самого кода, что является платой за отсутствие обратной связи.

„самолечение“ кодов

Самокорректирующиеся коды являются типичным примером избыточности с самовосстановлением, когда

в код закладывается информация о том, как его можно восстановить, если случайные помехи изменят его.

Как и раньше, будем рассматривать код, состоящий из отдельных блоков, и помнить, что нам достаточно рассмотреть самовосстановление одного блока.

Пусть блок имеет k символов и представляет собой следующую последовательность:

$$a_1, a_2, \dots, a_k,$$

где каждый символ a_i как обычно, принимает одно из двух значений — нуль или единицу:

$$a_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases},$$

при всех $i = 1, 2, \dots, k$.

Для работы в канале с переспросом этот код мы дополняли одним символом — четностью b , который выражался следующим образом через символы блока:

$$b = \begin{cases} 1, & \text{если } a_1 + a_2 + \dots + a_k \text{ — нечетное число,} \\ 0, & \text{если } a_1 + a_2 + \dots + a_k \text{ — четное число,} \end{cases}$$

а новый блок записывался в виде:

$$a_1, a_2, \dots, a_k, b.$$

Символ четности b просто приписывался к исходному блоку справа.

Как мы убедились, это дает возможность обнаружить наличие ошибок в блоке, если число ошибок нечетно. И для ответа на вопрос, где именно расположена эта ошибка, необходимо было сделать переспрос: следовало остановить дальнейшую передачу сообщения (для этого понадобилась обратная связь) и заняться ее исправлением.

Для создания кода с возможностью исправления ошибок без переспроса по каналу обратной связи рассмотрим блок конкретной длины k , например, $k = 12$.

$$a_1, a_2, \dots, a_{11}, a_{12}.$$

Назовем его основным блоком. Расположим этот блок не в виде последовательности, а в виде таблицы, или, как говорят, матрицы:

| | | | |
|-------|----------|----------|----------|
| a_1 | a_2 | a_3 | a_4 |
| a_5 | a_6 | a_7 | a_8 |
| a_9 | a_{10} | a_{11} | a_{12} |

А теперь определим четность всех строк и всех столбцов этой матрицы, приписав символы четности по ее краям:

| | | | | |
|-------|----------|----------|----------|-------|
| a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | b_1 |
| a_5 | a_6 | a_7 | a_8 | b_2 |
| a_9 | a_{10} | a_{11} | a_{12} | b_3 |
| b_4 | b_5 | b_6 | b_7 | |

где b_1, b_2, b_3 — четность строк, а b_4, b_5, b_6, b_7 — четность столбцов, то есть

$$b_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \text{ — нечетное число,} \\ 0, & \text{если } a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \text{ — четное число.} \end{cases}$$

$$b_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } a_5 + a_6 + a_7 + a_8 \text{ — нечетное число,} \\ 0, & \text{если } a_5 + a_6 + a_7 + a_8 \text{ — четное число.} \end{cases}$$

.....

$$b_7 = \begin{cases} 1, & \text{если } a_4 + a_8 + a_{12} \text{ — нечетное число,} \\ 0, & \text{если } a_4 + a_8 + a_{12} \text{ — четное число.} \end{cases}$$

Теперь избыточный блок можно получить, считывая последовательно строки дополненной матрицы:

$a_1 a_2 a_3 a_4 b_1 a_5 a_6 a_7 a_8 b_2 a_9 a_{10} a_{11} a_{12} b_3 b_4 b_5 b_6 b_7$.
Например, блок

1011 0100 0111

можно записать в виде матрицы

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |

которую можно дополнить символами четности

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | |

И полученный избыточный блок равен

10111 01001 01111 1000.

Теперь, если в качестве нового блока выбрать последнюю матрицу, дополненную семью символами четности b_1, b_2, \dots, b_7 , то ошибки можно восстанавливать без переспроса.

Действительно, пусть ошибка закралась в основной блок a_1, a_2, \dots, a_{12} . Тогда изменение одного символа на обратный приведет к нарушению четности в строке и столбце, соответствующих этому символу. Следовательно, если ошибка коснулась основного блока, то нарушатся два условия четности. По ним легко восстановить правильное значение символа. Для этого достаточно символ, стоящий на пересечении строки и столбца с нарушенными четностями, изменить на обратный. Вот и вся корректировка.

Например, в результате помех в канале связи был принят следующий блок:

Рис. 32

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ○ | 1 | 1 | 1 |
| ○ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ○ | ○ | ○ | 1 | ○ |
| ○ | 1 | ○ | 1 | |

Проверка показывает, что нарушается четность в первом столбце и последней строке основного блока. Это означает, что символ a_9 , стоящий на их пересечении, принят ошибочно и должен быть изменен на обратный, то есть должно быть $a_9 = 1$. И блок исправлен.

Но ошибка может быть и в символах четности b_1, b_2, \dots, b_7 . Тогда нарушится лишь одно условие четности, что говорит об ошибке в символе четности.

Например, полученный блок после представления в матричной форме имеет вид:

Рис. 33

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ○ | 1 | ○ | ○ |
| ○ | 1 | 1 | ○ | 1 |
| ○ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | ○ | 1 | 1 | ○ |

Здесь нарушается четность только во второй строке. Это означает, что ошибка в символе четности b_2 , который должен быть изменен на обратный: $b_2 = 0$.

Мы рассмотрели наиболее простой случай, когда в блоке имеется одна ошибка. Можно построить код, позволяющий исправить две, три и т. д. ошибок. Для этого нужно делать дополнительную проверку на четность (например, по диагоналям или ходом шахматного коня и т. д.).

Вводя указанную проверку на четность, можно построить самокорректирующийся код с любой надежностью. Но при этом увеличивается объем кода. Так, в рассмотренном примере основной блок $k = 12$ вырос при введении избыточности до $k = 12 + 7 = 19$, то есть на 60 процентов. Не слишком ли это много?

Нет, не слишком. С увеличением объема основных блоков этот процент уменьшается. Для $k = 100$ (матрица 10×10) потребуется 20 проверок на четность, и тогда избыточный блок будет содержать 120 членов, то есть объем возрастет лишь на 20 процентов. С ростом k это число будет еще более уменьшаться.

Таким образом, с точки зрения экономности кода удобнее иметь большие блоки. Допустим, кодировать не буквы — их всего 32, а целые слова, которых значительно больше. Объем каждого блока при этом увеличивается.

Изложенные выше соображения позволяют утверждать (впервые это доказал знаменитый Клод Шеннон), что для любого канала связи с любым уровнем ошибок всегда можно построить такой самокорректирующийся код, который обеспечит надежность передачи сообщений, сколь угодно близкую к абсолютной. Естественно, что повышение надежности передачи связано с уменьшением ее скорости, так как объем кода при этом возрастает.

В заключение отметим, что коды с исправлением ошибок являются блестящим примером самовосстанавливающихся систем, избыточность которых обеспечивает их неизменность даже при действии значительных случайных помех. Это весьма эффективная борьба со случайностью, но не путем ее подавления, а за счет выбора разумного образа поведения в обстановке помех, который позволяет действовать весьма надежно в очень «ненадежной» обстановке.

7. СТРАТЕГИЯ, РИСК И РЕШЕНИЕ

«Быть или не быть? — вот в чем вопрос». Популярность этого вопроса связана прежде всего с тем, что каждый из нас неоднократно ставил его перед собой, мучился и решал так или иначе, с тем или иным успехом. Гамлетовские сомнения обуревали нас лишь в том случае, когда выбор того или иного варианта (быть или не быть) был связан с риском нарваться на неприятности. Вспомним, в каком смешном положении оказался бы Гамлет, если бы косвенные улики не оправдались и его дядя не ока-

зался бы убийцей отца. В этом случае трагедия превратилась бы в фарс, чего Шекспир допустить не мог. Автор в данном случае не настаивает на подобной трактовке, но подчеркивает, что выбор Гамлетом одной из возможностей грозит ему неприятностями.

Дело в том, что из всех вариантов часто только один является правильным. Но выбрать его мешает недостаток информации. Если бы в нашем распоряжении всегда имелись необходимые сведения, то Гамлет с его вопросом был бы так же смешон, как человек, глубокомысленно решающий проблему: сколько будет дважды два? Но со времен Шекспира информационный голод только обострился. Информация, правда, стала несколько более доступной (так, по телефону 09 можно получить несколько битов), но и вопросов задается во много раз больше.

Ко всему этому неизбежные случайные помехи искажают и обесценивают поступающую информацию. (Вспомним, что такой искажающей «помехой» для Гамлета были его бывшие друзья Розенкранц и Гильденштерн.)

Если учесть все сказанное, то следует проникнуться уважением к Гамлету, который блистательно поставил и решил одну из сложнейших ситуаций и разоблачил своего дядю.

Однако ни Гамлет, ни Шекспир не оставили рецепта принятия решения в обстановке помех. В данном конкретном случае мы знаем, как разоблачить дядю. Но ведь в жизни одна и та же ситуация почти никогда не повторяется! Как быть в любой другой обстановке?

Так *быть* или *не быть*?! Увы, Шекспир нам не дал ответа. Ответ дала статистическая теория решений.

сказка о добром молодце и о дорожном камне

Классическая ситуация, на которой можно почувствовать всю остроту задачи по принятию решения, хорошо известна всем с детства из сказок. Формулируется она следующим образом (автор не претендует на точность воспроизведения). Добрый молодец подъезжает на своем могучем коне к развилке, где дорога разветвляется на три. Ни милиционера, ни прохо-

жих — спросить некого. Дорожный указатель в виде надписи на придорожном камне вещает:

«Направо поедешь — коня потеряешь, прямо поедешь — голову потеряешь, налево поедешь — горе найдешь». И добрый молодец невольно тянет руку под шлем — почесать затылок, где люди часто ищут и иногда находят ответы на самые сложные вопросы.

Нашему молодцу нужно сделать выбор одной из четырех возможностей; говоря современным языком, он имеет в своем распоряжении четыре стратегии поведения.

Стратегия № 1. Поехать по первой дороге и, возможно, при этом потерять коня.

Стратегия № 2. Поехать по второй дороге и, возможно, лишиться головы.

Стратегия № 3. Поехать по третьей дороге и, возможно, горевать.

Стратегия № 4. Вернуться назад.

Реализация любой стратегии не представляет труда — дал шпоры коню и поехал. Но как найти правильное решение и что вообще назвать правильным (оптимальным) решением в такой ситуации? Если бы хоть одна из представленных возможностей гарантировала бы приятную перспективу, например встретить красавицу принцессу или, на худой конец, спящую красавицу, которую нужно разбудить! А го что ни дорога, то сплошные неприятности! Как быть?

Но наш добрый молодец, кроме традиционных коня, копья, меча и лука со стрелами, имеет еще и здравый смысл («ума палата»). Пораскинув этим умом, он приходит к мысли, что в сложившейся ситуации «не до жиру» и нужно принимать такое решение, которое представит ему меньше всего неприятностей. Народная мудрость «из всех бед выбирай меньшую», как видно, и определяет интуитивный, но совершенно правильный подход молодца к выбору оптимального решения. Этим он сделал очень много: во-первых, выбрал решающее правило, то есть определил, каким образом будет приниматься наилучшее решение, и, во-вторых, установил, что наилучшее решение должно принести минимум неприятностей.

Но для этого ему нужно определить, как измерять неприятности при выборе той или иной возможности,

то есть нужно знать, в каких единицах измеряются неприятности, и определить, сколько единиц неприятностей принесет каждая возможность, если ее выберешь.

Итак, размышляет наш молодец, *если верить* надписи на камне, то из создавшегося положения есть только четыре выхода:

1. Терять коня, если ехать по первой дороге.
2. Терять голову, если ехать по второй.
3. Горевать, если ехать по третьей.
4. Опозориться и потерять престиж, если возвращаться назад.

«А буду я считать ущерб, наносимый мне, — рассуждает молодец, — числом врагов, которых я не смогу победить. Конь мой в битве затопчет четверых, значит потеря коня грозит мне ущербом в 4 единицы. Сам я могу справиться с семерыми, следовательно, при потере головы мой ущерб измеряется 11 единицами (семь моих и четыре коня; ведь без меня конь не станет топтать врагов, еще не приучен)».

Горе по-разному действует на людей. Наш молодец решил, что горе сделает неверной его руку и число побежденных врагов в этом случае уменьшится до трех. Тогда ущерб при выборе третьей дороги измеряется 3 единицами.

Возврат назад означает малодушие, потерю престижа, а вместе с ним и воинского звания, что для молодца почти эквивалентно потере головы. Следовательно, и в этом ущерб равен 11 единицам.

Так оценил свой ущерб добрый молодец, полагая, что камень вещал правду. А если он, камень, грубо говоря, подзагнул? Ведь бывает такое, и не только в сказках! (Все та же помеха!) Тогда величины ожидаемого ущерба будут иными.

Наш молодец — человек бывалый. Он много скитался в поисках ратных подвигов, да и понаслышан был немало, и может оценить достоверность получаемой информации. Его опыт свидетельствует, что в сказках придорожные камни-указатели склонны преувеличивать опасность и особо грозным надписям следует доверять лишь наполовину. А сейчас он сам должен определить свое отношение к «каменным» заявлениям.

Поразмыслив как следует, он решает приписывать нуль тому, чему он вообще не верит, и единицу тому, что заслуживает полного доверия. Все промежуточные числа определяют степень «правдивости» камня и дают возможность знать степень уверенности в том, что предсказание сбудется.

Так молодец определил правдивость для первой стратегии (потеря коня) — 0,6, для второй (потеря головы) — 0,4, для третьей (горе) — 0,9 и для четвертой (отступление) — 1,0 — престиж при малодушии теряется наверняка.

Здесь мы подходим к самому важному понятию — к *риску*, связанному с принятием оптимальных решений.

Величина риска решения определяется как *возможным* ущербом, наносимым этим решением, так и *очевидностью*, с которой ущерб наносится. Если маловероятно, что произойдет неприятность, то риск мал. Мал он и в том случае, если вероятность ущерба велика, но сам по себе ущерб мал.

Задумывались ли вы, например, над тем, почему мы выходим из дома в дверь, а не в окно?

А дело все в риске. Риск свернуть себе шею, пользуясь окном вместо двери, значительно больше риска при выходе в дверь. Конечно, и выходя в дверь, мы можем споткнуться и расквасить себе нос, скатившись с лестницы. Но мы знаем, что и ущерб при этом невелик, мала и вероятность такой неприятности.

Выходя в окно, также можно избежать всяких неприятностей, но это маловероятно. Да и неприятности (если они случатся) будут слишком велики. Тогда, пролетая мимо окон соседей, можно смело отказываться от приглашения на ужин, так как риск будет очень большим и рассчитывать на благоприятный исход можно, но явно нецелесообразно.

Именно эти соображения лежат в основе выбора наилучшей стратегии выхода на улицу. Люди интуитивно поняли это, и стелют коврик для вытирания ног у входной двери, а не у подоконника.

Как видно, риск равен произведению ущерба на вероятность того, что этот ущерб произойдет.

Если, например, единичный ущерб происходит

лишь в половине всех случаев (вероятность равна $\frac{1}{2}$), то риск такого решения равен половине:

$$1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2}.$$

Риском является средний возможный ущерб.

Вернемся к нашему молодцу. Чтобы определить риск, на который он идет при выборе той или иной стратегии, нужно умножить ущерб на степень уверенности, что такой ущерб произойдет. На рисунке 34 показаны последовательно ущербы, степени уверен-

Рис 34

| СТРАТЕГИЯ МОЛОДЦА | N1 | N2 | N3 | N4 |
|------------------------------|-----|-----|-----|----|
| УЩЕРБ, ОБЕЩАЕМЫЙ КАМНЕМ | 4 | 11 | 3 | 11 |
| СТЕПЕНЬ УВЕРЕННОСТИ В УЩЕРБЕ | 0,6 | 0,4 | 0,9 | 1 |
| РИСК СТРАТЕГИИ | 2,4 | 4,4 | 2,7 | 11 |

ности (вероятности) и риски для всех четырех стратегий, которыми располагает молодец. Видно, что наилучшей (оптимальной) стратегией является стратегия с минимальным риском.

В самом деле, минимизируя риск, мы тем самым можем быть уверены, что в среднем наш ущерб будет минимальным. Это вовсе не означает, что действительный ущерб не сможет быть больше. Однако он может оказаться и меньше среднего. Поэтому рассчитывать следует на средний ожидаемый ущерб. Его и нужно минимизировать.

Теперь выбор дороги сводится к определению стратегии с минимальным риском. Такой стратегией в данном случае оказывается стратегия № 1 — ехать по дороге, идущей вправо, и рисковать конем. Действуя подобным образом, наш воин поступает оптимально в данной ситуации и подвергается минимальному риску. Это вовсе не значит, что он идет на потерю коня, вовсе нет. Дело в том, что, судя по прошлому опыту, он потеряет лишь с вероятностью 0,6, а уверенность в собственных силах дает ему право рассчитывать на благополучный исход.

Итак, наш добрый молодец выбрал наилучшую стратегию. Как видно, в этом ему помог его опыт, иначе он не смог бы оценить достоверность камня. А что, если этого опыта нет? Что, если он впервые выехал? Тогда ему ничего не остается, как в равной степени верить или не верить всем надписям. В первом случае, когда наш герой явно является пессимистом (этот случай показан на рисунке 35), оптимальной стратегией является самая осторожная стратегия № 3 (горевать). Она обеспечивает ему минимальный риск в соответствии с его пессимистически-

Рис.
35

| СТРАТЕГИЯ МОЛОДЦА | N1 | N2 | N3 | N4 |
|---|----|----|----|----|
| УЩЕРЬ, ОБЕЩАННЫЙ КАМНЕМ | 4 | 11 | 3 | 11 |
| ПЕССИМИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОБЕЩАНИЙ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| РИСК СТРАТЕГИИ | 4 | 11 | 3 | 11 |
| ОПТИМИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УГРОЗ | 0 | 0 | 0 | 1 |
| РИСК СТРАТЕГИИ | 0 | 0 | 0 | 11 |

ми представлениями о правдивости камня. Во втором случае (ни во что плохое не верить) все стратегии, кроме четвертой, имеют нулевой риск и для него в равной степени хороши. Оптимальное поведение заключается в произвольном выборе одной из трех дорог. Такая небрежность характерна для оптимиста.

Все указанные рассуждения нашего молодца вполне просты и естественны. Они и лежат в основе теории статистических решений, которая помогает преодолевать случайность нашего мира.

А теперь из волшебной детской сказки перенесемся в суровую взрослую область — криминалистику.

ОН ИЛИ НЕ ОН? (детектив)

...Инспектор Мегрэ вздрогнул. За шиворот попала большая холодная капля осеннего дождя. Другая капля скользнула по стволу пистолета и, на мгновение задержавшись у мушки, повисла на дуле. Мегрэ стряхнул ее и со вздохом сунул пистолет в карман. Кивнув сержанту, чтобы тот продолжал наблюдение за сараем, он усталой походкой зашагал к автомобилю.

«Черт бы побрал этого парня, — думал Мегрэ. — Приходится торчать здесь в такую мерзкую погоду вместо того, чтобы потягивать свежий кофе у камина и листать еженедельник!»

В машине шофер протянул ему термос. Мегрэ поморщился, представив, во что превратился кофе, но выпил теплую жидкость и поблагодарил.

В который раз он положил на колени две фотографии и стал их изучать. Одна из них была из полицейского досье. На ней широко и самодовольно улыбался уже не молодой мужчина с наглыми глазами и каменным подбородком. «Такой выстрелит всегда первым и... последним», — подумал Мегрэ. Впрочем, это не было написано на физиономии молодчика — просто инспектор его хорошо знал и уже несколько лет следил за его «подвигами». Откровенный фашист, член террористической офицерской организации, бывший коллаборационист, связанный, по слухам, с гестапо и т. д. Он хорошо знает, что его ждет гильотина, и, наверно, поэтому наглеет год от года.

А вот другая фотография, сделанная с полицейского вертолета, когда полиция преследовала неизвестного и он скрылся в этом сарае. Снимок скверный, из-за сильного увеличения видна зернистость пленки, и поэтому контуры его не четки и расплывчатые. Но на лице, развернутом вполборота, — выражение страха и затравленности.

Как важно знать: один и тот же человек изображен на обеих фотографиях или разные? Ведь от этого целиком и полностью зависит все дальнейшее поведение, а возможно, и жизнь многих людей.

Если обе фотографии сделаны с одного и того же лица, то осаду сарая следует вести с особой тщательностью — от этого парня можно ждать всего: и снайперских выстрелов, и очередей из автомата, и гранат (недаром же он так рвался к этому сараю, когда понял, что не уйти от погони, — здесь, наверно, есть склад оружия).

Если же на фотографиях изображены разные лица, то дело терпит. Можно спокойно договориться с парнем в сарае, попытаться убедить его прекратить сопротивление и не усугублять свою вину. Да и

отстреливается он как-то странно, будто старается испугать.

Так, «ОН» или «НЕ ОН»? — вопрос, который задавал себе инспектор Мегрэ все это утро, но ответа не получал. На фотографиях почти все было разное: и размер, и ракурс, и четкость, и мимика — все отличало обе фотографии. Но это мог быть один и тот же человек!

На все запросы инспектора специалисты отказывались дать ответ — слишком сильно различались фотографии. Правда, он слышал, что подобные задачи решают на вычислительных машинах, но, как всегда, времени зайти и поговорить с кибернетиками не было, да и под старость совестно было идти учиться.

«А, видно, придется», — подумал Мегрэ и решил связаться с вычислительным центром.

На этом мы простимся со знаменитым сыщиком.

Дальше не будет ни выстрелов, ни погони, а детективное начало понадобилось автору как эффективная завязка, необходимая во всякой популярной книге, если она популяризует не очень популярные вещи.

Рассмотрим вполне реальный пример. Речь пойдет о такой ответственной в криминалистике операции, как опознание преступника.

Следователь в своей работе почти на каждом шагу сталкивается с проблемой: по имеющимся сведениям о преступнике надо установить, является ли им подозреваемое лицо или нет. Рассмотрим для простоты случай, когда имеются фотокарточки преступника и подозреваемого. Нужно ответить: один и тот же или разные люди представлены на фотографиях?

Итак, он или не он?

Не торопитесь отвечать на вопрос, он не так прост, как кажется. Давайте прежде проанализируем создавшееся положение.

Следователю нужно принять решение и выбрать одну из двух возможностей: «он» и «не он», то есть «преступник и подозреваемый являются одним и тем

же лицом» и «разными лицами». Следовательно, анализируя фотокарточки, должен прийти к какому-то решению, причем это решение должно быть в определенном смысле наилучшим.

А что значит наилучшим? Процесс следствия, как и всякий другой реальный процесс, подвержен действию случайных помех, мешающих выбору правильного решения. Такие помехи возникают в результате низкого качества сопоставляемых фотографий, искажений, вносимых оптической системой фотоаппарата, различных разворотов лиц, разной мимикой и т. д. Как видно, эти искажения не могут быть «исправлены» на фотокарточке и являются помехами, с которыми надо считаться. Присутствие их может привести к ошибкам следствия. Эти ошибки бывают разного рода.

Ошибки, которые приводят к оправданию виновного, назовем ошибками первого рода. У следателя были фотографии одного и того же лица, но помехи были настолько велики, что лица на представленных фотографиях ему показались разными и он сделал ошибку. В результате этой ошибки преступник ускользнул.

Но существуют и другие ошибки. Лица на фотографиях были разные, но очень похожие, и следователь ошибочно решил, что эти фотографии сделаны с одного и того же лица. В этом случае страдает невиновный, которого приняли за преступника. Такого характера ошибки назовем ошибками второго рода.

Оба вида ошибок нежелательны, ибо они приносят определенный ущерб отдельным лицам, престижу суда и в конечном счете обществу. Так, в первом случае (оправдание виновного) ущерб заключается в том, что преступление не наказано, преступник остается на свободе и сможет совершить новое преступление.

Во втором случае (осуждение невиновного) преступник также остается ненаказанным, но, кроме этого, страдает невиновный человек. Как видно, такая ошибка тяжелее и приносит больший ущерб обществу. (Вспомним известную гуманную фразу: «Лучше оправдать виновного, чем осудить невиновного».)

Следователь это хорошо понимает и, принимая решение, старается свести к минимуму ущерб, который будет нанесен обществу при ошибочном решении.

Пусть ущерб от оправдания виновного выражается некоторым числом A , а ущерб от осуждения невиновного определяется числом B . Тогда очевидно, что ошибка первого рода приводит к ущербу A , а ошибка второго рода — к ущербу $A + B$.

Трудно сказать, в каких единицах измерять эти ущербы. Но при внимательном рассмотрении в этом нет особой необходимости — достаточно определить, во сколько раз один ущерб превышает другой, то есть задать число $q = \frac{A+B}{B}$. В самом простейшем случае достаточно считать $A=B$ ($q=2$), то есть предполагать, что ущерб, наносимый следствию от осуждения невиновного, в два раза больше ущерба от оправдания виновного. Дальнейшее уже не зависит от конкретных значений A и B .

Пусть следователь в процессе сопоставления фотокарточек пользуется каким-то определенным правилом (алгоритмом), позволяющим вычислить степень несоответствия обоих изображений. Обозначим эту степень некоторым числом Q . Чем больше получается это число, тем более разными представляются лица, изображенные на фотографиях. И наоборот, чем меньше — тем они более схожи. Если бы не было помех, то задача была бы решена просто: лица одинаковые, если $Q = 0$, и разные при $Q > 0$. Но вот помехи! Может оказаться, что за счет помех $Q = 0$, а лица разные, и наоборот. Как же быть, какое принимать решение?

Для этого нужно построить *решающее правило*. Это правило звучит крайне просто. Если величина несоответствия Q больше некоторого числа τ , то лица предполагаются разными и подозреваемый невиновен. Если же Q меньше τ , то на фотографиях изображено одно и то же лицо.

Но как определить величину τ ? Оказывается, что успех следствия во многом зависит от этого числа. Пусть τ мало (или вообще равно нулю). Тогда в соответствии с указанным решающим правилом мы

почти никогда не осудим невиновного. Но если подозреваемый и есть преступник, то мы его оправдаем и наверняка совершим ошибку первого рода. Значит, при слишком малом τ невиновный осужден не будет, но преступник почти наверняка ускользнет.

Пусть τ велико. В этом случае преступник, если он будет подозреваться, не уйдет. Но если подозреваемый окажется невиновным, то в соответствии с решающим правилом мы обязаны его осудить, а преступник останется на свободе. Ущерб следствию будет еще больше $(A + B)$.

Отсюда хорошо видно, что значение τ должно быть каким-то промежуточным, чтобы минимизировать ущерб, наносимый следствию в результате возможной ошибочной экспертизы.

Но как все-таки определять значение τ ? Здесь на помощь следователю и приходит теория статистических решений.

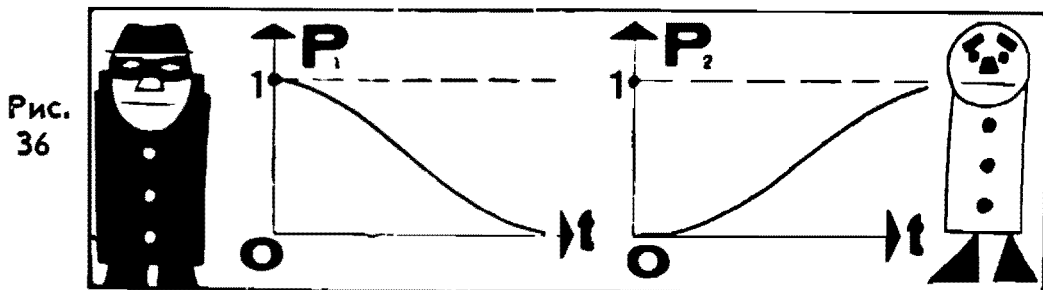
Нужно составить *функцию риска экспертизы*. Эта функция имеет простой вид:

$$R = Ap_1 + (A + B)p_2.$$

Здесь A и B , как сказано выше, — ущербы от оправдания виновного и осуждения невиновного, p_1 — вероятность оправдания виновного, то есть степень уверенности в том, что произойдет ошибка первого рода, p_2 — вероятность осуждения невиновного, то есть степень уверенности в том, что произойдет ошибка второго рода.

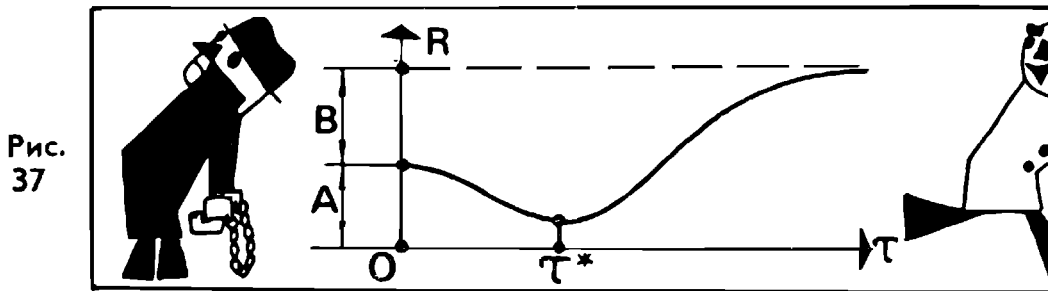
Функция риска характеризует, таким образом, средний ущерб в случае ошибочной экспертизы.

Значения вероятностей p_1 и p_2 зависят от числа τ . На рисунке 36 показаны эти зависимости. Ясно, что при $\tau = 0$ наверняка произойдет ошибка первого ро-



да ($p_1=1$), так как тогда оправдывается виновный. А при слишком большом τ наверняка будет сделана ошибка второго рода, потому что будет осужден невиновный ($p_2=1$).

Если теперь мы подставим эти выражения в формулу для риска, то получим зависимость риска следствия от величины τ . Она показана на рисунке 37.



Хорошо видно, что риск имеет отчетливо выраженный минимум при τ^* ! Там-то и нужно искать оптимальное значение τ . Следовательно, для оптимальной экспертизы нужно выбрать $\tau = \tau^*$, и риск следствия в этом случае будет минимален. Поступая так, следователь может быть уверен, что в случае ошибки причиненный ущерб в среднем будет наименьшим.

Следует обратить внимание, что при этом нас не интересует сама величина риска. Важно, чтобы она была минимальной. А каков этот минимум — для процедуры выбора τ^* , как видно, не существенно. Это обстоятельство значительно облегчает задачу, так как снимает необходимость определения величин A и B , которые (увы!) мы в настоящее время не умеем не только вычислять, но и высказать о них какие-либо разумные соображения.

Действительно, пусть, например, $A = B$, то есть ущербы одинаковы. Тогда из формулы для риска получаем:

$$R = A (p_1 + 2p_2),$$

откуда хорошо видно, что положение минимума риска не зависит от A . (Величина A будет определять величину риска, но не положение его минимума.)

Таким образом, минимизация риска путем соответствующего выбора параметра τ позволяет следователю преодолеть влияние случайных помех, возникающих в процессе опознания преступника.

А теперь поговорим о вполне реальных и близких нам вещах... о газированной воде и сомнениях автомата, ее продающего.

Ему также приходится иметь дело со случайными помехами и принимать оптимальное решение в этой обстановке.

Быль об автомате, продающем газированную воду

Простейшим примером технического устройства, принимающего решение, является обычный автомат для продажи газированной воды. Получив трехкопеечную монету, автомат прежде всего должен выяснить: а монета ли это? (Быть или не быть?) В его распоряжении имеется две стратегии, соответствующие двум возможностям:

Стратегия № 1 — «быть» — принять монету, то есть признать ее доброкачественной и напоить ее владельца.

Стратегия № 2 — «не быть» — признать монету недоброкачественной и вернуть ее владельцу.

Для принятия решения автомат должен «поставить эксперимент» с целью проверки качества монеты. Пусть он заключается в измерении диаметра монеты. Автомат располагает двумя калибрами: верхним и нижним. Монета должна проходить в верхний калибр и одновременно застревать в нижнем. Только в этом случае она будет признана доброкачественной.

Верхний калибр проверяет, не превышает ли размер монеты пределы, указанные стандартом. Если превышает, то монета попросту не попадает в автомат. В этом случае монета признана автоматом некачественной, и проситель получает отказ.

Нижний калибр сортирует поступающие монеты на два класса. В первый класс относятся монеты, размер которых больше размеров калибра, — они будут задержаны и признаны доброкачественными. Второй класс монет имеет меньший размер. Эти монеты проскочат калибр и будут возвращены их владельцу как недоброкачественные.

Проектировщик автомата должен выбрать размеры этих калибров. Размер верхнего определить нетрудно — он должен быть равен размеру новой мо-

неты d . Почему новой? Да ведь со временем монета не становится больше, и все доброкачественные монеты имеют размер не больше первоначального.

Значительно труднее установить размер нижнего калибра. Если его сделать слишком близким к верхнему, то старые, истертые, но качественные монеты будут автоматом приниматься за некачественные. Если же этот размер сделать слишком малым, то автомат будет принимать и негодные монеты, то есть суррогаты. В обоих случаях автомат будет терпеть ущерб: в первом — от потери клиента и своего престижа в глазах этого клиента, а во втором — оттого, что за воду не было заплачено (точнее, заплачено суррогатом).

Как видно, размер нижнего калибра должен быть оптимальным, в определенном смысле наилучшим. Не трудно заметить, что этот размер должен минимизировать средний ущерб, наносимый ошибками первого и второго рода, должен свести риск к минимуму.

Ошибкой первого рода назовем непризнание качественной монеты, например монета была хорошей, но случайно несколько истертой и автомат не принял ее (осуждение «невиновного»). Ошибкой второго рода следует назвать прием автоматом некондиционной монеты (оправдание «виновного»). Пусть d — стандартный размер монеты, а $d - \tau$ — размер нижнего калибра. Тогда вероятности ошибок первого и второго рода будут зависеть от величины τ так, как показано на рисунке 37. При $\tau = 0$ размеры обоих калибров совпадают и автомат не делает вообще ошибок второго рода и не принимает некачественных монет. Но в этом случае он наверняка будет делать ошибки первого рода, то есть будет отклонять и хорошие монеты. Если величину τ выбрать достаточно большой, то ошибки первого рода делаться почти не будут, и автомат будет принимать хорошие монеты, но вместе с ними он будет принимать и некачественные, и тем самым увеличится возможность совершения ошибок второго рода.

Чтобы определить оптимальное значение этой величины, конструктор должен построить функцию риска и выбрать такое τ , которое минимизирует риск

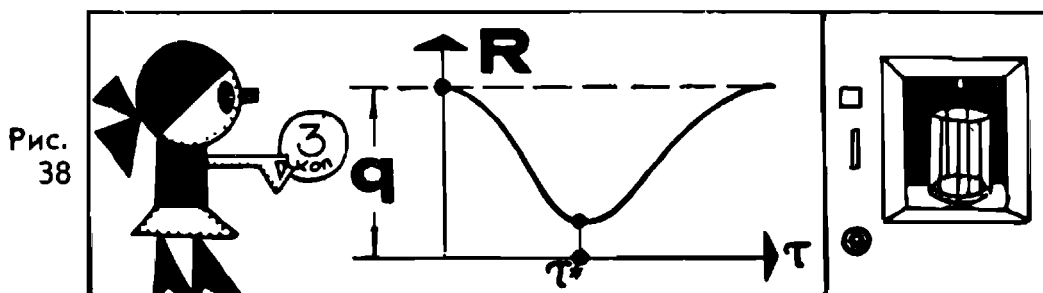
автомата. Для этого ему нужно ввести величину ущерба от ошибок первого рода — число q_1 и величину q_2 — ущерб от ошибок второго рода. Формула функции риска автомата выглядит так:

$$R = q_1 p_1 + q_2 p_2.$$

Пусть для простоты $q_1 = q_2 = q$, то есть ущерб от ошибок обоого рода признан одинаковым. Тогда

$$R = q(p_1 + p_2).$$

На рисунке 38 показана зависимость риска от величины τ . Хорошо видно, что значение τ^* минимизирует риск автомата. Это значение и должен назначить конструктор при проектировании. Только в этом случае риск неправильного решения автомата будет минимален, и автомат будет принимать оптимальные решения.



Любопытно, что в этом случае τ^* не зависит от величины ущерба q : различные значения q будут изменять величину риска, но положение его минимума будет неизменно. Следовательно, конструктор может для риска пользоваться формулой:

$$R = p_1 + p_2,$$

что значительно упрощает его задачу.

Заканчивая разговор о решениях и риске, заметим лишь, что идея введения риска чрезвычайно плодотворна не только в криминалистике и технике, но и в физике, биологии, экономике и других науках. Всякий раз, принимая оптимальное решение в случайной обстановке, нужно оценивать его риск и стараться свести этот риск к минимуму. Поступая так, мы делаем наши выводы наиболее обоснованными, несмотря на случайные помехи, то есть преодолеваем случайность и снижаем ее разрушительное действие.

право на ошибку

Мы живем в случайном мире, где ничего нельзя утверждать со стопроцентной уверенностью и все суждения должны начинаться словами: «по всей вероятности...» Иначе всякое категорическое утверждение рискует случайно не оправдаться. Действующие случайные помехи создают такой шумовой фон, такие условия, в которых трудно не ошибаться.

В предыдущих параграфах мы рассмотрели способы борьбы со случайными помехами. Эта борьба, как всякая борьба, имеет свои жертвы и потери. В борьбе со случайными помехами теряется самое дорогое и невозвратимое — время.

Как было показано выше, лучшим средством для преодоления случайности является накопление. А всякое накопление происходит во времени, которое и образует потери.

Рассмотрим следующую весьма распространенную ситуацию. Пусть нам предстоит принять какое-то решение, сделать выбор из нескольких возможностей. Например, выбрать место для отдыха в одном из трех городов: Одессе, Ялте и Сочи. Прежде чем принять решение, следует собрать необходимую информацию. Эта информация, как правило, бывает весьма зашумленной, со всякого рода помехами. Так, спрашивая своих знакомых о жизни и удобствах в интересующих городах, вы можете получить весьма противоречивые ответы. Один устроился плохо, но зато познакомился на пляже с девушкой, влюбился и... всякое такое. Конечно, он будет с жаром хвалить свой отдых. Другой, наоборот, устроился великолепно, но... поссорился с женой, и она даже собиралась уехать до окончания отпуска. Этот, разумеется, будет плохого мнения о хорошем месте отдыха.

Чтобы правильно решить, нужно «отфильтроваться» от помех в получаемой информации. Это можно сделать, например, таким образом. Отведите три странички своего блокнота для сбора информации об отдыхе в этих городах и ставьте плюс, если отзыв положительный, и минус, если отрицательный. Только позаботьтесь, чтобы все отзывы были от разных людей и таких, мнению которых вы доверяете.

Перед тем как покупать билеты, загляните в свой блокнот и обработайте полученную информацию. Результаты обработки будут иметь, возможно, такой вид:

| Города | Одесса | Ялта | Сочи |
|--------------------|--------|------|------|
| Плюсы | 8 | 5 | 16 |
| Минусы | 4 | 2 | 7 |
| Всего отзы- в'в | 12 | 7 | 23 |

Как быть дальше? Наверное, прежде всего нужно договориться о решающем правиле. В качестве такого правила естественно выбрать следующее: поедем отдыхать в тот город, который имеет наибольший процент положительных отзывов. Из указанной таблицы легко получить:

Одесса — 66 процентов, Ялта — 71 процент, Сочи — 69 процентов.

Получается, что наибольший процент имеет Ялта. Значит ли это, что, поехав в Ялту, вы не ошибетесь?

Разумеется, нет!

Дело в том, что полученные проценты — приближенные числа и верить им следует не одинаково. Действительно, эффективность осреднения зависит от его объема: чем больше объем, тем точнее результат. Поэтому самой правильной оценкой была оценки Сочи (23 отзыва), а самой приближенной — Ялта (7 отзывов). И выходит, делая ставку на Ялту, можно легко ошибиться, так как вполне возможно, что, получив дополнительную информацию, то есть увеличив число отзывов о Ялте до 23-х, мы получим снижение этого процента, например, до 67. А это изменит наш выбор, и придется брать билеты до Сочи (69).

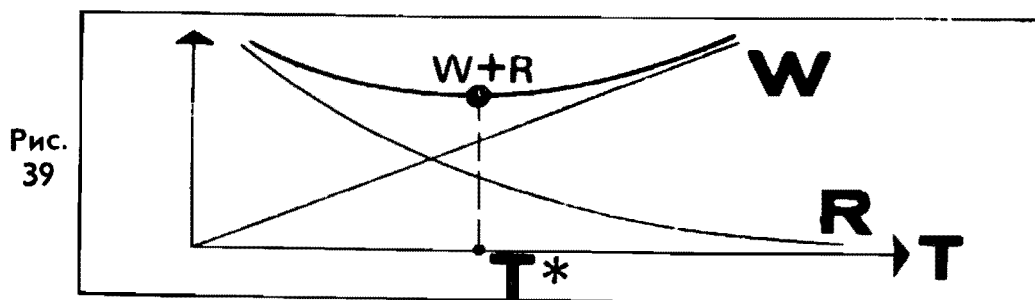
Как же быть? Говоря строго, для вполне надежного принятия решения нужно собрать такой значительный объем информации и соответственно пойти

на такие большие временные затраты, которые мы не можем себе позволить (придется отложить отдых до следующего сезона). Именно поэтому, принимая решение, мы всегда ограничиваемся разумными затратами, но всегда с определенной вероятностью, что это решение может оказаться неверным.

Можно ли указать на оптимальный объем сведений, который необходимо собирать, чтобы решить ту или иную задачу? Оказывается, можно.

Для этого прежде всего надо определить потери. В этом случае потери имеют двойкий характер.

Это прежде всего потери на сбор информации (например, при накоплении). Пусть для простоты эти потери W пропорциональны времени T (вспомним известную поговорку: «время — деньги»). На рисунке 39 этот вид потерь показан наклонной прямой, которая означает, что потери на сбор информации линейно зависят от времени.



Теперь обратимся к потерям, связанным с ошибочным решением задачи. Эта ошибочность зависит от объема имеющейся информации и обратно пропорциональна ему. Чем меньше информации, тем больше вероятность ошибки и тем значительней риск (напомним, что риск есть средние потери в результате ошибки). На рисунке график риска R имеет убывающий характер. Из него видно, что с ростом объема информации вероятность ошибки уменьшается и соответственно уменьшается риск.

Общие затраты, связанные с решением этой задачи, следует определить в виде суммы $R + W$, график которой, как видно, имеет четко выраженный минимум в точке T^* . Это и есть оптимальный объем наблюдения.

Действуя таким образом, мы гарантируем себе

в среднем минимальные суммарные потери, несмотря на то, что будем иногда ошибаться. Но эти ошибки принесут меньше вреда, чем от сбора информации.

Это и является теоретическим основанием права на ошибку. Ошибаться можно, но надо трезво оценивать потери, связанные с этой ошибкой.

Более того, ошибаться нужно! Если человек или какое-либо решающее устройство работают абсолютно без ошибок, можно смело утверждать, что они работают не оптимально. Без ошибок можно работать лишь в двух случаях: если работать очень медленно, то есть слишком долго фильтровать информацию, и если иметь огромную избыточную надежность, скажем, решать поставленную задачу параллельно несколькими способами, а потом принимать решение голосованием. Оба случая связаны с огромными, ничем не оправданными затратами.

Вместе с тем не следует ударяться и в другую крайность — заставлять делать ошибки. Нужно помнить о риске, который образуется из двух факторов — стоимости ошибки и ее вероятности. Если ошибка стоит мало, то риск невелик и можно допустить сравнительно большое число ошибок. Если же стоимость ошибки велика, например в случае аварии, то ее вероятность следует сделать очень малой путем повышения надежности системы.

Хочется закончить этот параграф словами известного кибернетика Эшби, который в одном из своих выступлений сказал:

«...Гораздо дешевле и легче создать кибернетическую машину не со 100-процентной точностью, а с точностью, например, до 90 процентов и затем использовать ее, оценивая возможные ошибки ее функционирования на основе теории вероятностей. Достижимый в этом случае выигрыш в цене и простоте создания такой машины (не абсолютно точной) весьма и весьма велик.

Очень часто люди, которые стремятся создать машины со 100-процентной точностью, затрачивают на это невероятные усилия. Эти усилия не окупаются. Гораздо проще иметь машину менее точную, но такую, которую значительно легче сконструировать и которая также может быть использована».

II. СЧАСТЛИВЫЙ СЛУЧАЙ

Никогда не пренебрегайте особым, удивительным случаем или явлением, часто это ложная тревога, но иногда за ним скрывается важная истина.

Ф л е м м ин г

1. ШЕРЛОК ХОЛМС, НАКОНЕЦ, ГОВОРИТ ОТКРОВЕННО

— Ах, дорогой мой Ватсон! — промолвил Холмс, вытягивая ноги, завернутые в теплый плед, и пуская в потолок колечко дыма. — В такой приятный вечер так хочется быть самим собой!

Он задумчиво смотрел на жаркие блики в догорающем камине, и отблески угасающего огня скользили по его острому сухому лицу. То ли от выпитого вина, то ли от сытного ужина, приготовленного заботливой рукой мисс N, а может быть, сказалось очарование догорающего камина, только лицо Холмса разгладилось, сделалось мягким и добрым. Доктор Ватсон никогда не видел своего друга в таком состоянии. Оно так не вязалось с решительной и мужественной натурой знаменитого сыщика. Казалось, сейчас Холмс весело улыбнется и начнет балагурить об успехах своего племянника.

Холмс действительно ухмыльнулся и произнес:

— Вы и представить не можете, мой милый доктор, насколько работа сыщика зависит от счастливой случайности! Я по-настоящему понял это, лишь прочитав последние работы по кибернетике. Особенно мне запомнилось сочинение знаменитого кибернетика Эшби. Он даже создал машину — гомеостат, которая отыскивает цель случайным образом. Есть о чем помечтать!

— Холмс, мне всегда трудно следить за вашими мыслями. Какая связь между работой сыщика и кибернетикой? И еще, вот вы так нежно отозвались о случайности, а ведь случай для сыщика всегда помеха, его заключения должны быть прежде всего логичны, а не случайны.

— Это все правильно, но слишком прямолинейно. Действительно, следует быть логичным в своих

выводах. Но как приходиться к этим выводам? Логика позволяет проверить правильность вывода, но не дает возможности его сделать. Помните, какой-то философ сказал, что логика не научит логически мыслить, так же как знание законов пищеварения не улучшит процесс переваривания пищи.

— Вы меня удивляете, Холмс. Не вы ли все время ратовали за логику в работе сыщика! Неужели ваше мнение по этому поводу изменилось? — заметил обеспокоенный Ватсон.

— Не изменилось, а углубилось, — задумчиво ответил Холмс, пуская в потолок новое колечко. — Все наши потуги раскрыть преступление аналитическим путем годятся лишь в качестве руководства для начинающих сыщиков в полицейской школе Скотланд-Ярда.

— Позвольте! — вскричал взволнованный доктор. — А ваш знаменитый дедуктивный метод? Разве не с его помощью вы путем логических рассуждений наверняка раскрывали тайны?

— Увы! — грустно заметил Холмс. — Дедуктивный метод — очень сильное средство, но, чтобы его использовать, нужно иметь огромную исходную информацию. А ею не располагает ни один сыщик во время следствия, и ему приходится работать в обстановке жесточайшего информационного голода. Какой там дедуктивный метод! Говоря откровенно, — он перешел на шепот, — я не пользуюсь этим методом!

Ватсон остолбенел. С трудом открыв рот, он произнес:

— А как же ваши рассказы, которые я записал и опубликовал под псевдонимом «Конан-Дойль»? Ведь вы превосходно и убедительно описывали процесс раскрытия преступления! И это действительно был дедуктивный метод.

— В том-то и дело, что «описывал», — уныло заметил Холмс. — Описывать преступление легко, а вот раскрывать его куда труднее. И делается это вовсе не дедуктивным, а, как правило, индуктивным методом. Если, разумеется, преступление не тривиальное. Между нами, спутать дедукцию с индукцией непростительно даже студенту первого курса. Рань-

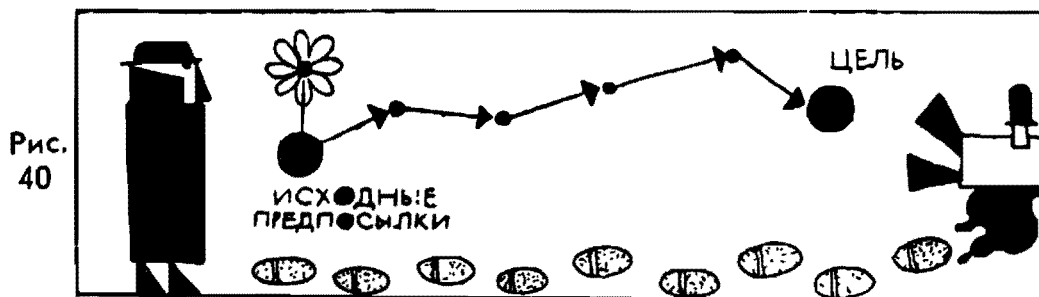
ше я искренне верил в то, что действую дедуктивно. А на поверку оказалось наоборот. Ведь дедукция и индукция прямо противоположны друг другу. Дедукция — это рассуждения от общего к частному, а индукция — наоборот: от частного к общему. Вот и получается, что я говорил одно, а поступал иначе. Понял я это только после того, как появились работы по эвристическому методу решения задач. А он весьма близок к индуктивному.

— Как же так! — еще больше разволновался Ватсон. — Неужели вы смогли спутать столь простые вещи?

— Все дело в том, что я вам описывал процесс раскрытия преступления *после* того, как оно было раскрыто, а не во время его раскрытия.

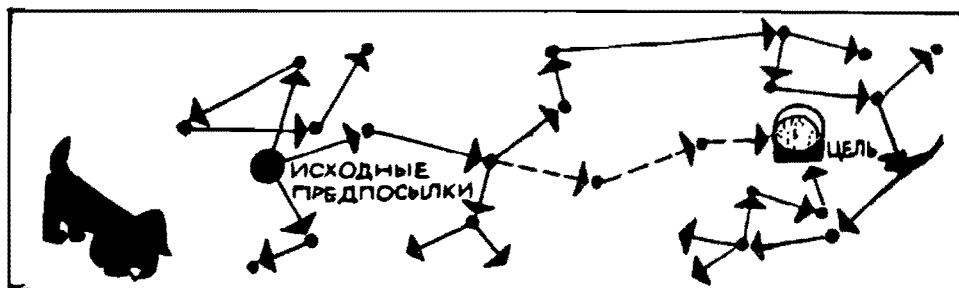
— Какая же здесь разница?

— Очень большая! После раскрытия все кажется таким простым и естественным. Все рассуждения в процессе описания направлены в одну сторону к уже известной цели. Это можно, к примеру, изобразить в виде следующей цепочки умозаключений. — И Холмс нарисовал чертеж (рис. 40). — В действительности во время размышлений — до раскрытия



преступления — происходит совсем иное. Цель не ясна, и неизвестно, как ее искать. Цепь умозаключений очень напоминает поведение слепого щенка, вышедшего на поиски блюда с молоком. Ее можно представить примерно в таком виде. — На листе бумаги появилась другая картинка (рис. 41). — Здесь много ложных догадок, которые не подтвердились и поэтому отбрасываются, а сам путь к цели чрезвычайно витиеват и запутан. Случайность здесь играет решающую роль. После того как случайно цель будет найдена, всегда можно проложить кратчайший

Рис.
41



логический путь — он показан пунктиром. — Но, как видите, не он привел к цели!

— Можно ли сказать, что описание процесса поиска истины всегда дедуктивно, а сам процесс ее отыскания происходит индуктивным путем? — робко спросил Ватсон.

— Совершенно верно! Вы, доктор, всегда великолепно схватываете мою мысль...

— ...и попадаю в калашу, — закончил Ватсон. — Хорошо еще, что я догадался печатать свои записки под псевдонимом.

— Не волнуйтесь, милый доктор, — улыбнулся Холмс. — Ваша репутация будет не запятнана, если список типографских опечаток вы расширите добавлением, что вместо слова «дедукция» следует читать «индукция», и все великолепно уладится!

— Я всегда считал, что для вас, мой дорогой Холмс, нет неразрешимых проблем, — растроганно закончил Ватсон.

Этот разговор придуман автором, чтобы показать, что творческий процесс поиска истины не может быть строго описан в виде логических умозаключений. Всякому такому процессу сопутствует случайный фактор, который и вносит необходимое разнообразие и «искру божью» в этот процесс поиска.

Рассмотрим различные способы утилизации случайности — способы управления, в которых используется элемент случайности. Одним из таких способов является *метод Монте-Карло*.

2. МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО

Монте-Карло! С этим словом обычно связывают игорные дома крохотного княжества Монако, затерянного где-то на юге Франции и состоящего из одного города Монте-Карло.

Почему же вдруг в последнее время слово «Монте-Карло» замелькало на страницах серьезных технических и математических журналов?

Давайте посмотрим поближе, что такое игорная рулетка. Представляет она собой круглое мелкое корытце, внутри которого имеется 100 лунок. В корытце с большой скоростью выпускается легкий шарик, который, многократно отскочив от его краев, застревает в одной из лунок. Можно ли точно предугадать, в какую именно лунку упадет шарик?

Конечно, можно! Если точно определить направление вылета шарика, если точно учесть малейшее дрожание руки бросающего, если точно рассчитать направление отскока при каждом соударении шарика со стенкой корытца, если... Одним словом, если точно знать все условия движения шарика, знать движение всех его молекул, то можно предсказать место его остановки.

Но совершенно ясно, что учесть точно все факторы, влияющие на движение шарика, никак не удастся. Не удастся еще и потому, что нельзя определить движение его молекул ввиду запрета, накладываемого соотношением неопределенности, о котором мы уже говорили выше. Да, названных факторов так много и они так быстро и неуловимо меняются, что шарик с равной вероятностью может упасть в любую из лунок, даже если бы не действовало соотношение неопределенностей.

В природе, в технике, в общественной жизни тоже очень часто происходят процессы, носящие вероятностный характер: падение камня с горы, полет птицы, охотящейся за мошкаркой, число людей, едущих в поездах, самолетах и трамваях, число банкротств в периоды кризисов капиталистической системы, количество выведенных мальков и количество взрослых рыб, которое сохранится в водоеме, количество детей, которые родятся через 5 или 10 лет. Подобных примеров миллионы. В каждом из них есть элемент неопределенности, в каждом есть вопрос, на который нельзя дать *точный* ответ. Но ведь многие вопросы такого рода требуют ответа. Например, сколько нужно выпускать самолетов, паровозов, пароходов и трамваев, сколько заводов и какой мощности необ-

ходимо строить в ближайшие годы, чтобы обеспечить потребности населения, и каковы будут эти потребности?

Для их решения и применяются вероятностные методы, методы, которые не говорят определенно сколько, но позволяют с достаточной точностью узнать, в каких пределах будет изменяться искомая величина или с какой вероятностью можно ожидать то или иное событие. Один из таких методов и назван методом Монте-Карло.

Чтобы понять сущность его, рассмотрим несложный, но наглядный пример.

Один эксперимент и его математическая модель

Пусть требуется найти площадь круга, радиус которого равен 1 сантиметру. Вычисляется она, как известно, по формуле πr^2 и равна $3,14 \cdot 1^2 = 3,14$, то есть числу π .

А задумывались ли вы, как, хотя бы приближенно, определить число π ?

Методом Монте-Карло это сделать довольно просто.

Будем много раз бросать песчинку на лист бумаги, сплошь покрытый окружностями радиусом 1 сантиметр (рис. 42). Песчинка будет падать либо в кружки, либо в пустоты между ними (например,

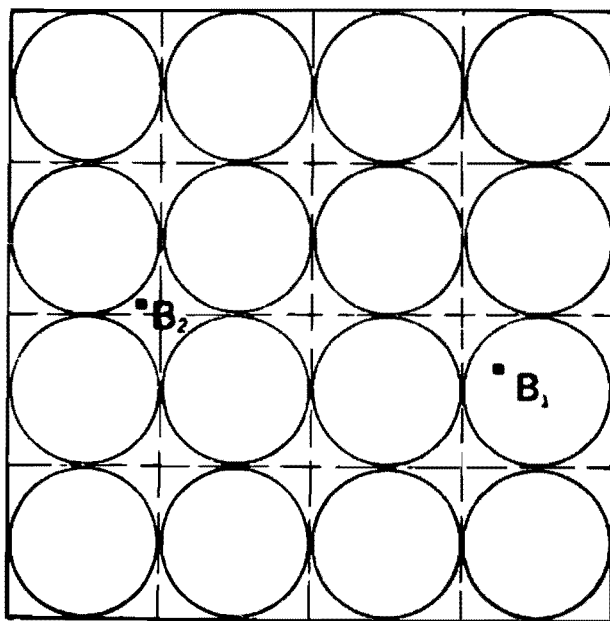


Рис.
42

B_1 — положение песчинки в кружке, B_2 — снаружи). Чем больше площадь, занятая кружками, тем чаще песчинка будет в них попадать.

Пусть вся площадь квадрата, равная 100 см^2 , занята кружками — их будет 25, и пусть из 1000 (N) бросаний песчинка 700 (n) раз упадет в кружки и 300 раз на пустоты. Тогда естественно считать, что кружки занимают

$$\frac{n}{N} = \frac{700}{1000} = \frac{7}{10}$$

части площади, или 70 см^2 .

Разделив полученный результат на 25, мы получим площадь одного кружка, а из нее легко вычислить число π . Причем результат будет тем точнее, чем большее число раз мы будем бросать песчинку. Как легко заметить, такой эксперимент займет довольно много времени.

Давайте для ускорения работы сделаем математическую модель этого опыта. На рисунке 43 показана часть нашего поля, на которое бросалась песчинка. Ввиду симметрии всего поля вполне достаточно взять часть, ограниченную дугой. Как нетрудно видеть, все наше поле состоит из 100 таких частей. Для моделирования случайного бросания песчинки выберем два случайных числа — A и B , которые больше нуля и меньше единицы каждое:

$$0 < A < 1; \quad 0 < B < 1.$$

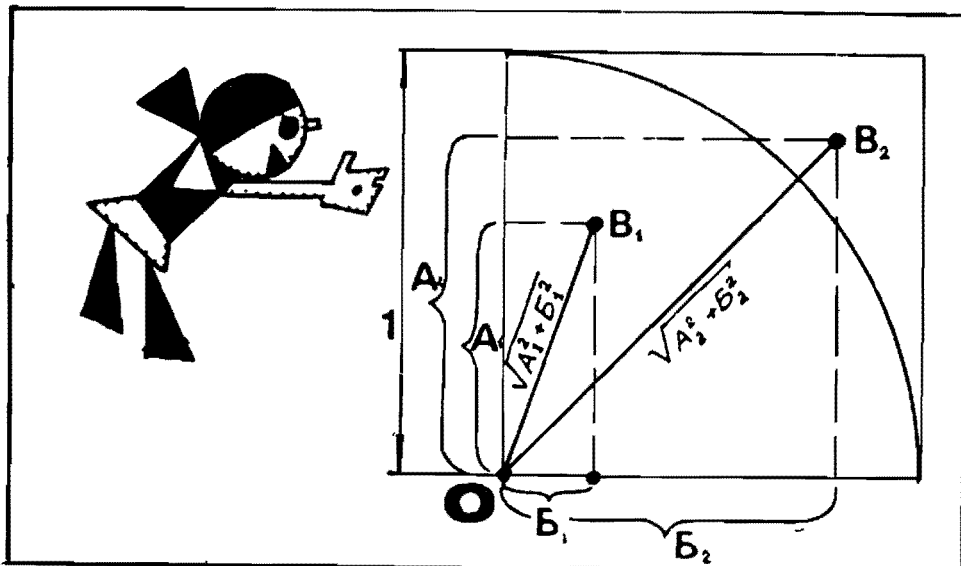


Рис.
43

Откладывая на рисунке 43 от точки O по вертикали числа A , а по горизонтали числа B , получаем точку B на пересечении перпендикуляров. Например, числа A_1 и B_1 определяют точку B_1 , а числа A_2 и B_2 — точку B_2 . Точки B_1 и B_2 моделируют различные положения песчинки в описанном выше опыте. Если $A^2 + B^2 \leq 1$ (меньше или равно), то песчинка расположена внутри окружности. Если $A^2 + B^2 > 1$ (больше) — она вне его. Таким образом, чтобы знать, попала ли точка B внутрь окружности, достаточно проверить выполнение неравенства $A^2 + B^2 \leq 1$.

Теперь можно сопоставить основные моменты эксперимента и его математической модели.

| Физический эксперимент | Математическая модель этого эксперимента |
|--|---|
| 1. Бросание песчинки на поле (рис. 42) | 1. Выбор двух случайных чисел A и B больше 0 и меньше 1 |
| 2. Проверка попадания песчинки в один из кружков или на его край | 2. Проверка выполнения неравенства $A^2 + B^2 \leq 1$ |

Математическая модель эксперимента готова.

Теперь вместо физического эксперимента (бросания песчинки на расчерченное поле) можно вычислять результат этого эксперимента. Для этого надо иметь лишь таблицу случайных чисел, карандаш и бумагу.

Следовательно, физический эксперимент можно заменить математическим экспериментом — расчетом.

Давайте взвесим возможности обоих способов определения числа π с точки зрения двух факторов: случайных помех и затрат времени на одно и то же число «бросаний».

Физический эксперимент, как и всякий реальный процесс, в значительной мере подвержен действию случайных помех. Эти помехи проявляются, например, в виде неточности в определении положения песчинки, в виде неровности поверхности поля, что создает определенную тенденцию — песчинки будут

«предпочитать» останавливаться во впадинах этого поля. Другим источником неточности будет сам чертеж — неидеальность окружностей и т. д.

Все эти неточности отсутствуют в математическом эксперименте. Правда, говоря уж очень строго, и здесь есть помехи, как-то: ошибки расчета и округления, но их можно сделать очень малыми и пренебречь ими.

Следовательно, с точки зрения погрешностей математический эксперимент предпочтительнее физического.

Теперь о времени. Здесь пальму первенства следует отдать физическому эксперименту. Действительно, расчет на бумаге двух квадратов и их суммы всегда займет больше времени, чем бросание песчинки. Самый неловкий экспериментатор здесь всегда обгонит самого искусного вычислителя.

Но ведь существуют быстродействующие вычислительные машины, которые указанный расчет могут сделать за доли секунды!

Нельзя ли воспользоваться ими для нашего расчета? Попробуем сделать это.

Современная быстродействующая универсальная вычислительная машина без труда справится с этой задачей в кратчайшее время, но... Но для этого следует прежде всего составить программу ее работы. Как человеку-расчетчику нужно указать, что и как считать, так же и вычислительная машина должна «знать», что и как ей считать, иначе она не будет работать. Эту функцию выполняет программа.

Посмотрим, как составляется программа работы вычислительной машины.

Прежде составим программу самого эксперимента. Она показана на рисунке 44. На нем каждый прямоугольник обозначает распоряжение к действию, которое необходимо произвести. Стрелка, выходящая из прямоугольника, показывает, что следует делать при выполнении предыдущего распоряжения. Если из прямоугольника выходят две стрелки, то должно быть указано, в каких случаях движение идет по одной, а в каких — по другой стрелке.

В схему опыта введены две пустячные операции: запоминание числа экспериментов вообще и удачных экспериментов в частности. Эти очевидные процеду-

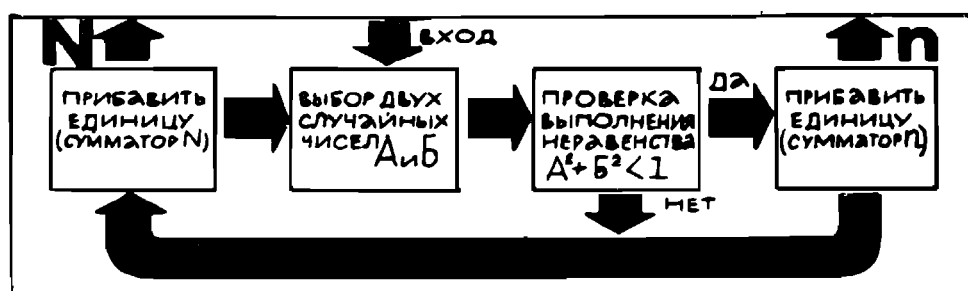
Рис. 44



ры вводятся потому, что программа должна в точности соответствовать физическому эксперименту. Ведь бросая песчинку, мы считаем число попаданий в кружки и общее число бросаний. Если их не произвести, то весь эксперимент теряет смысл, так как числа N и n и являются той информацией, которую мы получаем в эксперименте.

Совершенно аналогично составляется программа работы вычислительной машины. Вид программы представлен на рисунке 45. Здесь операциям запоминания в физическом эксперименте соответствуют счетчики чисел N и n .

Рис. 45



Внимательно рассматривая обе схемы, мы заметим, что они очень похожи и имеют одинаковую структуру: одинаковое число прямоугольников, а также одинаковое число и направление стрелок, показывающих один и тот же характер связей. Это и не удивительно — обе схемы описывают, по существу, один и тот же информационный процесс определения чисел N и n . Значит, и результат следует ожидать одинаковый: будем ли мы бросать песчинку и определять ее место падения (действовать по программе физического эксперимента) или будем этот эксперимент рассчитывать математически (действовать в соответствии с программой его математической модели).

Таким образом, для получения результата (числа n) в нашем распоряжении имеются два средства: физический эксперимент и расчет по модели этого эксперимента на быстродействующей вычислительной машине. Давайте взвесим все «за» и «против».

| | Определение числа n в физическом эксперименте | Расчет числа n на быстродействующей вычислительной машине |
|----------|--|---|
| «За» | <ol style="list-style-type: none"> 1. Простота эксперимента (не надо вычислительной машины) 2. Наглядность | <ol style="list-style-type: none"> 1. Быстродействие 2. N — велико 3. Высокая точность в определении числа n |
| «Против» | <ol style="list-style-type: none"> 1. Большие затраты времени на один эксперимент 2. N — мало 3. Малая точность в определении числа n | <ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость составления программы 2. Необходимость иметь быстродействующую вычислительную машину |

Как видно, если не бояться вычислительной машины и иметь возможность обращаться к ней — а сейчас она доступна практически всем, — то преимущество, несомненно, принадлежит расчету, а не эксперименту. Следует все же твердо помнить, что предварительно должна быть составлена математическая модель эксперимента. Только в этом случае можно «разыграть» эксперимент на машине и воспользоваться ее огромным быстродействием для «проведения» большого числа проб.

Вот такое моделирование физических экспериментов на вычислительных машинах и называется методом Монте-Карло.

Элемент случайности здесь совершенно необходим, поскольку лишь он отражает ту случайность и неопределенность, которая всегда есть в моделируемом физическом эксперименте. В связи с этим

метод Монте-Карло часто называют *методом статистического (вероятностного) моделирования*.

Случайность в машинах специально создается так называемыми датчиками — генераторами — случайных чисел и отражает случайные процессы, происходящие в реальном эксперименте. Такое устройство позволяет вместо громоздкого физического эксперимента строить его удобную математическую модель и многократно «разыгрывать» ее на вычислительной машине.

Моделируемая на машине случайность необходима и полезна. Она отражает вероятностный характер эксперимента и может быть как полезной, так и вредной — быть помехой. В рассмотренном выше эксперименте, позволяющем определить число n при помощи случайных бросаний, случай полезен. А в большинстве других явлений случай врывается как помеха, которую и приходится моделировать по Монте-Карло.

монте-карло и баллистические ракеты

Рассмотрим, как мог бы быть применен метод Монте-Карло для расчета точки попадания баллистических ракет.

Траектория полета и точка падения ракеты могут быть совершенно точно вычислены, если все параметры, влияющие на траекторию ее полета, точно известны. Нужно точно знать вес ракеты и топлива, силу и направление ветра в разных слоях атмосферы на всем пути полета, изменение плотности воздуха, температуры и давления во всех точках, которые ей предстоит пройти, и многое, многое другое.

Но на практике как раз все эти параметры никак нельзя точно определить. Они меняются, причем меняются быстро. Тщательные изучения и наблюдения дали только пределы изменений этих параметров и их статистические свойства. Как же быть?

Для определения точности попадания ракет можно поступить так, как мы поступали в эксперименте с песчинками, — составить программу вычислений траектории движения ракеты. В эту программу вхо-

дят неизвестные нам параметры. Будем выбирать случайные значения каждого из них в указанных пределах и затем определять точку приземления ракеты. Для другого расчета нужно выбрать другие случайные значения неизвестных параметров, но в тех же пределах и с теми же статистическими свойствами, которые известны заранее из наблюдений. Проведя серию расчетов, получают точки встречи ракеты с землей. Они случайны, так как каждая получена в результате разыгрывания случайного эксперимента. Но большое их число определяет так называемый «эллипс рассеяния».

Эллипс этот несет чрезвычайно ценную информацию о качестве и эффективности ракеты. По нему можно определить район, где наиболее вероятно ожидать ракету. Размеры его свидетельствуют о точности попадания и т. д.

Как видно, с помощью метода Монте-Карло можно получить весьма ценную информацию о точности попадания ракеты в цель без проведения чрезвычайно дорогих практических запусков ракет и тем самым сэкономить огромные средства.

Весьма своеобразное применение метода Монте-Карло связано с решением некоторых задач математической физики — задач распространения тепла. Поясним это на следующем простом примере.

пьяный решает задачу

Да-да! И не просто пьяный, а пьяный в стельку, когда ему все равно, по какой пойти дороге, если он стоит на перекрестке. Именно такой, вдрызг пьяный, может помочь решить одну из сложнейших задач математической физики — задачу о распространении тепла в сплошной среде. Вы удивляетесь?

Не торопитесь! Рассмотрим задачу о нагревании пластинки, или, как говорят, плоскую задачу теплопроводности. Такие задачи приходится решать всем, кто имеет дело с оболочками различных нагревательных приборов, таких, как аппараты для сушки волос, головки баллистических ракет, корпуса плавильной печи и т. д. В них всегда очень важно определить по-

ведение температурных напряжений, возникающих в агрегате. Они могут вызвать катастрофу, если слишком велики.

Возьмем для простоты прямоугольную пластинку, края которой находятся под определенной известной температурой. Задача заключается в том, чтобы вычислить температуру в произвольно выбранной точке пластинки.

У читателя, по-видимому, возникнет недоумение в связи с тем, что здесь явно нет никакой случайности, в то время как выше говорилось, что метод Монте-Карло неразрывно связан со случайными экспериментами. Это недоумение, если оно появилось, совершенно неоправданно, так как законы распространения тепла определяются термодинамикой, которая самым тесным образом связана со статистическими — случайными — процессами.

Известно, что тепло распространяется не непрерывно, а отдельными небольшими порциями, или, как говорят, квантами. Можно считать, что кванты тепла движутся хаотично, в случайных направлениях. Если в выбранной нами точке «собралось» их много, то она, естественно, будет более нагретой по сравнению с той, где таких квантов меньше.

Чтобы узнать, какая в нашей точке температура, нужно определить, как часто в нее «приходят» порции энергии с разных сторон пластинки. Эти порции, начав свое случайное путешествие на одном краю пластинки, заканчивают его на другом. При этом траектория их движения по пластинке совершенно случайна. Нетрудно заметить, что через каждую точку пластинки обязательно пройдут случайные траектории, берущие свое начало на разных кромках пластинки. И температура в этой точке будет равна среднему значению принесенных температур. Например, если через точку проходят траектории, взявшие начало преимущественно на кромке с температурой 50 градусов, то температура в ней будет близка к 50 градусам. Если траектории идут от кромки в 50 градусов и от кромки в 20 градусов — и первых в два раза больше, чем вторых, то температуру точки, как нетрудно догадаться, можно определить простым вычислением:

$$t^{\circ} = \frac{2 \cdot 50 + 20}{3} = 40 \text{ градусам.}$$

Все рассказанное допускает следующую «алкогольную» интерпретацию, с которой мы начали рассказ.

Представим себе ненадолго, что существует город алкоголиков (автор приносит свои извинения за столь вольное обращение с... представителями этой бравой команды). Пусть он имеет прямоугольную форму, подобную форме нашей пластинки, и все его винные магазины вынесены на окраины; причем каждый магазин узко специализирован и продает вина только заданной крепости. Так, магазин № 40 торгует только «Столичной», № 60 — ромом, а № 12 — сухими грузинскими винами. Допустим еще, что номера магазинов соответствуют температурам кромок той пластинки, о которой говорилось выше, то есть градусы температуры на кромке пластины, градусы крепости напитков в магазинах и номера магазинов на границе нашего выдуманного города совпадают.

Жители этого веселого города, зайдя в магазин, покупают бутылку и начинают с ней свое хмельное и, конечно, случайное путешествие по улицам. Встретившись с другими жителями, которые также запаслись своими бутылками, они делают коктейль, сливая в равных пропорциях содержимое своих бутылок. Крепость полученного коктейля будет нести информацию о том, откуда принесены бутылки и чему равна температура в точке, где этот коктейль распит. Значит, чтобы определить температуру в какой-нибудь точке пластинки, достаточно попробовать коктейль в соответствующем этой точке пункте города алкоголиков.

Однако, наблюдая поведение случайных траекторий, легко заметить, что нашему желанию выпить и определить крепость коктейля будут препятствовать по крайней мере два обстоятельства.

Первое, желая попробовать коктейль на каком-нибудь перекрестке нашего городка, нам придется иногда очень подолгу ждать очередного жителя с бутылкой, так как, бесцельно шатаясь по улицам, он не скоро попадет именно в то место, где мы его ждем.

Более того, большинство их совсем не проходит через точку, где мы ждем и температура которой нас интересует. Поэтому определение температуры подобным образом потребует массы ненужных затрат.

Очевидно, что еще дольше придется ждать, чтобы на нашем перекрестке одновременно встретились несколько жителей и начали делать коктейль (именно это событие нас больше всего интересует). Однако последнее обстоятельство можно преодолеть: не дожидаясь, когда встретятся два и более жителя, собирать дань с каждого проходящего и сливать ее в одну бутылку. Тогда, приложившись к ней, легко определить крепость «ерша» и тем самым оценить температуру в соответствующей точке пластинки.

Но как поступить, чтобы пьяницы почаще выходили на наш перекресток? Подзывать их нельзя — нарушится случайность блужданий. Так как же быть?

Для этого применяют следующий остроумный прием, основанный опять на использовании случайности. Если посмотреть на случайную траекторию, которая обрывается на краях пластинки, то невозможно сказать, где ее начало и где конец. Объясняется это тем, что случайная траектория не зависит от направления движения. Следовательно, можно рассматривать только те траектории, которые выходят из выбранной нами точки, и прослеживать их до пересечения с одной из кромок пластинки, после чего следует «обернуть» движение и считать, что все было наоборот. Тогда эта траектория «принесет» в нашу точку температуру кромки, из которой она «вышла».

А в веселом городе прием этот следует проводить так. Надо взять совсем захмелевшего случайного жителя, пометить его и выпустить из интересующей нас точки города. Продавцов всех винных магазинов при этом попросить сообщить по телефону, в каком магазине помеченный парень закончил свое путешествие. Аналогичную операцию нужно проделать и с другими любителями выпить. Теперь осталось ждать у телефона звонков из магазинов и записывать их номера. Если позвонили из магазинов № 40, 40, 60 и 20, то коктейль в интересующей нас точке имеет крепость

$$t^{\circ} = \frac{1}{4} (40 + 40 + 60 + 20) = 40 \text{ градусов.}$$

А согласно нашей аналогии такую же температуру имеет и соответствующая точка на пластинке.

Итак, поставленную задачу определения температуры в заданной точке можно решить совсем просто. Надо из этой точки провести несколько случайных траекторий и определить температуру в местах их пересечения с кромкой (напомним, что температура на кромке пластинки задана и считается известной). Тогда температура в выбранной нами точке будет равна среднему арифметическому температур концов случайных траекторий, выходящих из этой точки.

В этом и состоит сущность применения метода Монте-Карло для решения задач по определению температуры.

Где же в нашем примере сама модель явления?

Оказывается, моделировалось движение тепла по пластинке. Ведь направление движения отдельных порций тепла случайно, поэтому мы и модель выбрали такую, в которой имели место случайно перемещающиеся объекты (пьяницы со случайными траекториями движения). Моделирование здесь позволило нам решить поставленную задачу.

модель пьяницы

До сих пор мы говорили о случайной траектории, прокладываемой пьяным, как о само собой разумеющейся вещи. На то он и пьяный, чтобы случайно плутать по городу.

При решении поставленной задачи на вычислительной машине необходимо уметь моделировать случайные траектории, не обращаясь к услугам алкоголиков. Как это сделать?

Случайные траектории можно прокладывать, например, следующим образом. Возьмем достаточно мелкую прямоугольную сетку и будем двигаться по ее узлам. Начнем из любого узла сетки (это перекресток в городе пьяниц). Выберем одно из четырех направлений: вверх, вниз, вправо и влево — и по нему пойдем.

Поскольку траектория должна быть совершенно случайной, то все четыре возможности должны быть

равновероятны. Для выбора направления движения можно воспользоваться простым приемом: бросанием одновременно двух монет. Эти монеты при каждом бросании будут давать один из четырех вариантов: *ЦЦ*, *ЦГ*, *ГЦ* и *ГГ*, где *Ц* — обозначает тот факт, что монетка легла вверх цифрой, а *Г* — вверх гербом. Теперь осталось закодировать эти варианты. Пусть

при *ЦЦ* — надо идти вверх,
при *ГГ* — вниз,
при *ЦГ* — вправо,
при *ГЦ* — влево.

Очевидно, что подбрасывание двух монет дает совершенно случайную команду, после чего мы перемещаемся в следующий узел, совершая часть случайной траектории. Затем снова бросаем монеты, определяя следующее направление движения, и снова делаем шаг случайной траектории в новый узел и т. д. Вся полученная траектория, состоящая из кусочков прямых, параллельных осям решетки, и моделирует случайное блуждание на плоскости.

Подводя итог, заметим, что метод Монте-Карло заключается, по сути дела, в математическом моделировании физических экспериментов, в которых неизбежно присутствует элемент случайности. Многократная постановка физического эксперимента заменяется при этом составлением и многократным «проигрыванием» математической модели данного эксперимента. Значит, вся трудность заключается в составлении модели. И если вам удастся ее сделать, то решить задачу методом Монте-Карло уже не представит большого труда; надо просто запрограммировать и передать ее на быстродействующую вычислительную машину.

Поэтому метод Монте-Карло часто называют *методом математического экспериментирования*, или *методом статистических испытаний*, подчеркивая тем самым многократность решения задачи.

В заключение следует отметить, что метод Монте-Карло был создан и получил развитие лишь после того, как появились быстродействующие вычислительные машины. «Ручное» применение метода лишено всякого смысла, так как он связан с большим числом однотипных вычислений.

Как одному человеку, даже самому сильному, не под силу построить пирамиду Хеопса, так в одиночку без вычислительной машины человек не может работать методом Монте-Карло.

Монте-Карло — метод больших скоростных вычислительных машин!

в. СЛУЧАЙ И ИГРА

Широкое поле для исследования роли случайности открывается в игровых ситуациях. Под игрой подразумевается взаимодействие двух сторон, имеющих противоположные интересы и действующих в рамках определенных правил. Повышенный интерес, проявляемый в последнее время к теории игр, объясняется ее применением к решению задач, возникающих во многих важных конфликтных ситуациях, в частности в области военного дела.

Оказывается, детские игры, такие, как игра в жмурки, в палочку-выручалочку и другие, игры взрослых, например картежные, в простой и незатейливой форме моделируют взаимоотношения сторон, скажем, двух государств, нескольких фирм и т. д.

Самым существенным и определяющим в игре являются антагонистичность и активность партнеров.

Несложно обыграть противника наивного и необщительного. В таком случае можно предпринять ход, прямо рассчитанный на его недогадливость. Ну, а если он только прикидывается простодушным и решил подстроить хитрую ловушку и поставить вас в безвыходное положение? Так неопытные шахматисты часто проигрывают из-за того, что делают «соблазнительные» ходы, надеясь на то, что противник не заметит угрозы. Вывод один: нельзя рассчитывать на ошибку, пассивность или недомыслие противника; необходимо исходить из того, что он умен, осторожен и также страстно жаждет выигрыша.

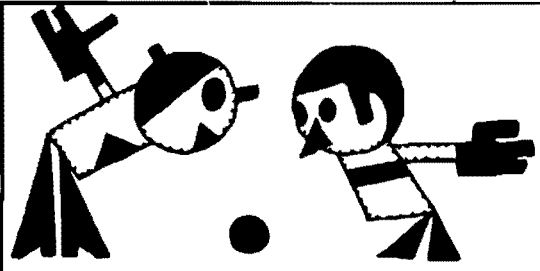
Простейшая схема ситуаций, рассматриваемых в теории игр, чрезвычайно проста. В игре участвуют два человека, интересы которых строго противоположны. Представим себе, что в каждом квадрате прямоугольной таблицы или на каждом поле шахматной

доски написано какое-то определенное число. В соответствии с правилом игры один игрок (A) должен выбрать строку, другой (B) — столбец этой таблицы. Результат этих двух ходов определяет число, находящееся в месте пересечения выбранных строки и столбца. Предполагается, что каждый игрок делает выбор, не зная решения противника.

Если на пересечении стоит число со знаком плюс, то выигрывает A , а B столько же проигрывает, если со знаком минус, — B выигрывает у A , причем размеры выигрыша зависят от величины числа. К подобной простой схеме сводится огромное множество конфликтных ситуаций, встречающихся в жизни.

Рассмотрим, для примера игру с таблицей, изображенной на рисунке 46.

Рис. 46



| $A \setminus B$ | B_1 | B_2 | B_3 | B_4 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| A_1 | -2 | -1 | 4 | -3 |
| A_2 | 3 | -2 | -3 | 1 |
| A_3 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| A_4 | 1 | -4 | -2 | 5 |

Изучая ее, игрок A немедленно обратит внимание на свою четвертую строку, A_4 , которая может дать ему максимально возможный выигрыш в 5 единиц, если B сыграет четвертым столбцом B_4 . Но, поразмыслив, он поймет, что B не дурак и на A_4 может ответить B_2 , выиграв 4 единицы. Аналогичные рассуждения относительно хода A_1 , обещающего в лучшем случае выигрыш 4 единиц, приводят к грустному выводу о проигрыше при любом ответе противника, кроме B_3 .

Игрок A убеждается, что нечего мечтать о журавлях в небе, а достаточно удовлетвориться синицей в руках. И начинает искать ход, который гарантировал бы ему хоть малый, но выигрыш. Такой трезвый взгляд на вещи немедленно вознаграждается.

Изучив таблицу, он замечает, что в его распоряжении есть одна строка — A_3 , которая всегда обеспечивает ему выигрыш независимо от хода противника. Это заметит и игрок B , которому ясно, что при ходе

A_3 он всегда проигрывает. И ему ничего не остается делать, как постараться понести возможно меньшие потери и пойти B_2 . Таким образом, в данной игре один из игроков непременно выигрывает, другой (уж так получилось) проигрывает.

Сделав подробный анализ, игроки могут либо не играть, поскольку исход игры уже ясен, либо игрок B опротестовывает игру, так как она для него невыгодна. Такой вывод сделан потому, что определена оптимальная стратегия поведения обоих игроков и эта стратегия заключается в выборе A_3 для игрока A и B_2 для B , что однозначно характеризует результат игры. Смыслом теории игр как раз и является отыскание оптимальных стратегий.

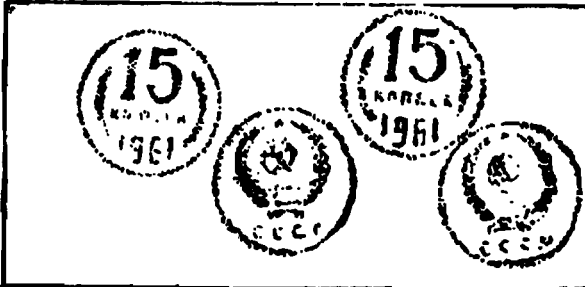
Мы рассмотрели нехитрый пример, когда каждый игрок располагал всего лишь четырьмя вариантами ходов. А если этих вариантов очень много? Представьте себе, какое огромное число возможных вариантов ходов имеется у шахматиста и особенно в середине игры. А сколько вариантов должен рассмотреть заказчик, решая вопрос о размещении заказов на нескольких предприятиях! Сейчас, чтобы просчитать все варианты в сложных ситуациях и определить оптимальную стратегию, используются быстродействующие вычислительные машины. Они могут делать сотни тысяч арифметических операций в секунду. Но предварительно нужно правильно проанализировать обстановку и составить таблицу, аналогичную рассмотренной выше.

И вот тут-то мы и встречаемся с новым осложнением. Очень часто ситуация такова, что, сколько бы мы ни считали, мы не найдем оптимального варианта хода. Более того, оказывается, в играх такие ситуации весьма распространены и в подавляющем большинстве игр оптимального хода не существует. Это легко объяснить. Если существует оптимальный ход, то игру не имеет смысла продолжать (что и сделал игрок B в изложенном выше примере). Интерес к игре немедленно пропадает, как только выясняется существование наилучшего хода. Именно поэтому все интересные игры не имеют наилучших ходов. Примером может служить широко известная игра в сравнение монет.

сыграем в орлянку

Наверное, многие знают, в чем заключается смысл игры в орлянку. Оба игрока независимо друг от друга выбирают цифру или герб своих монеток и после этого сверяют их. Если выбраны одинаковые стороны монет (две цифры или два герба), то выигрывает игрок *А*, а игрок *Б* выплачивает ему одно очко. При выборе разных сторон (герб и цифра) выигрывает игрок *Б*, и теперь он получает от *А* одно очко. Казалось бы, совсем просто. Таблица (рис. 47) имеет всего лишь два варианта для каждого игрока! Но, оказывается, это не так. И если в предыдущем случае можно было уверенно выбрать стратегию поведения — она сводилась к выбору наилучшего хода, — то здесь игрокам придется призадуматься.

Рис. 47



| | А | Б | ГЕРБ | ЦИФРА |
|-------|---|---|------|-------|
| ГЕРБ | | | 1 | -1 |
| ЦИФРА | | | -1 | 1 |

Действительно, пусть игрок *А* решил действовать по какой-то определенной стратегии, например, пусть он выбирает два раза герб, а затем один раз цифру. Ясно, что как только *Б* заметит эту закономерность, он тут же выберет контрстратегию: два раза цифра — один раз герб — и начнет уверенно выигрывать.

Если игрок *А* выберет стратегию посложней, то игроку *Б* будет труднее разгадать ее. Но как только он узнает, какова эта стратегия, он опять начнет выигрывать. А до тех пор, пока стратегия *А* еще не разгадана, игроку *Б* нужно выжидать и делать ни к чему не обязывающие ходы — лишь бы не проигрывать. Для этого ему достаточно играть случайно, подбрасывая вверх монетку и доверяя выбор своего хода случаю. Тогда его проигрыш или выигрыш будут случайными, но в среднем равными нулю. При этом он должен пристально наблюдать за игрой своего противника, чтобы установить его стратегию. Как толь-

ко он ее определит, так сразу же выработает контр-стратегию и начнет систематически выигрывать.

Следовательно, игрок *А*, играющий по определенной, как говорят, детерминированной, стратегии, оказывается всегда в худшем положении. В самом деле, пока игрок *Б* «расшифровывает» его стратегию, он может и выигрывать и проигрывать, но после расшифровки *А* ждет неизбежный проигрыш.

Но почему же это так? Почему в проигрыше всегда игрок *А*? Ведь оба игрока в совершенно равном положении!!!

Дело в том, что игрок *А* старался добиться выигрыша при помощи детерминированной стратегии. Он играл по строго выбранному правилу, которое игрок *Б* расшифровал. За время расшифровки оба они находились в равном положении, зато после расшифровки *А* сразу проиграл.

Может быть, ему следует почаще менять стратегию игры, чтобы игрок *Б* как можно больше времени тратил на расшифровку? Оказывается, и это его не спасет. Опять ситуация та же. Во время расшифровки оба игрока в равном положении, но сразу же после расшифровки *Б* уверенно выигрывает.

Читатель, наверное, уже заметил, что в этой игре есть периоды, когда игроки в равном положении, а именно, когда выигрыш или проигрыш определяется совершенно случайными ходами. И как ни странно покажется с первого взгляда, стратегия совершенно случайных ходов и является в данной ситуации наилучшей (оптимальной) стратегией поведения обоих игроков.

Игрок *А* наказывался неизбежным проигрышем именно за то, что он действовал неоптимальным образом и пытался воспользоваться детерминированной стратегией. Наилучшей формой поведения в рассмотренной игре является случайная стратегия, которая хотя и не приносит уверенного выигрыша, но и не дает такой возможности противнику. Он не знает, да и не может знать в силу случайной стратегии, какой ход сделает его противник. Поэтому очень часто в конфликтных ситуациях элемент случайности играет роль дымовой завесы, ставящей в тупик противника и парализующей его целенаправленные действия.

игра в секреты

Хорошим примером подобной ситуации является расшифровка секретных кодов. Положение здесь такое же, как в только что рассмотренной игре. Всякий шифр можно раскрыть, определив закономерность в передаваемых знаках. По существу, сложные шифры — это тоже дымовая завеса, предоставляющая одной стороне определенный выигрыш во времени, которое противник тратит на дешифрование. Здесь тоже имеются два противника: шифровщик, стремящийся скрыть смысл передаваемого сообщения, и дешифровщик противника, раскрывающий содержание сообщения.

На первый взгляд эта игра явно невыгодна шифровщику, так как он волей-неволей должен передавать осмысленные сообщения, которые противник всегда может расшифровать. При этом дешифровщик опирается на следующее известное положение теории информации: любой код можно расшифровать, если, во-первых, имеется достаточно длинное сообщение, зашифрованное этим кодом, и, во-вторых, если сообщение имеет смысл. Шифровщику это положение также известно, и он старается так закодировать информацию, чтобы вражеский дешифровщик затратил как можно больше времени на декодирование. Так обычно и поступает всякая секретная служба, передавая важные сообщения.

Наиболее эффективным приемом зашифровки смысла является, как это ни парадоксально, полное отсутствие смысла. Для этого либо пользуются чисто случайным кодом, либо передают бессмысленный набор букв или слов.

Правда, подобный метод скрывает смысл передачи не только от противника, но и от своего адресата. Поэтому случайным кодом пользуются лишь время от времени, перемежая его с осмысленным. Такой способ шифровки доставляет наибольшие неприятности противной стороне. Получив сообщение, ее дешифровщик должен прежде всего решить, есть смысл в нем или нет, либо определить, какая часть всего сообщения несет смысл, а какая случайная. Это как раз и является наиболее сложной задачей, на решение ко-

торой затрачивается много времени. Сам же процесс расшифровки, как правило, не занимает много времени, так как проводится он на быстродействующих вычислительных машинах.

Подводя итог, можно сказать, что элемент случайности в конфликтных ситуациях играет решающую роль. Он является той надежной мерой, которая сковывает активность противника и не позволяет ему добиться преимущества. Это обстоятельство заставляет вводить случайный фактор там, где детерминированное поведение приводит к проигрышу.

Такой наиболее характерной областью применения элемента случайности является военное дело. При любом столкновении противников отыскивается оптимальное поведение, которое часто оказывается случайным. В ряде экономических ситуаций — особенно в условиях капиталистической конкуренции — часто выигрывает тот, кто примет случайную стратегию поведения.

Широкое применение элемента случайности в конфликтных ситуациях основано на трезвом расчете и твердой уверенности, что случайная стратегия наиболее целесообразна и приводит к оптимальным решениям. А неудачником оказывается тот, кто не верит в оптимальность случая.

4. ОБУЧЕНИЕ, УСЛОВНЫЕ РЕФЛЕКСЫ И СЛУЧАЙНОСТЬ

Сейчас мы рассмотрим живой организм, который живет, развивается, действует и испытывает влияние внешней среды. Среда эта является его кормилицей, воспитателем, учителем, другом, врагом и судьей одновременно. «Человек есть дитя матери — природы и отца — случая», — писал С. Лем. Естественно, чтобы жить в этой среде, организм должен приспособиться к ней, приобрести определенные привычки, закрепить навыки, которые сделают его жизнь более или менее сносной.

Вопросы обучения и приспособления организмов нас будут интересовать не как физиологов, а как ин-

женеров, пытающихся использовать принципы живой природы в технических устройствах.

Создать техническую систему, выполняющую сложную функцию, чрезвычайно трудно. Например, нелегко сделать автоматическую линию, изготавливающую автомобиль «Волга». Но, пожалуй, еще труднее переделать ее на изготовление «Чайки». Ведь придется фактически сделать новую автоматическую линию для производства более сложной машины! А через несколько лет и этот автомобиль устареет и будет заменен более совершенным. Значит, придется делать новую, еще более сложную автоматическую линию. А нельзя ли поступить так: сделать одну линию, но такую, которую легко можно было бы «переучивать» на выпуск новых марок машин?

Нелепо? Нет! Принципиально вполне возможно!

Так почему же таких обучаемых автоматических линий нет?

А потому, что пока неизвестно, как это сделать. И именно поэтому чисто техническая необходимость заставила инженеров обратить внимание на поведение живых организмов, которые обладают свойствами и возможностями, далеко опережающими самые «умные» машины. В основу конструкции машин будущего может и должна быть положена способность к приспособлению, обучению и переучиванию, свойственная всем живым организмам.

Что же такое обучение? Чтобы ответить на этот вопрос, нам придется затронуть еще несколько других, в каждом из которых элемент случайности играет существенную или даже определяющую роль.

Как было сказано раньше, обучение, как и приспособление, происходит в результате взаимодействия организма с внешней средой, или же *ученика с учителем*. Определяя в процессе обучения их отношения, мы выделим одну из наиболее совершенных схем обучения, которая имеет место, например, в человеческом обществе. Речь идет о так называемой школьной системе обучения.

Другая форма обучения основана на подражательной способности ученика. Здесь ученик стремится повторять квалифицированные действия учителя, кото-

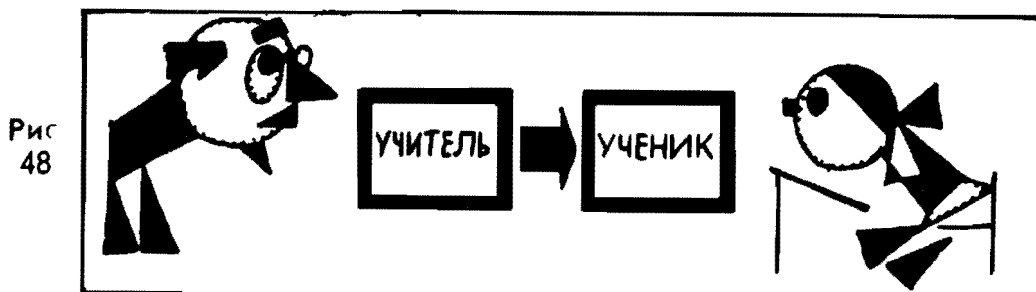
рый не объясняет, а лишь корректирует действия ученика.

Если же обучение выполняется внешней средой без специального учителя, то такое обучение будем называть *самообучением*.

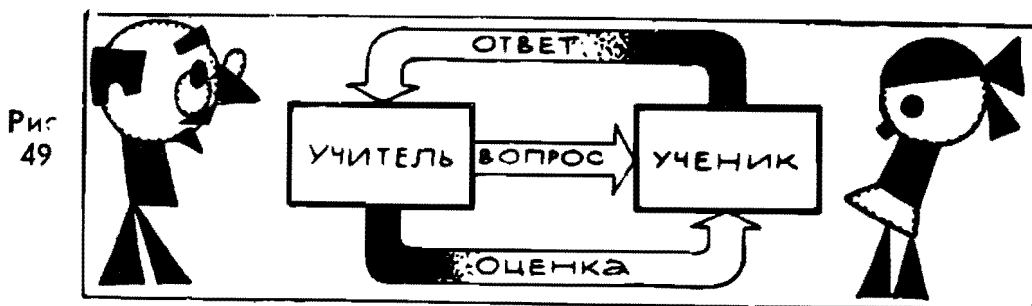
Рассмотрим каждую форму обучения в отдельности.

обучение за партой

Оно имеет две стадии. На первой (рис. 48) учитель сообщает ученику сведения, необходимые для обучения. Ученик воспринимает информацию, перерабатывает ее и запоминает. В противном случае он ничему не обучится. Учитель на первой стадии не знает, воспринимает ли ученик то, что ему сообщается, или только делает вид, что воспринимает. Следовательно, эффективное обучение должно предусматривать проверку и оценку учителем степени восприятия, понимания и запоминания передаваемых ученику сведений.



Эта вторая стадия обучения показана на рисунке 49. Учитель задает ученику контрольный вопрос, чтобы выяснить, насколько он усвоил материал на первой стадии. Ученик отвечает и тем самым дает возможность учителю выяснить степень обученности.



После этого учитель сообщает ученику оценку его знаний, определяя тем самым, насколько он правильно воспринял, понял и запомнил переданную ему информацию.

Заканчивается процесс обучения каким-то выводом, выражающимся в поощрении-наказании учащегося. В руках учителя имеется много средств воздействия, перепробованных за всю историю педагогики. Цель этого воздействия — стимулировать ученика к правильному восприятию.

Описанная схема учебы весьма поверхностна и не затрагивает вопросов о том, как воспринимает и запоминает информацию ученик и в чем заключается ее переработка. Они рассматриваются психологией и обсуждаться здесь не будут. Необходимо лишь подчеркнуть, что такая система обучения предполагает наличие отшлифованных знаний, которые следует передать ученику и которые могут ему пригодиться в дальнейшем.

Именно поэтому такая система является государственной. Все школы, училища, вузы применяют указанную систему.

Итак, школьная система, кроме ученика, обязательно должна иметь:

1. Учителя, осведомленного в предмете и непременно умеющего изложить этот предмет.

2. Методику опроса и оценки знаний учеников как обратную связь в процессе обучения.

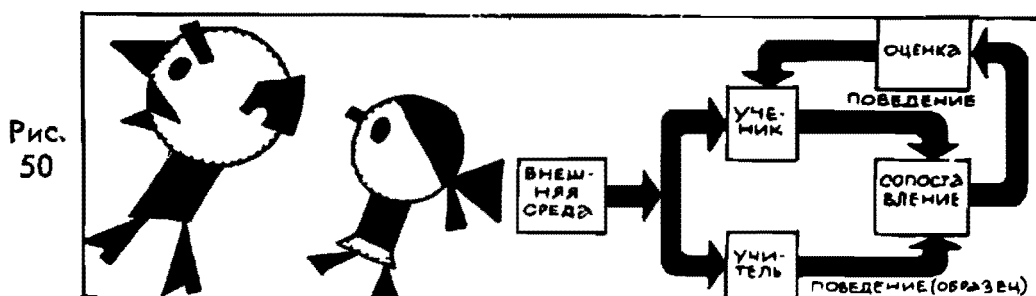
Описанная система обучения имеет как преимущества, так и недостатки. К числу ее преимуществ следует отнести то, что она дает учащимся возможность овладеть как довольно абстрактными областями знаний: математика, физика, — так и узнать большое число фактов: история, география.

И все же далеко не всему может учить подобная школьная система. Так, овладение законами логики еще не значит умение логически мыслить; анализ творческого процесса не может научить творить, а изучение основ и особенностей юмора не всегда может воспитать чувство юмора. Такая категория человеческих знаний нуждается в другой форме обучения. Назовем ее подражательной.

делай, как я!

Если школьная форма обучения имеет место только в человеческом обществе, то подражательная распространена значительно шире: ее мы наблюдаем во всем животном мире.

Смысл этой формы обучения сводится к следующему: попадая в какую-либо ситуацию, учитель и ученик самостоятельно и независимо друг от друга совершают определенные поступки. Результаты этих поступков сравниваются, и учитель наставляет ученика, если тот выбрал неправильную форму поведения. «Делай, как я!» — как бы говорит он (а часто и говорит) своему подопечному. И в этом существование такого обучения. Схема его показана на рисунке 50.



Здесь внешняя среда в виде ситуации воздействует на ученика и учителя. Учитель не может (или не хочет) объяснить ученику, как действовать в данной обстановке, чтобы получился наилучший эффект. Но сам он дает образец оптимального поведения. А затем поведение ученика сопоставляется с поведением учителя и корректируется отклонение.

Для этой схемы характерно то, что учитель умеет делать правильно, а знает он или нет, как делать, — это не так важно. Обучение происходит путем показа наиболее целесообразного (оптимального) поведения, а не рассказа о том, как следует себя вести в данной ситуации.

Обучение показом — основная форма обучения трудовой деятельности. Подражание наилучшим образцам является необходимым этапом в процессе становления мастерства.

Так, зеркало в гимнастическом зале — это не потакание самолюбанию, а необходимый инструмент

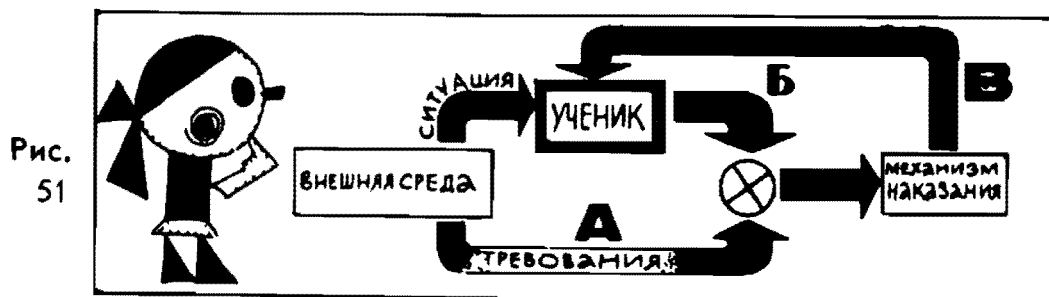
для оценки своего поведения во время выполнения упражнений. Болельщик посещает спортивные соревнования не только для того, чтобы пережить чувство азарта, но и увидеть образцы для подражания. Чтение художественной литературы — это не только увлекательное занятие, но и обучение методом показа на примерах произведения. Ведь известно, какое огромное влияние оказывает чтение на процесс становления человека; любимый литературный герой — это прежде всего образец для подражания.

В животном мире этот способ обучения широко распространен, особенно у птиц и млекопитающих. Любители канареек хорошо знают это. Чтобы молодого кенара научить петь, его следует отдать в ученье мастеру своего дела. Обоих сажают в одну клетку, и ученик начинает подражать маэстро. Если ученик способный, то вскоре из него выходит первоклассный певун. Но если учитель поет петухом, то и его старательный ученик начинает кукарекать.

«С кем поведешься — от того и наберешься» — вот девиз обучения методом показа.

самообучение

Наиболее распространенный случай обучения — самообучение. Внешне он более прост и показан схематически на рисунке 51. При самообучении и обучение и проверка его результатов одновременно производятся внешней средой. Ученик окружен ею, сталкивается с нею и взаимодействует. Всякая среда имеет свою специфику и предъявляет особые требования ко всему, что в ней находится. Требования эти не должны нарушаться учеником. На рисунке видно, как факторы среды «воздействуют» на ученика по каналу А. Ученик, определяя свое поведение, выполняет или не



выполняет требования среды, о чем и «сообщает» по каналу *Б*. Это означает, что на различные ситуации, возникающие в его жизни, он вырабатывает поведение, которое контролируется средой.

Заметим, что здесь каналами *А*, *Б* и т. д. обозначены логические связи, объединяющие ученика и внешнюю среду и образующие единую систему обучения. В действительности таких четких каналов, как в школьной системе обучения, здесь нет, однако связи имеются, и довольно прочные.

Продолжая обсуждение схемы, можно сказать, что среда как бы провоцирует ученика на некоторый шаблон поведения. Если он полностью удовлетворяет требованиям среды, то есть ведет себя соответственно шаблону поведения (проверка производится путем сопоставления шаблона и поведения ученика и обозначена кружком с перекрестием), то канал наказания *В* не возбуждается. Если же ученик вступает со средой в противоречие (не удовлетворяет ее требований), то может возбудиться некоторый механизм наказания и по каналу *В* воздействовать на ученика за отступление от шаблона поведения, предъявляемого внешней средой.

Вероятность возбуждения механизма наказания и мера наказания зависят от степени нарушения учеником требований среды. Любопытно, что сам факт наказания, а значит, и обучения более или менее случаен. Например, при нарушении учеником правил уличного движения наказание не всегда настигает его. Чем чаще происходит это нарушение, тем вероятнее, что ученик либо будет сбит идущим транспортом, либо оштрафован, то есть наказан, но в разной и случайной мере. Однако если необдуманно спрыгнуть с десятого этажа, то наказание будет сурово и неотвратимо.

Получается, что, несмотря на то, что никто ученику не показывает образцов правильного поведения, он все-таки начинает поступать правильно. Этот «тяжкий путь познания» ученик проходит сам, без чьей-либо помощи, а только за счет щелчков, тычков и подзатыльников, которые ему в обилии предоставляет внешняя среда.

По схеме самообучения ученик, как видно, учится

только на своих промахах и независимо от своего желания. Чем больше он допускает ошибок, тем лучше учится. Такой способ обучения «на своих ошибках» является, по-видимому, основным видом обучения в природе.

Заметим, что описанный способ самообучения во все не исключает обучения без наказания. Обучение на положительном опыте дает иногда лучший эффект по сравнению с обучением с наказанием.

На чем же основано обучение?

Из предыдущего видно, что главная роль при обучении принадлежит памяти. Но наличие одной памяти еще не обеспечивает возможности обучения.

ПАМЯТЬ ПОД МЫШКОЙ

Представим себе очень рассеянного человека, который все забывает, но умеет читать и понимать прочитанное. Для того чтобы этот человек мог жить и работать в окружающем его мире, ему составили подробнейшую инструкцию поведения на все случаи жизни (предположим на минутку, что это возможно) и научили его пользоваться. Таким образом, наш рассеянный мужчина обладает памятью, которую носит под мышкой. Можно ли сказать, что такой человек способен нормально существовать? Ну конечно, нет! Жизнь будет требовать от него быстрого ответа на множество вопросов, а он сможет отвечать на них не иначе, как перелистав всю инструкцию. Он не в состоянии будет ступить и шага, чтобы не остановиться и не заняться чтением всей инструкции хотя бы для того, чтобы вспомнить, как сделать следующий шаг.

Все это мы говорили для того, чтобы доказать, что одной памяти еще недостаточно для обучения и совершенствования своего поведения. Нужно уметь пользоваться своей памятью! А умение пользоваться памятью заключается вовсе не в перелистывании подряд всей инструкции (такой способ в технике называется сканированием), а в способности включать сразу необходимый раздел памяти. Так, переходя улицу, следует вспоминать правила уличного движения, а не меню вчерашнего обеда.

Как же устроена память человека, обеспечивающая не только размещение и хранение огромного количества информации, но и почти мгновенную выборку необходимых разделов записанной в памяти инструкции поведения?

Для ответа на этот вопрос нам нужно обратиться к условному рефлексу.

что такое условный рефлекс?

Условным рефлексом мы называем привычку организма реагировать определенным образом на одну и ту же жизненную обстановку. Эта привычка вырабатывается в результате многократного пребывания организма в аналогичных ситуациях. Например, взрослый человек никогда не подойдет слишком близко к огню, несмотря на его заманчиво красивый вид. Маленькие же дети смело хватают его ручками потому, что еще не обладают защитным условным рефлексом, и лишь после нескольких ожогов у них вырабатывается способность остерегаться огня. Способность эту мы и называем условным рефлексом.

Научился ли ребенок при этом чему-нибудь? Очень многому! Он приобрел защитную способность — боязнь ожога — и научился уклоняться от огня.

Однако организм может вырабатывать условный рефлекс не только в естественных, так сказать, условиях; его создают и преднамеренно, искусственно.

Наверное, многие слышали об опытах великого физиолога И. П. Павлова по воспитанию у животных искусственных условных рефлексов. Схема опытов вкратце такова.

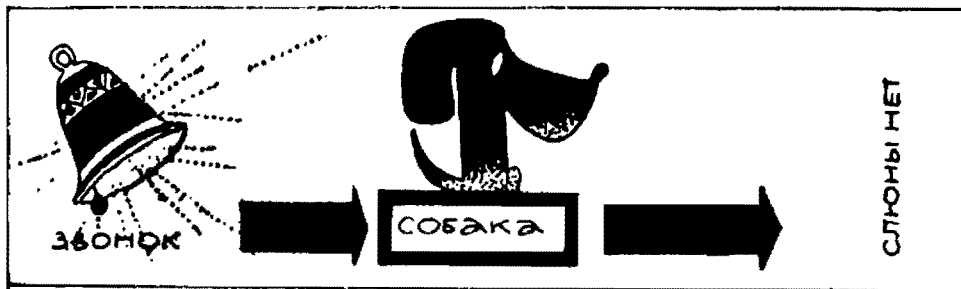
Собаке давалась пища. При этом у нее выделялась слюна. Заметим, что выделение слюны на пищу является безусловным рефлексом — врожденным качеством, переданным ей по наследству.

Как действует такой рефлекс, видно из рисунка 52. На систему «собака» воздействует вход «пища» (стрелка слева), тотчас же появляется слюноотечение, которое мы отметим на рисунке выходом «слюна» (стрелка справа). В начале опыта слюна выделялась только при виде пищи. Другие раздражители, допустим звуковые, слюноотечения не вызывали (рис. 53).

Рис.
52



Рис.
53



Потом И. П. Павлов накладывал на пищевой раздражитель еще и звуковой (при даче собаке пищи звонил звонок), то есть раздражители — «звонок» и «пища» — давались одновременно. Из рисунка 54 видно, что система «собака» имела уже два входа: «пища» и «звонок». Один из них, а именно «пища», безусловным образом вызывал появление выхода «слюна», другой же вход — «звонок» — сам по себе не вызывал никакой реакции системы, а лишь сопровождал «пищу». И при этом у собаки выделялась слюна.

Рис.
54

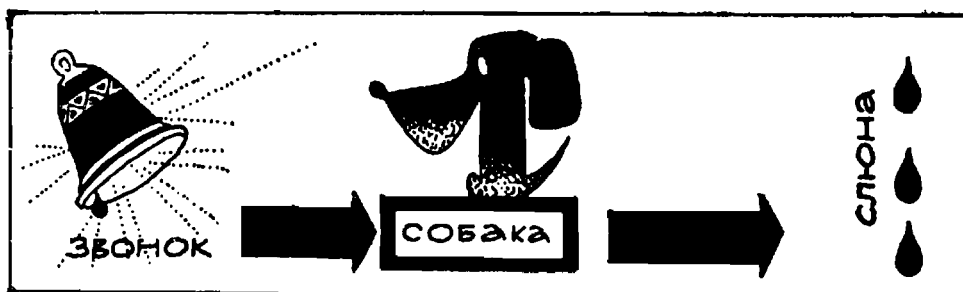


После нескольких сеансов собака начинала реагировать уже и на звонок без пищи так же, как на звонок с пищей или на одну пищу, то есть выделяла слюну. Так искусственно был создан условный рефлекс (рис. 55), которого собака ранее не имела.

Что же произошло?

В нервной системе собаки установилась связь между сигналами «пища» и «звонок». Эта связь оказалась настолько эффективной, что один сигнал можно

Рис.
55



было подменять другим, причем организм на оба сигнала реагировал совершенно одинаково. Было бы ошибочным считать, что собака перестала различать сигналы и они слились для нее в один, вызывающий слюновыделение. Вовсе нет! Просто собака установила связь между этими разными сигналами. Связь эта для нее заключается в том, что сигнал «звонок» сопровождается сигналом «пища», на который выделяется слюна.

Заметим, что в данном опыте сигнал «звонок» можно было бы заменить любым другим достаточно четким и не пугающим, таким, как свет, поглаживание и т. д. Условный рефлекс устанавливался бы и на эти раздражители, несмотря на их различное проявление и разницу в каналах, по которым собака их воспринимает: слух, зрение, осязание и др. Собака выделяла бы слюну и на эти раздражители, хотя они физиологически никак не связаны с питанием и пищеварением.

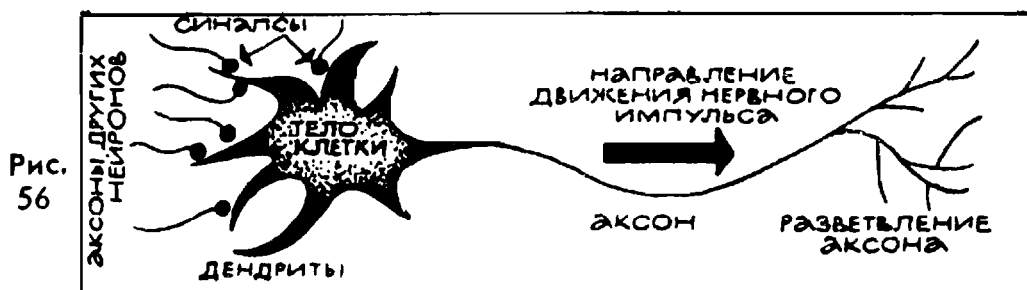
И в основе процессов обучения лежит образование условных рефлексов, которые связывают в организме различные нервные сигналы и обеспечивают одинаковую реакцию на эти сигналы.

Как же образуется условный рефлекс?

Чтобы ответить на этот вопрос, следует рассмотреть строение нервной системы.

устройство нервной системы

Нервная система живого организма состоит из огромного количества специальных клеток — нейронов. Чем сложнее организм, тем больше в нем нейронов. Так, нервная система человека содержит примерно 10 миллиардов (единица с десятью нулями) нейронов. На рисунке 56 схематически показано устройство одного такого нейрона.



Состоит он из основного тела, от которого отходит много коротких отростков, носящих название дендритов, и одного длинного нитевидного отростка — аксона, завершающегося древовидным пучком.

Нервное возбуждение распространяется от дендритов через тело клетки и аксон к древовидным отросткам аксона. Эти отростки обычно лежат вблизи дендритов других нейронов. Нервный импульс может возбудить нейрон, нейрон — передать возбуждение другим, другие — следующим и т. д. Связь между нейронами, как видно, осуществляется через промежуток между концами аксона одного нейрона и дендритами другого. Если они лежат в достаточной близости — промежуток между ними мал, — то в этом месте может образоваться синаптический узел, или синапс, связывающий эти два нейрона.

Синапс подобен сопротивлению в электрической цепи. Если это сопротивление велико, то связь между нейронами слабая и возбуждение одного нейрона может и не вызывать возбуждения другого (сигнал не распространяется). Если же сопротивление синапса мало, то имеется сильная связь и нейрон без труда возбуждается от аксона другого нейрона, с ним связанного.

Возбуждение нейрона происходит по принципу «все или ничего». Это значит, что нейрон может быть либо возбужден — и от клетки вдоль аксона к синаптическим узлам и далее к другим нейронам идет нервный импульс, либо не возбужден. Существует как бы порог чувствительности нейронов: если сопротивление синапса превышает некоторую величину, то возбуждение дальше не передается.

Но сопротивление синаптических узлов может меняться. Это изменение происходит в результате работы нервной системы в соответствии с правилом, сформулированным Хэббом. Оно гласит: «При одновремен-

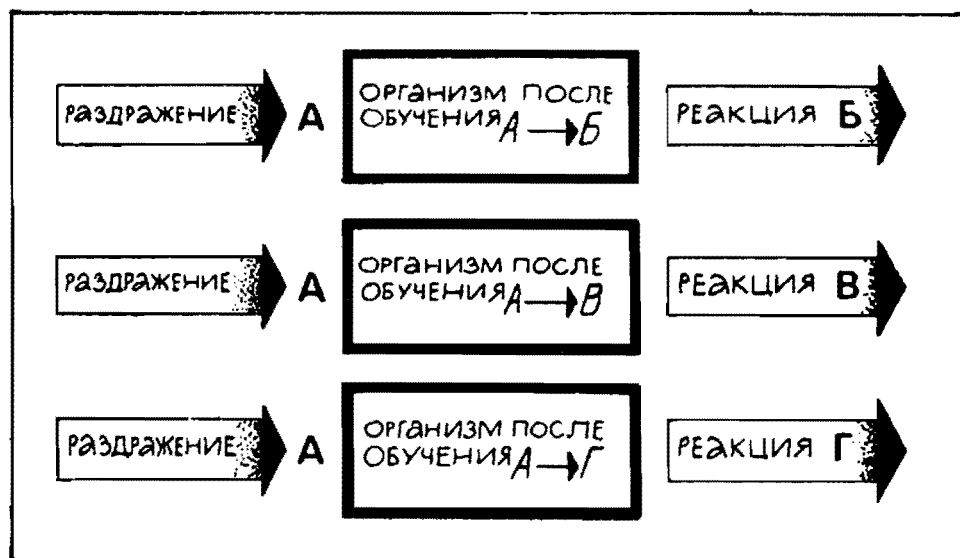
ном возбуждении двух нейронов, имеющих общий синаптический узел, сопротивление возбуждающего синапса уменьшается».

Иными словами, если два соседних нейрона несколько раз по разным причинам возбуждались одновременно, то сопротивление синапса, связывающего их, уменьшается и со временем может стать меньше критического. Теперь возбуждение одного нейрона может привести к возбуждению другого. Это происходит за счет того, что при одновременном возбуждении в синаптическом узле образуется стойкое вещество, которое понижает его синаптическое сопротивление. Это вещество со временем при отсутствии подкрепления может распасться, что приведет к «забыванию» факта одновременного возбуждения этих нейронов.

И выходит, что синаптическое сопротивление служит носителем памяти в организме, а элементарной ячейкой памяти является единичный синапс. Стало быть, направление движения нервных импульсов по системе определяется целиком и полностью сопротивлениями встречающихся синаптических узлов. И для различных синаптических сопротивлений одно и то же раздражение может приводить к различным реакциям организма.

Это показано схематически на рисунке 57. Здесь одно и то же раздражение прикладывается к одному и тому же организму, но после различных сеансов обучений. Например, звонок может вызывать у собаки

Рис.
57

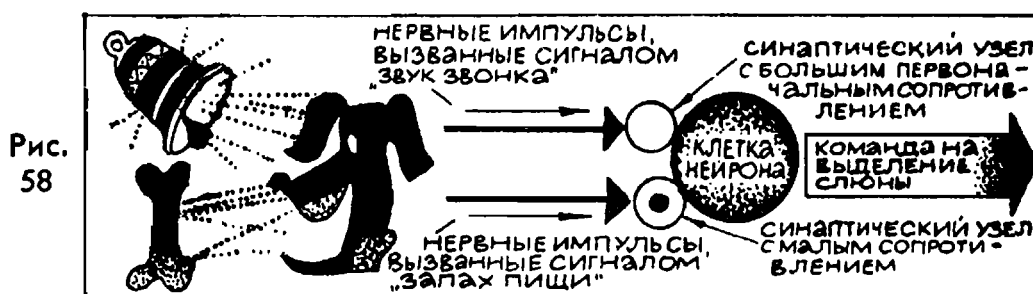


либо слюноотечение, если при обучении давать его одновременно с пищей, либо ярость, если после звонка дразнить ее палкой. В обоих случаях звонок является раздражителем, однако реакция собаки после обучения будет диаметрально противоположной: благодушно-веселое настроение, вызванное звонком в первом случае, и приступ ярости — во втором.

механизм образования условного рефлекса

Теперь можно описать механизм образования условного рефлекса. Вспомним рассмотренную выше ситуацию «звонок — пища — слюна».

Нервные импульсы «звонок» и «пища», пройдя определенный путь по нервной системе, встречаются у нейрона, управляющего аппаратом выделения слюны. Так как событие «звонок» не вызывало первоначально слюновыделения, то сначала сопротивление синапса было велико (рис. 58).



В результате многократного совмещения событий «пища» и «звонок» синаптическое сопротивление, по правилу Хэбба, уменьшалось, и нейрон стал возбуждаться сигналом «звонок». Как только это произошло — условный рефлекс установился.

Итак, для создания условного рефлекса необходимы, как видно, два обстоятельства. Первое: многократное повторение совмещенных событий, требующееся для уменьшения синаптического сопротивления. И второе: наличие в нервной системе организма общих точек пересечения, где сопоставляются нервные сигналы, представляющие оба события и участвующие в создании условного рефлекса.

Если первое условие зависит от обстановки обуче-

ния, то второе предъявляет определенные требования к структуре нервной системы обучаемого организма.

Отсюда следует существенный вывод: не всякий организм способен вырабатывать условные рефлексы заданного вида. Рефлекторная способность системы, то есть способность ее вырабатывать условные рефлексы, а вместе с ней и способность к обучению, определяется в основном числом синапсов и наличием синапсов определенного рода. Чем больше синаптических узлов, тем больше условных рефлексов способен выработать организм, тем, значит, лучше он приспособится к среде, больше «узнает», станет более «умным».

Как видно, дело не в числе извилин мозга, а в его структуре.

Теперь можно объяснить механизм «вспоминания», который заставляет организм независимо от воли и сознания вспоминать именно то, что необходимо вспомнить в данной жизненной ситуации.

Ясно, что вспоминание связано с усложненной формой условного рефлекса. Побывав несколько раз в определенной ситуации, организм вырабатывает некоторый рефлекс поведения, связывающий нервные сигналы, определяющие признаки этой ситуации, с необходимой реакцией поведения.

Воспитание рефлекса боязни и уклонения от огня является превосходной иллюстрацией, как ситуация «когонь» вызывает рефлекторно — независимо от воли и сознания — реакцию «боязнь» и «уклонение».

При таком «вспоминании» нет никакого сканирования памяти, то есть инструкцию (память) не нужно «листать», так как она сама открывается сразу на нужной «странице». Причем механизм, открывающий данную страницу, приводится в движение самой внешней обстановкой. И организму остается лишь реагировать так, как указывает эта страничка памяти.

Выше мы установили, что понижение синаптического сопротивления связано с обучением организма. Естественно задать вопрос: каковы синаптические сопротивления у новорожденного организма? Если все они очень велики, то он ничего «не умеет» и, как легко заметить, ничего не сумеет в будущем, так как для возникновения первых условных рефлексов необходи-

мо хоть немного синапсов с малым сопротивлением. Оказывается, нервная система новорожденного содержит определенное число врожденных пониженных синаптических сопротивлений, которые ему достались по наследству от родителей. Эти синапсы и определяют то крайне упрощенное поведение ребенка: способность глотать, кричать и т. п., которое названо безусловными рефлексам. Эти рефлекс дают возможность ребенку существовать и со временем образовать новые синаптические узлы с пониженным сопротивлением, на которых строятся затем все более и более сложные формы условных рефлексов.

гипотеза о случайной структуре мозга

Как было отмечено, приобретение условных рефлексов связано со структурой нервной сети и определяется числом связей между нейронами. Анатомическое исследование этих связей между десятью миллиардами нейронов нервной системы человека — задача чрезвычайно громоздкая по объему. И все же некоторые сведения о них уже получены. Оказывается, разные нейроны имеют различную длину. Некоторые нейроны соединяются только с близлежащими, а другие — с достаточно удаленными (до полуметра). Одни нейроны находятся в контакте лишь с несколькими, другие — с тысячами. В мозгу может быть обнаружена практически любая схема соединения, которую только можно себе вообразить.

При изучении строения мозга ученые обратили внимание на чрезвычайно любопытное обстоятельство: не удалось найти одинаковых соединений нейронов у различных индивидуумов. Более того, стало известно, что талантливость и гениальность, как, впрочем, и противоположные черты, не передаются по наследству, а ближайшие родственные связи (родители — ребенок) не сохраняют структуры нервной системы.

Кроме того, вряд ли возможно, чтобы наследственная информация содержала полную инструкцию относительно каждого из миллиардов соединений нейронов. По-видимому, носители наследственных признаков задают лишь некоторые связи, определяющие

развитие нервной системы вообще и мозга в частности, а конкретные соединения образуются в значительной мере случайным образом потом. И выходит, что конкретная схема соединения нейронов для каждой особи в основном случайна, а потому индивидуальна и уникальна. Исключение составляют синапсы, образующие безусловные рефлексy и передаваемые по наследству.

Заметим, что, по-видимому, существует также возможность наследственной передачи некоторых синаптических сопротивлений, полученных условным образом. Это дает возможность детям в какой-то мере пользоваться результатом жизненного опыта родителей. Указанное положение подтверждается следующим простым экспериментом.

Рассказывают, как у белых мышей вырабатывался условный рефлекс на звонок.

Звонок звонил перед кормлением в течение 5 секунд. Впервые условный рефлекс выработался только на 298-м сочетании звонка с едой. Для получения такого же рефлекса у второго поколения оказалось достаточно 114 сочетаний звонка с едой, для третьего — 29, для четвертого — 11, а для пятого их понадобилось только 6.

Значит, если не сам условный рефлекс, то *восприимчивость* к нему, по-видимому, можно передать по наследству.

Случайность структуры нервной сети имеет глубокий смысл. Действительно, родители, передавая своему наследнику свойства, необходимые для его нормального существования, должны «позаботиться» и о непредвиденных обстоятельствах, которые могут встретиться в его жизни и которые не встретились у них. Поэтому в структуру молодого организма обязательно должен быть введен «случайный фактор». Он и даст организму возможность приспособиться к новым, неизвестным условиям жизни, о которых родители и предполагать не могли.

Как видите, случайность структуры мозга и нервной системы расширяет приспособительные возможности организма от поколения к поколению и обеспечивает неограниченность развития.

5. СЛУЧАЙ И УЗНАВАНИЕ

В предыдущем разделе мы видели, как случайная нервная структура живого организма при взаимодействии с внешней средой может образовать условные рефлексы, определяющие целенаправленное поведение организма в этой среде.

Прямое отношение к механизму условного рефлекса имеет задача узнавания организмом ситуации, в которую он попал. Решение этой задачи является чрезвычайно серьезным шагом в процессе приспособления организма к окружающей среде.

Дело в том, что не существует двух совершенно одинаковых ситуаций. При самом тщательном повторении условий эксперимента всегда найдутся индивидуальные отличия данного опыта от всех остальных. Тем больше это различие в природных условиях. Принципиально говоря, организм каждый раз попадает в новую ситуацию. Но, как сказано ранее, для создания условного рефлекса (для уменьшения необходимого синаптического сопротивления) надо лишь несколько раз повторить одну и ту же ситуацию.

Налицо явное противоречие: нужны тождественные ситуации, а их не существует.

Однако, несмотря на то, что ситуация повторяется лишь приближенно, условный рефлекс практически всегда удается выработать. Это говорит о том, что *в организме существует механизм узнавания ситуации*. А он и позволяет организму отождествлять похожие ситуации и в соответствии с этим строить свое поведение.

В процессе узнавания ситуация как бы схватывается целиком, без учета мелких деталей, что дает возможность создать «общее впечатление» об окружающей обстановке. Это впечатление сравнивается с впечатлением, хранящимся в памяти, и узнается.

В зависимости от результатов узнавания организм начинает действовать в соответствии с поведением, которое было выработано условным образом в аналогичной ситуации. Если же организм впервые попал в данную ситуацию, то ему приходится заново выработать свое поведение.

Итак, каждому действию предшествует узнавание.

Что же такое узнавание?

Строго говоря, под ним следует подразумевать процесс отнесения некоторых явлений (изображений) к классам, называемым образами. Другими словами, узнавание есть установление принадлежности данного явления к определенному классу чем-то похожих на него явлений. Например, разделение фотографий людей на два класса — мужчин и женщин — есть узнавание. Каждая отдельная фотография — это изображение, которое следует узнать, то есть отнести к одному из двух классов (образов).

Задача узнавания решается весьма просто, если четко сформулированы признаки, по которым мы узнаем объекты (разделяем их на классы). Например, капитана и лейтенанта легко различить по такому признаку, как число звездочек на погонах. В данном случае узнавание достигается формулировкой этого единственного признака.

Но в практической деятельности человек сталкивается с более сложными задачами узнавания, когда число различающих признаков велико и, что самое главное, они неизвестны. В этом случае уже нельзя дать рецепт узнавания.

мужчина или женщина?

Поясним сказанное на примерах. Первый относится к узнаванию пола. Так, разделение всех взрослых людей по внешним признакам на два класса — мужчин и женщин — является узнаванием. Нам достаточно одного взгляда, чтобы опознать во встречном мужчину или женщину. Как мы это делаем? На такой элементарный вопрос не так просто ответить. Рассмотрим несколько наиболее вероятных ответов.

Ответ № 1: «Мужчины носят брюки, а женщины — юбки; следовательно, если встречный в брюках — он мужчина, а если в юбке — то женщина». Несостоятельность такого ответа легко доказывается хотя бы тем, что некоторые женщины предпочитают носить брюки и оставаться в классе женщин, а шотландцы любят щеголять в юбочках мини. И все же женщину трудно спутать с мужчиной, даже если на ней брюки.

Ответ № 2: «Мужчины носят короткие волосы, а женщины длинные, поэтому...». Ясно, что при таком критерии классификации все женщины, подстриженные «под мальчика», будут отнесены к классу мужчин, а «мужественные» бородатые битники попадут в класс женщин.

Разобрав несколько подобных «критериев», мы приходим к парадоксальному результату, что сформулировать внешние отличительные черты всех мужчин от всех женщин почти невозможно. Но ведь любой человек решает эту задачу без труда. В чем дело?

А дело в том, что в этих ответах мы пытались определить один решающий признак, отличающий мужчину и женщину. Вопрос же решался бы значительно проще, если бы не бремя цивилизации, которое заставляет нас носить одежды. В этом цивилизованном случае такого единого внешнего признака указать нельзя; их много, но каждый из них в отдельности не решает поставленную задачу.

Можно поставить более общий вопрос: как человек различает зрительные образы? Например, как он различает буквы алфавита независимо от их размера, наклона и написания? Можно ли построить читающую машину?

Другой пример не столь нагляден, но не менее важен для практической деятельности человека (такого рода задачи в основном и привлекли внимание к изучению процесса узнавания образа). Речь пойдет о диагностике заболеваний.

Прежде чем лечить пациента, врач ставит диагноз болезни. Для узнавания ему необходимо получить некоторые объективные показатели: температуру, давление крови, электрокардиограмму и др. Пользуясь этими «входными параметрами», врач узнает болезнь. Как он это делает? Ясно, что процедура установления диагноза требует большого опыта, так как часто четкие признаки болезни отсутствуют. Опытные врачи, ставя диагноз в сложных, спорных случаях не пользуются процедурой, предлагаемой медицинскими справочниками, а опираются на собственную интуицию, основанную на многолетнем опыте. Что это за интуиция? Можно ли объективно узнать болезнь? Возможно ли сделать диагностическую машину?

Эти вопросы также относятся к проблеме узнавания образа.

Обе проблемы в настоящее время принципиально решены: существуют и работают читающие машины; есть машины, диагностирующие болезни. Более того, уже построены машины, узнающие произносимые слова и даже различающие запахи. Как видно, инженеры всерьез взялись за моделирование органов чувств живого организма.

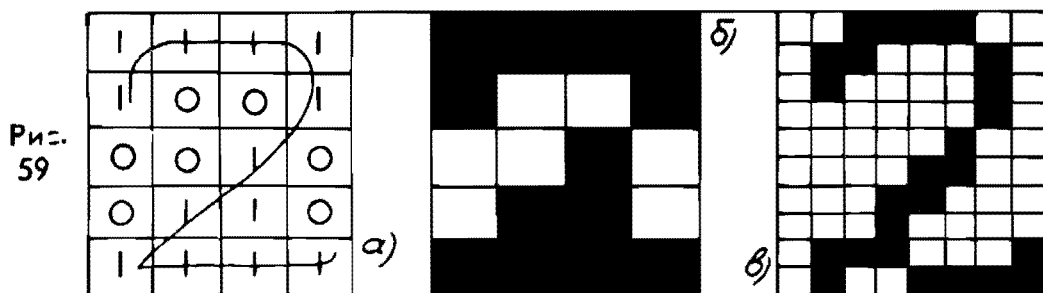
Каков же механизм процесса узнавания ситуации? Упростим задачу. Рассмотрим опознание цифры «0».

Чтобы узнавать, нужно иметь некоторое количество других образов, которые следует отсеивать при узнавании. Пусть для нашего примера таким другим образом будет цифра «2».

Человек почти никогда не ошибается в узнавании этих цифр, не путает их между собой, независимо от их начертания. Как он это делает? Об этом можно пока только строить предположения. Однако уже существует несколько способов различения образов, положенных в основу узнающих (или читающих) машин.

шифровка изображений

Прежде всего необходимо закодировать предъявляемые изображения. Это делается следующим образом. Анализируемый объект располагается на сетке с квадратными ячейками. Ячейкам, через которые не проходит линия объекта, приписывается нуль, а тем, через которые проходит, — единица. Пример такой манипуляции с двойкой показан на рисунке 59. Хорошо видно, что она преобразует изображение в нули и



единицы. Теперь, считывая последовательно строки, получаем для данного изображения его числовой код:

$$\begin{array}{ccccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline & \underbrace{1} & & \underbrace{2} & & \underbrace{3} & & \underbrace{4} & & \underbrace{5} & & & & & & & \end{array}$$

строки.

Другому изображению будет соответствовать другой код. Ясно, что одинаковым изображениям (но не образам) соответствуют одинаковые коды и наоборот.

Вообще код любого изображения можно представить для данной сетки в виде последовательности:

$$a_1, a_2, \dots, a_{20},$$

где каждое a равно либо нулю, либо единице и имеет индекс, равный номеру ячейки (рис. 59). Здесь рассматривается сетка с двадцатью ячейками, которая довольно грубо кодирует изображение (то, что получается при таком кодировании, показано на рис. 59б, где единичные ячейки заштрихованы).

Для более тонкого кодирования следует брать сетку с большим числом ячеек. Так, на рисунке 59в показано то же изображение, но закодированное на сетке с двойным уменьшением. Хорошо видно, что измельчение сетки позволяет более точно передать все особенности анализируемого изображения.

как отличить нуль от двойки?

Рассмотрим теперь конкретную задачу по различению изображений из двух классов: нулей и двоек. Четыре представителя каждого класса уже в закодированном виде показаны на рисунке 60. Их коды записаны в следующей таблице (рис. 61).

Нужно найти признаки, различающие оба класса. Если внимательно присмотреться к этим изображениям и их кодам, то можно легко заметить следующие отличия:

Признаки 1—3:

$$a_9 = a_{13} = a_{16} = \begin{cases} 1 & \text{для изображения 0,} \\ 0 & \text{для изображения 2.} \end{cases}$$

Признак 4:

$$a_{14} = \begin{cases} 0 & \text{для изображения 0,} \\ 1 & \text{для изображения 2.} \end{cases}$$

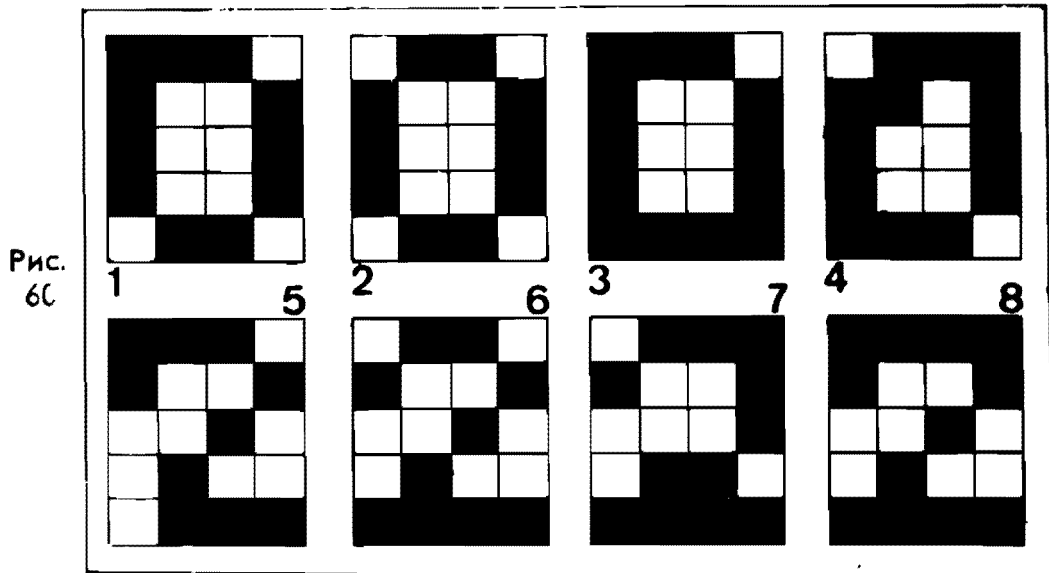


Рис. 61

| Классы | N N чисел | N чисел | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-----------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| "0" | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | |
| | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| "2" | 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Это означает, что ячейки № 9, 13, 16 и 14 несут информацию о классах, а остальные не играют роли в различении нулей и двоек. С точки зрения информационных признаков достаточно в изображениях сохранить только эти ячейки. Тогда изображения, показанные на рисунке 60, представляются в таком виде, как показано на рисунке 62.



Как видно, для различения изображений достаточно хотя бы одного из указанных признаков. Тогда решающее правило, позволяющее узнавать нули и двойки, может быть записано, например, следующим образом:

если $a_9 = 1$, то это 0,
если $a_9 = 0$, то это 2.

Аналогично формулируется решающее правило для других признаков.

Такое решающее правило будет вполне точно различать указанные изображения, если нет помех. При наличии помех в кодировании изображений возможны ошибки (вместо 0 случайно может оказаться 1 и наоборот). Тогда, естественно, решающее правило следует дополнить другими признаками, что повысит точность различения. Решающее правило, учитывающее все четыре признака, можно записать в следующей форме:

если $a_9 + a_{13} + a_{16} + \bar{a}_{14} > \delta$, то это 0,
если $a_9 + a_{13} + a_{16} + \bar{a}_{14} < \delta$, то это 2,
где δ — пока неизвестный порог.

Здесь введено еще одно обозначение.

$$\bar{a} = \begin{cases} 1, & \text{если } a = 0, \\ 0, & \text{если } a = 1. \end{cases}$$

Такое обозначение называется отрицанием или инвертированием.

Величину порога δ будем выбирать из следующих соображений. При полном отсутствии помех имеем:

$$a_9 + a_{13} + a_{16} + \bar{a}_{14} = \begin{cases} 4 & \text{для } 0, \\ 0 & \text{для } 2. \end{cases}$$

Нет сомнения, что при наличии помех указанная сумма находится между 0 и 4. Поэтому естественно определить порог в виде полусуммы этих границ, то есть

$$\delta = \frac{1}{2} (4 + 0) = 2.$$

Теперь решающее правило можно записать в окончательном виде:

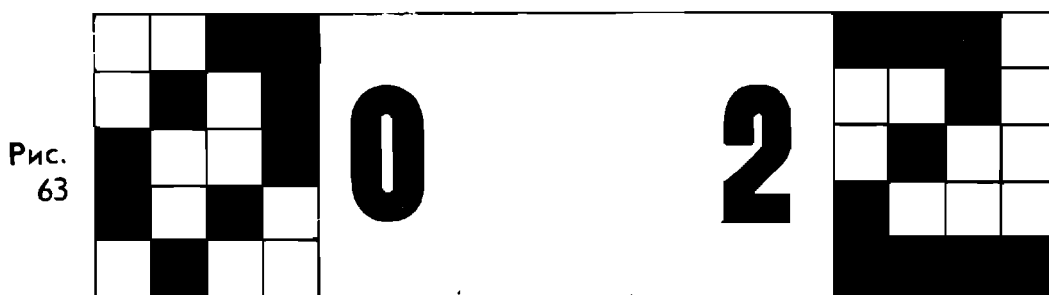
$$\text{если } a_9 + a_{13} + a_{16} + \bar{a}_{14} \begin{cases} \text{больше 2, то это 0,} \\ \text{меньше 2, то это 2.} \end{cases}$$

Полученное правило будет безошибочно работать даже в тех случаях, если помеха искажает информацию, снимаемую с двух указанных ячеек (состояние неинформационных ячеек, как видно, не играет роли для различения анализируемых изображений).

А теперь попробуем при помощи полученного решающего правила различить новые изображения, которые ранее нам не встречались. Можно ли при этом гарантировать успех?

Разумеется, нет! Изображение может быть настолько сильно искажено, что наше решающее правило не сработает. Но подобную ситуацию следует рассматривать скорее как искусственную, а значит, маловероятную. Если же не стараться намеренно «обмануть» решающее правило (а природа никогда намеренно не обманывает. Эйнштейн это сформулировал в великолепном афоризме: «Бог (природа) коварен, но не злонамерен»), то оно справляется с поставленной задачей.

На рисунке 63 показаны два новых изображения 0 и 2, которые, как легко убедиться, великолепно узнаются полученным решающим правилом. Читатель может сам построить несколько аналогичных изображений и применить к ним наше правило.



Узнавание новых, заранее неизвестных изображений при помощи правила, полученного на других изображениях, имеет глубокий смысл. Оно фактически означает, что признаки, или, точнее, определен-

ная комбинация признаков, полученная на базе нескольких изображений, несут информацию о всем классе. Это и дает возможность применять решающее правило в других, ранее не встречавшихся случаях.

Надо, однако, сказать, что получить указанное решающее правило нам удалось благодаря тому, что разделяющие признаки были просты и легко обнаруживались при внимательном рассматривании изображений. А что делать, если изображения сложны и различающие признаки не удастся выделить простым разглядыванием изображений? Как быть тогда?

В этом случае на помощь приходят процессы обучения. Для этого нужно использовать специальные обучающие машины, предназначенные для узнавания предъявляемых им изображений.

Рассмотрим работу одной из таких машин — персептрона, — созданной американским ученым Франком Розенблатом. (Название «персептрон» произошло от латинского слова «персепция» — понимание).

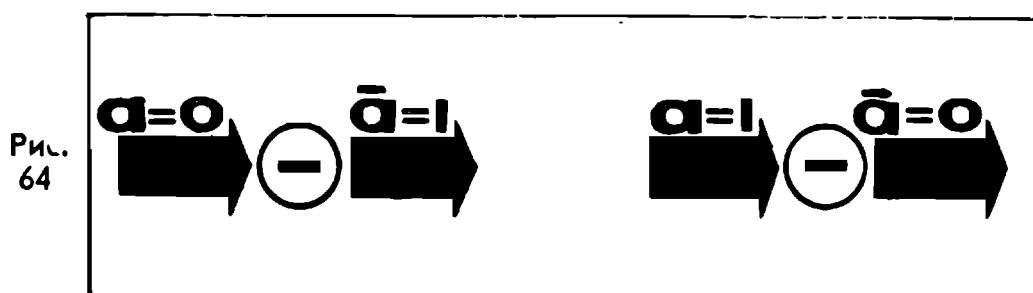
персептрон

Персептрон появился на свет при попытке смоделировать процесс видения и различения зрительных образов, происходящий в системе «глаз — мозг» у живых существ. Персептрон тоже имеет «глаза», воспринимающие зрительный образ, имеет «нервы» и, наконец, «мозг» — анализирующее и решающее устройства.

Увидеть и узнать образ — значит связать его вид с каким-то определенным раздражением некоторого участка мозга.

Подобно человеческому глазу, состоящему из огромного числа палочек и колбочек, «глаз» персептрона (экран) также состоит из множества светочувствительных элементов (по аналогии с глазом экран иногда называют сетчаткой, или ретиной). Эти светочувствительные элементы устроены следующим образом: когда на них падает свет, они дают на выход напряжение ($a=1$), при отсутствии света нет и напряжения ($a=0$).

Каждый светочувствительный элемент является преобразователем света в электрическое напряжение. От него отходят два провода. Один проходит через так называемый инвертор (мы уже говорили, что это такое). Если светочувствительный элемент освещен ($a=1$), то напряжение на выходе инвертора, подключенного к этому элементу, будет равно нулю ($\bar{a}=0$). Если же света нет и $a=0$, то на выходе инвертора есть напряжение $\bar{a}=1$. Будем инвертор обозначать кружком с черточкой (рис. 64).

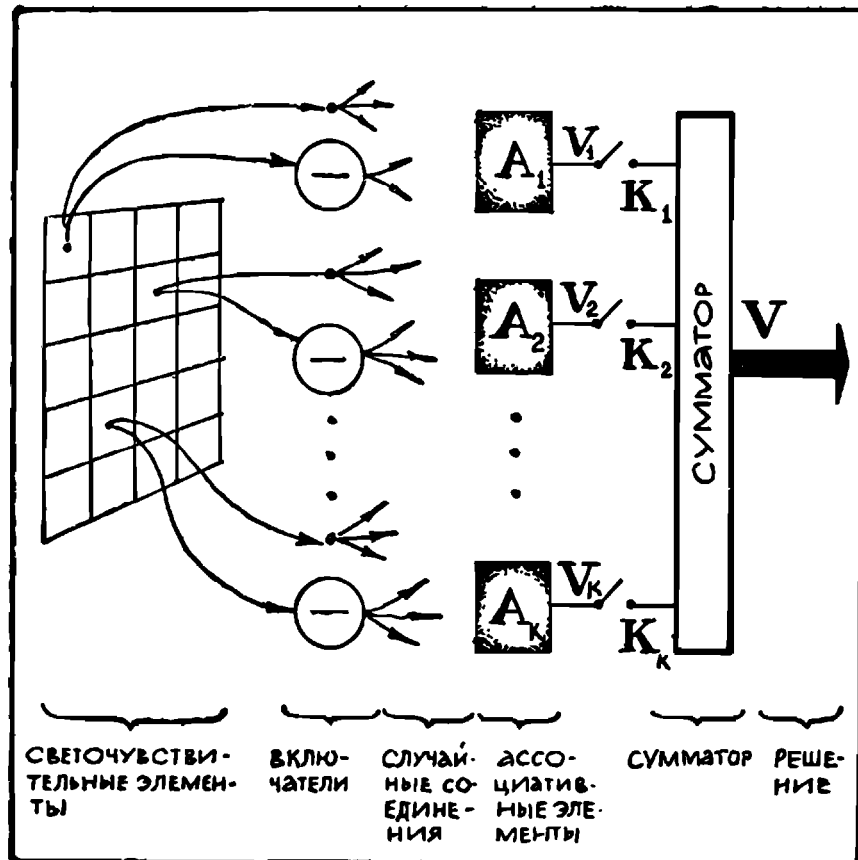


Второй провод светочувствительного элемента несет информацию о состоянии ячейки. Эти два провода (выход ячейки и выход инвертора) разветвляются в пучки, концы которых присоединяются к так называемым ассоциативным элементам A_1, A_2, \dots, A_k (рис. 65). Роль этих элементов проста — они суммируют поступающие в них по проводам напряжения. А почему их назвали ассоциативными, мы поясним позже.

Связь между светочувствительными и ассоциативными элементами весьма своеобразна — она случайна. Случайность достигается тем, что при монтаже схемы персептрона провода, соединяющие указанные элементы, припаивают наугад (кто паял сложные схемы, тот поймет преимущество персептрона). Так случайной пайкой проводов в схему персептрона вводится случайность. Выходные напряжения ассоциативных элементов поступают на анализатор, который «осмысливает» полученные напряжения и решает, к какому классу отнести это изображение.

А теперь посмотрим, как работает персептрон. Будем на его сетчатку проецировать анализируемые изображения, ну, скажем, все те же нули и двойки

Рис.
65

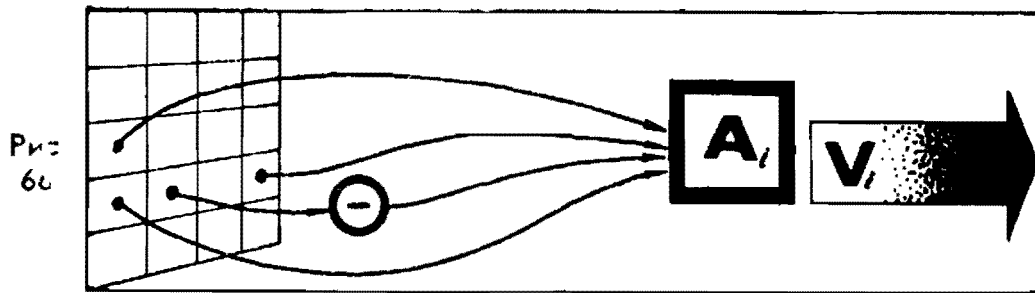


(рис. 60). При этом будем наблюдать за выходами ассоциативных элементов. Пусть на выходах оказались напряжения V_1, V_2, \dots, V_k . Они будут, вообще говоря, различными для различных изображений. Случайно может оказаться, что выход одного из ассоциативных элементов (например, V_i) имеет одно напряжение при изображении двойки и другое — при изображении нуля. Так получится лишь в том случае, если в результате случайных соединений между сетчаткой и данным ассоциативным элементом образовалась связь, реализующая рассмотренное выше решающее правило. Эта схема показана на рисунке 66, и для изображений рисунка 60 справедливо:

$$V_i = \begin{cases} 0 & \text{для 2,} \\ 1 & \text{для 0.} \end{cases}$$

Тогда правило работы анализатора формулируется очень просто:

$$\text{если } V_i \begin{cases} \text{больше 2, то это 0,} \\ \text{меньше 2, то это 2.} \end{cases}$$



Стало быть, анализатор должен следить лишь за состоянием i -го ассоциативного элемента, а на остальные попросту не обращать внимания.

Вообще говоря, рассчитывать на подобное случайное везение нельзя. Вероятность того, что при пайке наугад вдруг получится именно такая схема, равна одной стомиллионной.

Как же быть? Как же такой персептрон отличит 0 от 2?

Дело в том, что пока никак. В таком виде, как мы его описали, он, так же как маленький ребенок, всего лишь способен научиться различать их. Так давайте «научим» его.

обучение персептрона

Что значит «обучить» персептрон?

Коротко это означает, что необходимо подобрать решающее правило для анализатора. Если бы признаки 0 и 2 были известны, то построить анализатор не представляло бы труда. Но признаков нет! Поэтому будем выделять их в процессе обучения.

Положим в основу обучения персептрона следующую идею. Отберем такие ассоциативные элементы, выход которых имеет повышенное напряжение для 0 и пониженное напряжение для 2.

Процесс такого обучения сводится к следующему. На светочувствительное табло персептрона проецируется, например, одно из изображений 2. В соответствии с нашим правилом мы должны отключить от анализатора ассоциативные элементы с максимальным выходом (с повышенным напряжением). Если на экран спроецировано изображение 0, то следует отключить элемент с минимальным выходом. Очевидно, что после

нескольких циклов такого обучения «в игре» останутся только те элементы, которые дают повышенное напряжение для изображений 0 и пониженное напряжение для изображений 2. Суммируя выходы этих оставшихся элементов, получим какую-то величину z .

Теперь решающее правило можно сформулировать очень просто:

если z меньше δ , то это 2,
если z больше δ , то это 0,

где порог $\delta = \frac{1}{2} (Z_{min} + Z_{max})$ — есть среднее наибольшего и наименьшего значения величины z .

Итак, персептрон уже умеет различать заданные образы.

Вы спросите, почему нам понадобилось определять сумму всех выходных напряжений ассоциативных элементов? Ведь мы оставили только такие, каждый из которых дает повышенное напряжение для 0 и пониженное для 2. Почему мы не пользуемся просто показаниями любого из этих анализаторов?

Да потому, что каждый анализатор может ошибаться в определении класса какого-либо отдельного изображения. Но маловероятно, чтобы большинство из них ошибались на одном и том же изображении. Поэтому каждый из анализаторов будет ошибаться на «своем» изображении. Очевидно, что общая сумма их показаний осреднит результат, а так как большинство узнает правильно, то персептрон не будет ошибаться.

Для пояснения этого свойства машины рассмотрим следующий пример.

Представим себе учеников-двоечников второго класса, которые оказались на необитаемом острове. Каждый из них кое-как знает таблицу умножения, но спотыкается на некоторых ее частях. Один считает, что $2 \times 2 = 5$, другой уверен, что $3 \times 3 = 10$, и т. д. Смогут ли они правильно восстановить таблицу умножения? Конечно, смогут, если по поводу каждого произведения будут голосовать и считать правильным тот ответ, который дает наибольшее число голосов.

Точно так же работает персептрон.

Мы рассмотрели, как персептрон различает гео-

метрические образы: цифры, буквы и другие значки. На этом принципе построены читающие автоматы. Предназначены они для чтения печатных букв или букв, написанных от руки. Перед началом работы такой автомат обучают, и лишь после учебы он начинает читать текст. Обучение происходит по рассмотренной выше схеме обучения с учителем (рис. 50).

Надо сказать, что схема персептрона, которую мы описали, является, конечно, крайне упрощенной. Обучение его на самом деле куда сложнее, особенно если учесть, что в современном виде он различает не два образа, а значительно большее их число. Однажды инженеры без труда обучили его 26 буквам латинского алфавита, и он уверенно узнавал их в любом написании.

Стоит заметить, что персептрон обладает замечательным свойством — обобщать. Такая способность выгодно отличает его от некоторых других машин такого же типа и значительно расширяет область его применения. Он распознает не только схожие изображения, показанные ему впервые, но, кроме того, он успешно различает и сильно «зашумленные» изображения. Способен он и на более сложные обобщения.

В одном из опытов персептрон обучался различать вертикальное и горизонтальное положения прямоугольника 20×4 , спроецированного на различные участки светочувствительного поля. После этого ему предложили различить вертикальное и горизонтальное положения прямоугольников с другим соотношением сторон. При этом были получены следующие результаты:

положения прямоугольника 20×2 узнаны в 78 процентах случаев;

положения прямоугольника 20×7 узнаны в 100 процентах случаев;

положения прямоугольника 20×15 узнаны в 100 процентах случаев;

положения прямоугольника 15×4 узнаны в 93 процентах случаев.

Таким образом, персептрон приобрел способность различать горизонтальные и вертикальные положе-

ния прямоугольников вообще. Самое удивительное состоит в том, что способность эту он приобрел в результате обучения на частном случае опознания положения одного конкретного прямоугольника. А это уже первый шаг к абстракции.

персептрон в роли врача

Гораздо интереснее применение персептрона в качестве диагностического аппарата. Пусть каждая ячейка светочувствительного экрана связана с каким-либо показателем состояния больного. Например, если больной ощущает боли в сердце, то ячейка № 23 экрана освещается ($a_{23}=1$), если же нет, то не освещается, и т. д. Показатели состояния больного в такой закодированной форме вводятся в персептрон. При этом диагноз ставится очень опытным врачом, который по возможности точно должен решить, что это за болезнь. Затем болезни нумеруются: № 1, № 2...

Обучение персептрона различению болезней производится так же, как обучение опознанию зрительных образов, и сводится к отключению ассоциативных элементов, путающих эти болезни. Потом, суммируя показания всех оставшихся ассоциативных элементов, можно использовать персептрон в качестве диагностической машины. Если теперь при введении в нее сведений о поступившем больном она дает напряжение на выходе больше порога δ , то это болезнь № 1, если меньше — то болезнь № 2. Следовательно, персептрон обучился диагностировать эти две болезни в такой же мере, как это умел врач, обучавший его.

Обучать персептрон можно не только с помощью врача, но и по литературным источникам, точнее — по описаниям болезней. В этом случае в памяти его будут храниться данные о большом числе заболеваний, и такая машина способна дать более квалифицированное заключение, чем даже очень опытный врач.

Действительно, чем руководствуется врач при постановке диагноза? Прежде всего это его собственный опыт, собственные успехи и неудачи, бессонные

ночи и аплодисменты на конференциях. Это, пожалуй, самая ценная информация, которая и отличает опытного специалиста от молодого врача. Затем опытный врач всегда хорошо помнит все медицинские байки, которые ему приходилось слышать от своих коллег («Помню, в Тюмени было, привезли мне одного больного...»). И наконец, память специалиста хорошо хранит все вычитанное из медицинских журналов. Эти три источника информации служат одной цели — правильной постановке диагноза. И чем больше этот объем информации, тем точнее ставится диагноз. Вот почему в трудных случаях врачи любят собираться вместе и устраивать консилиум, чтобы объединять опыт нескольких врачей.

В век кибернетики такой консилиум проводится иначе и на другом уровне. В этом «консилиуме» могут участвовать тысячи врачей. Делается это таким образом.

Персептрон обучается на диагностику различных болезней, причем материал для такого обучения берется по хорошо проверенным случаям, которых можно собрать очень много (люди болеют примерно одинаково). И тогда персептрон для постановки диагноза оказывается вооруженным опытом очень большого числа врачей, которых практически собрать вместе на один консилиум попросту невозможно. В персептроне же объединяется опыт не только врачей сегодняшних дней, но и живших в разное время и на разных континентах. Это и делает диагноз машины чрезвычайно точным.

Однако из-за сложности схемы такие узкоспециализированные машины — диагностирующие персептроны — не делаются. А все, что мы рассказали о диагностике, великолепно программируется на универсальной быстродействующей вычислительной машине, которая обладает огромной памятью. Вот в эту память и закладываются истории болезней.

Такая диагностирующая система создана и уже функционирует у нас в Союзе, в медицинском институте имени профессора А. А. Вишневского. Она запрограммирована на диагностику заболеваний сердца.

В ее памяти хранятся описания сердечных заболеваний и их исходов, собранные почти со всего света.

Обладая такой «эрудицией», машина дает весьма ценные советы врачам при диагностике тех или иных сердечных заболеваний.

Персептрон может выступать не только в роли диагностирующего автомата, но и в роли лечащего врача. Для этого нужно только обучить его на удачных образцах лечения, то есть сообщить ему симптомы заболевания и лечебные меры, которые приводили к быстрому выздоровлению больных без всяких неприятных последствий. Обученный таким образом персептрон будет не только давать правильный диагноз, но и рекомендовать наилучший способ лечения.

роль случайности в персептроне

Случайные соединения между светочувствительными и ассоциативными элементами в персептроне имеют глубокий смысл, особенно при различении сложных образов. Действительно, в случае сложных образов о различающих признаках ничего заранее сказать нельзя. И выгоднее, оказывается, в основу различения двух или нескольких образов положить случайные ассоциации, отбрасывая те из них, которые не различают образов.

Смысл такого случайного выбора соединений между ретиной и ассоциативными элементами заключается в том, что для любой пары образов обязательно найдутся такие ассоциаторы, которые дают повышенное напряжение для изображений одного образа и пониженное — для другого. Если бы эти соединения производились по какому-то определенному закону, а не по таблице случайных чисел, то всегда нашлась бы хоть одна такая пара образов, которая не опозналась бы персептроном.

Таким образом, случайность соединений персептрона является залогом опознания им практически любых образов.

Персептрон, как обучающаяся машина, занимает промежуточное положение между обычными механизмами: автомобилем, радиоприемником, автоматом и т. д. — и биологическими системами — живыми

организмами. Это своеобразие персептрона и его удивительные свойства заставили инженеров обратить внимание на живую природу, что породило новую науку — бионику.

Бионика

Бурное развитие кибернетики, начавшееся с 1948 года, стимулировалось идеей о всеобщности процессов управления. Создатель кибернетики Н. Винер показал, что управление как средство достижения заданных целей имеет одинаковый характер независимо от того, что именно управляется — машина, организм или общество. Эта головокружительная идея привела к созданию универсальных управляющих машин и к применению их в совершенно неожиданных областях деятельности человека.

Появление универсальных вычислительных машин и доказанная возможность почти неограниченного их использования привели буквально к революции не только в промышленности, но и в умах исследователей. Казалось, что в руки человека попала жар-птица, которая поможет решить почти все проблемы, волнующие науку, технику и общество.

Но шли годы, и жар-птица кибернетики... стала терять свои яркие перья. Чего-то явно не хватало. То, что, казалось, вот-вот будет сделано, почему-то не получалось. Век роботов и мыслящих машин упорно не хотел наступать. Причины поначалу были «пустяковыми». То еще не было достаточно надежных элементов, которые длительное время могли бы работать в машине без смены и ремонта. То у самой машины не хватало мощности для решения поставленных перед ней задач. То не удавалось составить программу для некоторых «простых» задач.

Со временем эти «пустяки» выросли в проблемы, которые преградой встали на пути развития кибернетики. К шестидесятым годам стало ясно, что кибернетике нужны новые идеи и новые технические решения. Эти идеи не могли родиться внутри самой кибернетики — их нужно было искать в других областях. И вот такая область нашлась — ею оказалась живая природа. В самом деле, вокруг нас прыгают, лазают, квака-

ют и пишат наши меньшие братья. Они в состоянии решать такие задачи, которые (увы!) не по плечу ни одной вычислительной машине. И нужно было сделать только шаг, чтобы позаимствовать у природы ее великолепные разработки. Необходимые кибернетике идеи и решения существовали рядом — в живой природе, создавшей биологические машины с необыкновенными свойствами и возможностями.

Так появилась новая наука — бионика, девизом которой стали слова: «От живых прототипов к техническим моделям». В действительности назначением бионики «кража» патентов природы.

Ну что ж, против такого «воровства» возразить трудно.

И опять перспективы окрасились в розовые тона. Снова, как и раньше, казалось, что цель близка, что достаточно только внимательно познакомиться с устройством и принципом работы биологических систем, и ключ к созданию подобных машин будет найден. Поэтому вопросами бионики сразу заинтересовались инженеры и техники, а особенно военные. И действительно, на первых порах были получены обнадеживающие результаты.

Более же тщательные исследования принципов работы биологических систем показали, что часто эти принципы, мягко говоря, нецелесообразно применять в технике. Скажем, искусственный нейрон, созданный по образцу и подобию естественного, оказался хуже уже имеющихся элементов вычислительных машин. Можно привести много и других примеров, когда «патенты природы», на которые возлагала надежду бионика, нельзя было использовать. Назревал новый кризис. Стали всматриваться в сами основы бионики. И оказалось, что в исходных концепциях ее не все в порядке. Если внимательно взглядеться, то можно заметить, что живой организм — это сложнейшая химическая машина! «Изобретенные» природой биологические системы работают на белковых соединениях. Информацию в живом организме несут не только электрические импульсы, но и химические вещества. Очевидно, что перенесение принципов работы биологических систем на электрические схемы техники, как это рекомендует современная бионика, приводит к нару-

шению самих принципов! Этим и можно объяснить весьма умеренный успех бионики.

Чем же все-таки объяснить интерес, проявляемый инженерами к современной бионике? Здесь мы, по-видимому, сталкиваемся с любопытным психологическим фактом. Исследователи, изучая совершенно новые для них биологические объекты и зная, что проблемы, стоящие перед ними, могут быть решены, поскольку они уже решены природой, не скованы психологическим барьером «невозможности». А этот барьер всегда грозит исследователю. Ведь над ним постоянно висит опасность, что проблема, над которой он трудится, может быть не решена. Живые же прототипы снимают этот барьер. Так, например, был изобретен персептрон. По первоначальному плану его автора персептрон должен был моделировать работу мозга. Но в действительности модели мозга не получилось. Зато получилось первоклассное техническое изобретение, которое вот уже много лет «питает» идеями математиков и инженеров.

Каковы с этих позиций пути бионики? По-видимому, она должна развиваться в направлении использования живых организмов либо их органов в технике. Природа располагает превосходными устройствами с великолепной надежностью, с изумительными приспособительными свойствами. И не использовать эти устройства было бы расточительством. Если удастся приспособить их в виде живых элементов машин и заставить работать на человека (именно сами биологические системы, а не их принципы), то откроются огромные перспективы в развитии кибернетики. Поэтому принцип бионики следует сформулировать иначе: *«От живых прототипов к живым элементам!»*

Если идти еще дальше, то можно зайти совсем в фантастическую область, уже освоенную фантастами. Можно представить, что вычислительные машины будущего будут не складываться из живых элементов, а «выращиваться» вместе с необходимыми соединениями.

Идея обучения может быть применена для «воспитания» машины. Для этого можно воспользоваться мозгом любого животного, если сумеет присоединиться к его входам и выходам. Тогда, пользуясь способ-

ностью живого мозга устанавливать связи типа условного рефлекса, можно обучить этот мозг решать интересные нас задачи.

Итак, *«От живых прототипов, через живые элементы к живым машинам!»* — вот девиз бионики.

6. СЛУЧАЙ, ОТБОР, ЭВОЛЮЦИЯ

После создания Н. Винером кибернетики как науки сразу начались споры: а кто был раньше? Вспомнили Остроградского, Ползунова, Уатта, не забыли и Ломоносова. Автор тоже участвовал в этих спорах и с пеной у рта отстаивал приоритет... Козьмы Пруtkова! Козьма сказал бессмертные слова: «Щелкни кобылу в нос, она махнет хвостом», что явно выражает существование строгой функциональной связи между щелчком в нос и взмахом кобыльего хвоста.

Подобные логические преобразователи типа «щелчок в нос — взмах хвоста» или «щелчок в нос — вращение хвоста» лежат в основе современных кибернетических устройств. Специалисты хорошо это знают, но скромно умалчивают о своей органической связи с Козьмой Пруtkовым. Автор решительно встает на защиту председателя пробирной палаты, великого поэта и мыслителя. Следует исправить историческую несправедливость и признать К. Пруtkова отцом кибернетики.

Читатель, конечно, заметил, что подобным образом можно доказать любой приоритет, даже буриданова осла, в любой области, включая и радиоастрономию. Но говорить о влиянии того или иного мужа на рождение и развитие науки не только следует, но и просто необходимо.

Так, на развитие современной кибернетики оказал огромное влияние Чарлз Дарвин — создатель теории эволюции в живом мире.

Едва ли найдется что-либо более естественное и сложное, чем живое существо. Но что такое жизнь? До сих пор строгого ответа наука не дает.

Однако для нашего «кибернетического» разговора о жизни достаточно ограничиться ее тремя основными особенностями.

три особенности жизни

1. Воспроизводимость, то есть способность порождать существо, себе подобное.

2. Наследственность, то есть способность передавать родительские черты детям. Это консервативное свойство помогает сохранить в организме особенности родителей. Нетрудно же представить, какой ерлаш поднялся бы, если бы это свойство было утрачено!

3. Изменчивость, то есть способность к изменению (мутации). Это свойство гарантирует детям блеск индивидуальности и позволяет им не быть копией или средним арифметическим своих родителей.

Роль этих трех факторов для жизни трудно переоценить. Без воспроизведения жизнь перестала бы существовать. Без наследственности не было бы преемственности между поколениями и, значит, видовые особенности родителей не передавались бы детям. И наконец, без мутации не было бы изменчивости и развитие жизни не пошло бы далее ее первоначальных форм.

Носителем случайности в процессе эволюции являются мутации, вызывающие изменчивость, которая обеспечивает нас столь ценными и необходимыми индивидуальными свойствами.

что такое мутация?

Ткани любого живого организма состоят из клеток. Каждая клетка содержит ядро. Ядро, в свою очередь, содержит хромосомы — длинные тонкие нити, видимые только в самый сильный микроскоп. Хромосомы несут всю наследственную информацию об организме. При делении клетки сначала делятся хромосомы; каждая хромосома как бы удваивается и образует две совершенно одинаковые половинки, которые немедленно расходятся. После деления всех хромосом, то есть ядра, делится остальное вещество клетки. Потом половинки оформляются в клетки.

Так, из одной клетки возникают сначала две совершенно одинаковые клетки, потом после второго деления — четыре, затем восемь, шестнадцать и т. д.

Процесс, при котором происходит удвоение хромосом, чрезвычайно точен. Едва ли можно в технике найти аналог столь строгого и безошибочного механизма. При зарождении организма из одной клетки развиваются миллионы клеток с совершенно одинаковыми хромосомами. Однако в мире нет ничего абсолютного, имеется предел точности даже такого безошибочного процесса, как деление хромосом. Иногда, очень редко, может быть один раз за миллион делений, в этом процессе что-то нарушается — происходит случайный сбой, и наследственная информация, которую несет хромосома, несколько изменяется. Это происходит из-за того, что в результате какой-то случайной помехи хромосома случайно становится чуть-чуть иной (хромосомы тоже живут в случайном мире). Процесс случайного изменения хромосомы и получил название мутации.

Когда хромосома, в которой произошла мутация, удваивается, она, как и прежде, точно воспроизводит самое себя, повторяя структуру, полученную в результате мутации. Следовательно, «наследство» мутированной хромосомы также мутировано.

А к чему приводят мутации? Может быть, они не оказывают существенного влияния на организм? Как может сказаться незначительное изменение строения хромосомы на развитии организма?

Ответ на эти вопросы будет ясным, если вспомнить, что хромосома, по сути дела, является системой команд, отдаваемых при развитии организма. Эти команды формируют организм. Ясно, что утрата одной из команд или замена ее другой оказывает влияние на развитие отдельных органов и организма в целом. А так как мутации случайны, то они приводят к возникновению у развивающегося организма сугубо индивидуальных особенностей. Мутации создают индивидуальные свойства организма, отличающие его от родителей и сверстников. Эти отличительные свойства организма вследствие случайного характера мутации могут оказать влияние на любую часть или функцию организма.

Они могут вызвать роковой исход, если мутация нарушила работу какого-то ответственного органа или лишила его каких-то приспособительных черт.

Мутация может быть благотворной, если благодаря ей развиваются качества, способствующие лучшему приспособлению организма к окружающей его среде.

Результат мутации может быть безразличным, то есть не оказывать пока ни хорошего, ни плохого влияния на жизнедеятельность организма (например, при изменении формы носа).

механизм естественного отбора...

Таким образом, каждый организм случайным образом отличается от другого, подобного ему. Природа, создавая мутацию, как бы делает случайный «шаг». Этот «шаг» потом экзаменуется жизнью. Если организм, развившийся в результате случайной, но определенной мутации, оказался менее устойчивым и менее приспособленным к окружающей среде, то он погибает скорее, нежели другие. Следовательно, «шаг» сделан неудачно. Погибая, этот организм, как правило, не фиксирует своей неудачи в потомстве (ведь он погиб раньше времени). Если же в результате мутации организм случайно приобрел новые приспособительные свойства, он их передает и закрепляет в потомстве. Именно так осуществляется естественный отбор, открытый Ч. Дарвином.

Следовательно, если мутации обеспечивают случайное отклонение организмов от некоторого «среднего» в данный момент организма, то естественный отбор как бы оценивает результат этого отклонения.

Происходит отбор по принципу: «размножается наиболее приспособленный». Мутация же и обеспечивает осуществление этой формулы, так как обуславливает бóльшую или меньшую приспособляемость организма. Ясно, что без мутации не появилось бы той удивительной приспособленности и «разумности» строения организмов, которой не перестают восхищаться и удивляться по сей день.

Мутации, таким образом, представляют собой одну из величайших движущих сил эволюции, а поскольку эволюционный процесс не прекращается, то и мутации по-прежнему необходимы в развитии жизни на Земле.

Это одна сторона явления.

Другая заключается в том, что большинство новых мутаций вредно или даже смертельно для организма.

Причина заключается в том, что каждый организм есть результат длительной эволюции, он чрезвычайно тонко приспособился к окружающей среде, и далеко не всякое случайное изменение в его структуре, вызванное мутацией, идет ему впрок. Скорее, наоборот. Для улучшения высокоорганизованного организма нужны мутации специального характера, которые, естественно, встречаются редко, и может пройти много времени прежде, чем будет найдена нужная мутация. Может случиться и так, что за то время, пока она произойдет, организмы этого вида вымрут, причем не столько из-за отсутствия нужной мутации, сколько из-за избытка ненужных и вредных.

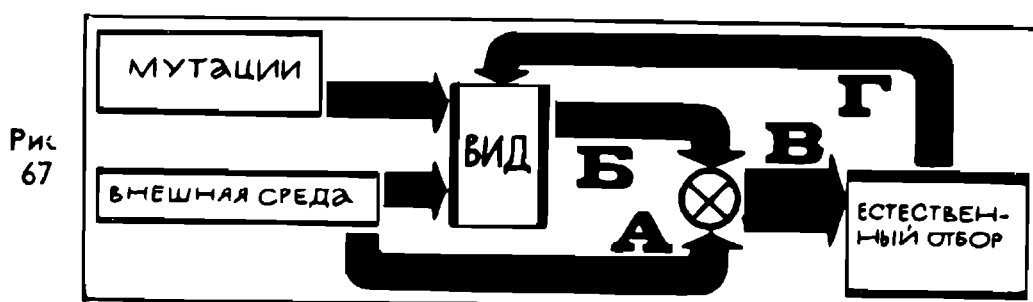
И выходит, что мутации столь же вредны, как и необходимы. Вид, у которого мутации возникают слишком часто, например, под действием радиоактивного излучения, может исчезнуть, потому что многие его представители в результате неудачных мутаций будут слабыми и недолговечными. В свою очередь, виды, дающие мутации слишком редко, благоденствуют лишь до тех пор, пока изменившиеся условия жизни не потребуют от них новых приспособительных свойств, для чего у них не окажется необходимого запаса изменчивости. Так, по-видимому, относительно недавно вымерли мамонты, не сумевшие приспособиться при быстром похолодании климата на Земле во время ледникового периода.

Представим себе следующий редкий, но вполне возможный случай. Пусть какой-то вид животных или растений находится в полной гармонии с природой. Ему почти не угрожает конкуренция, у него почти нет врагов. Представители этого вида — сильные, здоровые особи с хорошо сформированным организмом; они быстро размножаются, и им пока не грозит опасность перенаселения. Ухудшения породы в результате мутаций пока незначительны и не могут нарушить здорового оптимизма представителей этого счастливого вида. Но вдруг в одно несчастное время золотому веку пришел конец — резко изменились

внешние условия, положим, появились сильные конкуренты. Тут же начнет действовать жестокий механизм естественного отбора, и только мутация, которая обеспечила бы если не преимущества перед конкурентами, то хотя бы условия для сосуществования с ними, может спасти этот вид. Если она произойдет слишком поздно, вид погибнет.

...и его блокхема

Автор нарисовал эту безрадостную картину вовсе не для того, чтобы ужаснуть читателя «безжалостностью» законов природы. Во все нет! Просто пример хорошо, как мне кажется, иллюстрирует связь между мутациями и естественным отбором. Эту связь можно представить в виде некоторой схемы, которая показывает взаимодействие вида и внешней среды в процессе естественного отбора (рис. 67). На ней пока-



зано, как внешняя среда воздействует на вид и предъявляет к нему определенные требования. Эти требования как бы формулируются по каналу А. Вид вырабатывает некоторое поведение в данной среде и «сообщает» об этом поведении по каналу Б. Результат сопоставления требований внешней среды и их обеспечения видом возбуждает по каналу В механизм естественного отбора. Степень возбуждения естественного отбора зависит от степени несоответствия вида требованиям среды. Если вид удовлетворяет всем требованиям среды и его поведение не нарушает запросов среды, то естественный отбор не действует, что, впрочем, бывает очень редко. Естественный отбор воздействует на вид по каналу Г. Кроме того, на этот вид непрерывно действуют случайные мутации.

Работает «схема» следующим образом. Изменение внешних условий — среды — влечет за собой возникновение или усиление противоречия между видом и требованиями среды, где этот вид обитает. Это противоречие возбуждает и усиливает действие естественного отбора, в результате которого выживают и дают потомство только наиболее приспособленные особи. Мутации создают различные отклонения индивидуумов вида от среднего. Среди этих индивидуумов с новыми признаками, назовем их мутанами, в силу случайного характера отклонений могут найтись и более приспособленные к требованиям внешней среды. Из них-то и строится новый вид. Остальные в результате безжалостного действия естественного отбора преимущественно погибают.

гомеостат — модель отбора

В 1951 году англичанин Р. Эшби построил прибор, который работает почти так же, как происходит приспособление вида. Этот прибор он назвал гомеостатом (слово «гомеостат» произведено от «гомеостазис», что означает поддержание свойств системы в определенных желательных пределах).

Гомеостат представляет собой динамическую систему, которая в зависимости от значений его параметров может находиться в двух состояниях: устойчивом и неустойчивом. Динамической системой мы называем такую систему, поведение которой зависит от ближайшей предыстории. Так, камень является типичным примером динамической системы. Закон инерции гарантирует ему зависимость от недавнего прошлого. Если он летел в каком-то направлении, то это направление может изменить только определенная сила, например, сила веса, причем новое направление зависит от направления этой силы. В этом и сказывается зависимость летящего камня от предыстории. В случае, если камень лежит неподвижно, то при отсутствии силы он и останется лежать на том же месте.

Следует различать два состояния динамической системы: устойчивое (неизменное) и неустойчивое (состояние изменения движения). Упомянутый нами лежащий камень — пример неустойчивой системы, а ле-

жащий на дороге — устойчивой. И часы. Если они тикают, то являются неустойчивой (автоколебательной) системой, а поломанные — устойчивой.

Одна и та же система может иметь много устойчивых состояний. Телевизионная башня, лежащая на боку, находится в устойчивом состоянии, так же как и вертикально стоящая. (Другое дело, что первое состояние более устойчиво, чем второе. Этим и объясняется известный факт, что при землетрясении стоящая башня может лечь, но никогда никто не видел, чтобы лежащая башня встала.)

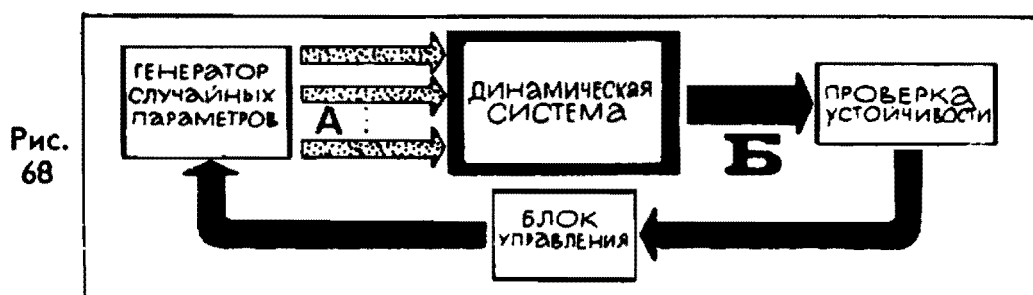
Но продолжим разговор о гомеостате. Этот прибор, как и всякая динамическая система, мог находиться в двух состояниях: устойчивом и неустойчивом. В устойчивом состоянии он был неподвижен и неизменен. А в неустойчивом — «буйствовал» и в своем поведении выходил за желательные границы.

Не будем уточнять, в чем заключалось это «нежелательное» поведение гомеостата, это чисто технические подробности — ведь гомеостат только лишь прибор, — важно, что одно его состояние (устойчивое) было желательно, а другое (неустойчивое) — нежелательно. При этом переход из устойчивого состояния в неустойчивое происходил под действием неконтролируемых факторов — это и влияние внешней среды, и внутренние неполадки в приборе, и многое другое. Значит, в силу второго начала термодинамики гомеостат «стремился» к неустойчивости.

Для управления гомеостатом была введена обратная связь, которая работала следующим образом: как только гомеостат попадал в неустойчивое состояние, его некоторые параметры, от которых зависело поведение гомеостата, начинали изменяться случайным образом, то есть начинался случайный поиск. Продолжался он до тех пор, пока случайно гомеостат не прекращал свое «буйство» и не переходил в устойчивое состояние. Это означало, что случайно были найдены такие значения управляемых параметров, которые необходимы для его устойчивости. После этого случайный поиск немедленно прекращался, и гомеостат «засыпал» до следующего «буйства», вызываемого либо внешним толчком, либо его внутренней неполадкой.

Здесь случайный поиск имитирует случайные мутации в организме. Поиск происходит до тех пор, пока случайно не будут найдены такие значения параметров, которые обеспечат гомеостату устойчивое состояние (это означает, что как бы произошла необходимая мутация). После этого параметры гомеостата фиксируются и механизм поиска новых «мутаций» выключается на время, пока какие-нибудь причины вновь не приведут гомеостат в неустойчивое состояние. Иначе говоря, пока снова не изменятся внешние условия и не появится необходимость в новых мутациях.

Схема гомеостата приведена на рисунке 68. Динамическая система, как сказано, может иметь различные параметры, которые вводятся в нее по каналам А. Эти параметры образуются генератором случайности и переводятся в систему. Проверка состояния



системы производится по каналу Б. Если система находится в неустойчивом состоянии, то блок управления включает генератор случайных параметров, который начинает генерировать их и заводит в систему, как бы «примеряя» к ней различные их варианты. Это происходит до тех пор, пока система не придет в устойчивое состояние.

Получив информацию о том, что система устойчива, блок управления выключит генератор, сохранив в системе последние значения параметров, которые привели ее в устойчивое состояние.

Как легко заметить, гомеостат Эшби довольно сносно копирует механизм приспособления вида и может служить моделью естественного отбора.

Мы показали (и повторим еще), что приспособление вида к внешней среде происходит чисто случайным образом. Случайность входит в виде мутаций.

которые создают различные случайные отклонения представителей этого вида от некоторого среднего организма. В результате естественного отбора особи, мутированные «неудачным» образом, вымирают, а организмы с благоприятными изменениями закрепляются в потомстве. Так случайно вид приходит в устойчивое состояние относительно внешней среды. Если внешние условия изменятся, то механизм мутации и естественного отбора снова начнет свой «поиск», пока не приведет вид в устойчивое состояние.

Аналогично работает гомеостат. Он тоже отыскивает устойчивое состояние чисто случайным способом и фиксирует именно те значения своих параметров, которые соответствуют его устойчивому состоянию. Если внешнее воздействие выводит гомеостат из стабильного состояния, то включается механизм случайного выбора параметров, который работает и ищет до тех пор, пока не находится устойчивое состояние. После чего случайный поиск параметров выключается.

Гомеостат подобен спящей кошке. Если ее потревожить, то она проснется, выберет новое удобное положение, устроится и заснет. Точно так же гомеостат, «проснувшись», случайно ищет такие значения своих параметров, которые позволят ему найти новое устойчивое состояние, находит их и «засыпает», выключив механизм случайного поиска.

усилитель интеллекта

Идея Эшби о случайном поиске, подсмотренная им у природы, имеет глубокий смысл и большие перспективы применения. Изучая роль случайности в природе, ученый пришел к замечательной мысли об использовании неограниченного богатства случая. В самом деле, что может быть проще, чем генератор случайности? Шум — неисчерпаемый источник случайности; его легко получить, и он фактически ничего не стоит. Следовательно, сырье есть в изобилии! Но что можно сделать из этого сырья?

Очень многое, если не сказать, что все.

Случайное сочетание букв может образовать любое известное слово, более того, можно создать сло-

ва, которые еще не придуманы, а возможно, и вообще не появятся на свет. Случайное сочетание слов может образовать любое предложение, то есть любую законченную мысль, когда-либо высказанную людьми или которую еще выскажут наши потомки. Случайное сочетание предложений может образовать любое художественное произведение, описание любого научного исследования, сообщение о любом сделанном людьми открытии или открытии, которое когда-либо будет сделано. В общем случайность таит в себе неограниченные богатства.

Комбинируя случайным образом буквы, слова и фразы, можно получить новые данные, новые результаты, новые мысли; короче, из случайности можно создать новую информацию!

Заметим, что эту идею впервые высказал и... высмеял Свифт (кстати, еще один претендент на звание отца кибернетики) почти два века назад в известных «Путешествиях Гулливера». Когда его герой попал в пресловутую Лапутию, то увидел, как лапутяне для создания новых научных и художественных произведений использовали машину, которая последовательно перебирала все возможные сочетания из 1000 букв. Памятуя о том, что всякое научное открытие можно изложить в реферате из 1000 букв, лапутяне не без основания рассчитывали получить все возможные научные статьи. От такой перспективы может захватить дух не только у глуповатых лапутян! Получается, что, сидя дома, можно изучать мир!

Этот парадоксальный вывод мало что дает практически, если вспомнить, что вместе с правильной информацией при таком подходе мы получим огромное количество ложной информации весьма правдоподобного вида (во всяком случае, значительно больше, чем правильной).

Следовательно, чтобы воспользоваться этой идеей, нужно суметь отсеять бессмысленность и ложь. А это можно сделать лишь путем отбора.

Так у Эшби родилась мысль об *усилителе отбора*.

Усилитель отбора работает следующим образом. Источник случайности — шум — поступает на устройство, которое в соответствии с этим шумом с не-

прерывной последовательностью выдает буквы алфавита.

Эта последовательность просматривается при помощи определенных грамматических критериев, и из нее отбираются куски, которые могут быть осмысленными словами. Так, слово «стрл» будет отброшено, как не имеющее гласных.

Следующий критерий отбора позволяет отобрать из этих слов только те, которые образуют осмысленные предложения.

Дальнейший отбор должен отсеивать заведомо ложные фразы, оставляя лишь те, которые явно не противоречат опыту человечества.

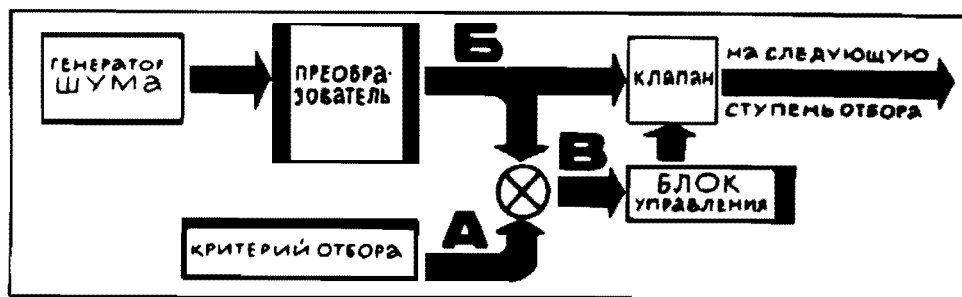
После этого отбираются оригинальные мысли и отсеиваются тривиальные, которые либо были известны ранее, либо легко получаются из известного.

Последняя стадия отбора должна производиться на самом высоком уровне при помощи наиболее тонкого критерия отбора. Таким критерием располагает, по-видимому, только человек, который решает, какие из отобранных вариантов следует подвергнуть проверке практикой, за которой, как всегда, остается последнее слово.

Таким образом, новая информация получается в несколько стадий отбора, которые осуществляются при помощи различных критериев отбора.

Схема такого усилителя мыслительных способностей, как его назвал Эшби, показана на рисунке 69. Здесь преобразователь производит переработку шума так, что на его выход *Б* поступают различные случайные варианты объектов отбора. Преобразователь как бы «перефразирует» информацию, поступающую на его вход в виде шума. В этой информации по-прежнему нет смысла. Результат преобразования по каналу *Б* сверяется с критерием отбора. Если этот

Рис
69



результат удовлетворяет критерию, то блок управления, осведомленный об этом по каналу B , открывает клапан, и отобранная информация проходит на следующий, более высокий этап отбора.

Именно так можно создавать нечто еще не известное никому. Правда, может потребоваться много времени. Но, производя отбор с очень и очень большой скоростью, можно значительно сократить это время.

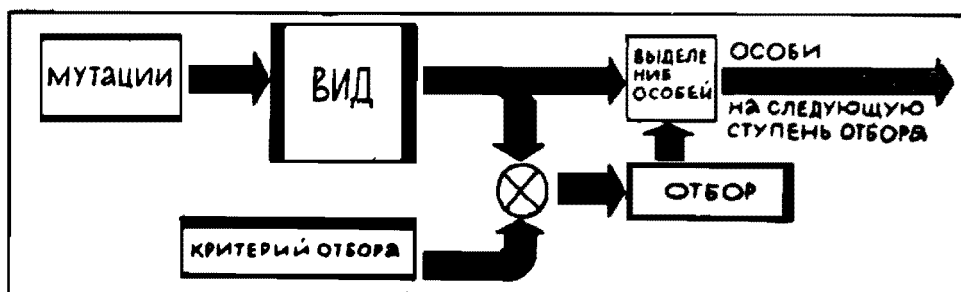
искусственный отбор как усилитель

Заметим, что предложение Эшби о применении многократного отбора для получения доселе неизвестной информации из случайного шума не ново. Селекционеры пользуются точно таким же приемом при выведении новых пород животных или сортов растений. При этом они обращаются к так называемому искусственному отбору.

Сущность искусственного отбора весьма проста и издавна используется человеком в практической деятельности. Подмечается какая-то полезная особенность организма, возникшая в результате случайной мутации, и принимается решение об усилении этой особенности. На первой стадии отбора критерием служит лишь наличие или намек на эту особенность, то есть отбираются те организмы, у которых это свойство есть или только намечается. На второй стадии отбора — при отборе потомства от первой стадии — применяется более жесткий критерий: отбираются особи уже с явно выраженной особенностью и т. д. В конце концов на какой-то стадии отбора особи имеют эту полезную особенность в достаточной мере. Теперь осталось истребить организмы, не имеющие этой особенности, и новая порода готова.

Схема процедуры искусственного отбора показана на рисунке 70. Здесь мутации воздействуют на вид и создают представителей, отклоняющихся случайным образом от некоторого среднего организма. Если эти отклонения в отдельных особях соответствуют критерию отбора, то они отбираются человеком и поступают на следующую ступень отбора. Если не соответствуют, то уничтожаются.

Рис.
70



Как видно, схема искусственного отбора очень близка к усилителю отбора Эшби. Более того, этот усилитель фактически является моделью искусственного отбора.

Заканчивая главу, следует заметить, что именно случайность образовала те сложные и совершенные формы приспособления организмов к окружающей среде, которые мы наблюдаем вокруг себя. Именно благодаря случайности появилось огромное количество видов животных и растений. Именно благодаря такой случайности на Земле появился человек. Это поразительное свойство природы стало ясным и понятным лишь после объяснения Ч. Дарвином механизма образования приспособительных свойств. А до этого единственно возможной представлялась идея целесообразности и разумности природы, поддерживаемая религией.

Теперь ясно, что никакой целесообразности и никакого разумного подхода у природы нет и быть не может. Если же говорить о разумном начале в природе, то им следует считать случайность.

Именно случай в сочетании с отбором образуют «разум» природы!

7. САМОНАСТРОЙКА

о связях

Есть такая шуточная игра — «Найди связь». Задаются два совершенно разных предмета, и предлагается найти связь между ними. Например, как влияет количество дырок в швейцарском сыре на максимальную скорость автомобиля «Москвич»; или как влияют лунные затмения на вкус шашлыка по-

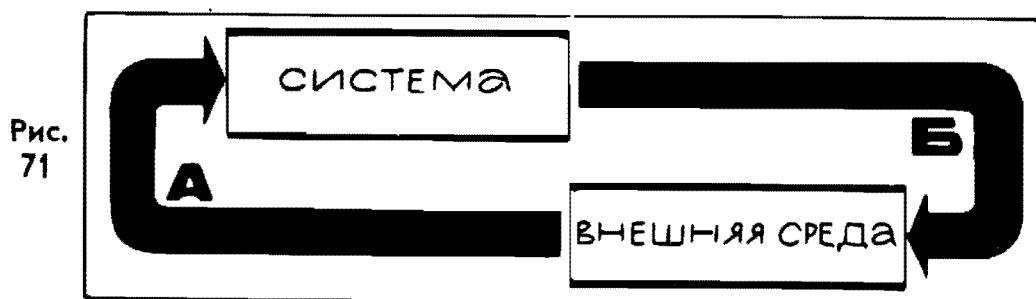
карски. Водящий обязан такие связи найти и прокомментировать их.

Самое смешное, что в действительности упомянутые связи существуют: и максимальная скорость «Москвича» зависит от числа дырок в швейцарском сыре и вкус шашлыка как-то связан с лунным затмением. Но они *слабые*, и если бы, несмотря ни на что, удалось установить и проследить их, то воспользоваться ими уж никак не удастся. Именно поэтому владельцы «Москвичей», стремясь выжать максимальную скорость, интересуются маркой бензина и повышением степени сжатия двигателя, а не технологией сыроварения. А перед тем как заказать шашлык, любители поесть обычно интересуются способностями шеф-повара, а не заглядывают в лунный календарь.

среда и объект

Выделяя из массы предметов и явлений объект для исследования, мы должны сохранить его связи с окружающим миром, иначе он перестанет нормально функционировать и его изучение не достигнет требуемой цели. Под «окружающим миром» будем подразумевать внешнюю среду, которая находится в наиболее близком контакте с объектом. Следовательно, внешней средой будем называть все то, что влияет на поведение объекта, но не входит в сам объект.

Взаимодействие среды и объекта можно представить в следующем виде (рис. 71).



Здесь стрелка *А* показывает воздействие среды на изучаемый объект, а стрелка *Б* выражает действие объекта на внешнюю среду. Пользуясь удобной терминологией теории связи, назовем *А* каналом, по

которому среда воздействует на изучаемую систему. Тогда по каналу *Б* реализуется воздействие системы (объекта) на среду.

Если в качестве объекта исследования выбран, например, градусник, то по каналу *А* ему передается тепло извне, а канал *Б* сообщает (информирует) о том, какова эта температура в градусах. Таким образом, канал *А* передает тепло, а канал *Б* — информацию о температуре среды (предполагается, что наблюдатель относится тоже к среде). Есть и другие факторы, связывающие градусник со средой (среди них — тяготение), но они имеют слабую связь и поэтому не учитываются.

В качестве еще одного примера рассмотрим станок-автомат. По каналу *А* ему передаются заготовки, которые должны быть обработаны на станке, а также энергия и смазка; по каналу *Б* станок передает во внешнюю среду готовые детали и вибрации либо сообщает треском или молчанием о своей неисправности. В качестве слабых связей станка-автомата со средой можно указать на его освещенность солнечным светом, которую, естественно, можно не учитывать.

А вот пример из биологии. Живой организм всегда функционирует в какой-то определенной среде. Ею могут быть лес, пустыня, вода, колба и т. д. По каналу *А* в организм поступают продукты питания и все внешние раздражители, а по каналу *Б* организм воздействует на среду, изменяет свое положение в этой среде и т. д.

Можно отыскать еще много аналогичных примеров взаимодействия среды и объекта.

Подобное представление не является досужим умствованием и имеет глубокий смысл. Оно устанавливает строгие взаимоотношения между предметами в мире и, по сути дела, выделяет и определяет интересующие нас существенные причинные связи. Более того, так как всякой системе присущи индивидуальные свойства, которые и характеризуют связь между ее входом *А* и выходом *Б*, то, наблюдая *А* и *Б*, можно познать этот объект.

Разные системы имеют разные свойства и по-разному связывают свой вход с выходом. Очень часто

эти индивидуальные свойства системы можно выразить числами, которые обычно называют параметрами.

Параметрами градусника, допустим, являются объем ртути, диаметр капилляра и размер делений шкалы. Каждая названная величина определяет связь входа градусника с его выходом. Изменись хотя бы один параметр, изменится связь между температурой ртути и показаниями шкалы градусника, и градусник начнет врать.

Токарный станок-автомат, потребляя на входе заготовки, на выходе выдает готовые детали. Параметрами станка являются режим резания, скорости движения и углы заточки резцов, положения и скорости подач резцов, материалы, из которых резцы сделаны, и т. д. От этих параметров зависят размеры выпускаемой продукции и ее качество. Параметры станка выбираются отнюдь не произвольно. Они зависят от материала заготовки и формы изготавливаемой детали, на их выбор влияют соображения экономичности и требования качества поверхности детали, минимальный износ режущего инструмента и многое другое. Так или иначе, но параметры станка-автомата устанавливаются заранее с учетом всех требований, предъявляемых как к работе автомата, так и к выпускаемой продукции.

Из этих требований мы пока будем учитывать одно — обеспечение качества выпускаемой продукции. Только добившись выполнения этого основного требования, следует обращать затем внимание на износ инструмента, амортизацию станка и т. д.

Значит, к станку предъявляется единственное требование — выпускать наилучшую продукцию, то есть изготавливать детали, максимально приближенные к идеалу, изображенному на чертеже заказчика.

Могут сказать, что нечего стремиться к точному выполнению размеров деталей, если существуют допуски, вполне устраивающие заказчика. Но хорошо известно, как сильны помехи на производстве. Поэтому всегда нужно стремиться к наиболее точному соблюдению размеров, тогда помехам труднее вывести размер за пределы допуска, и процент брака значительно уменьшится.

Близость к идеалу

Естественно, что для наладки станка нужно определить, в какой мере хороша выпускаемая продукция. А для этого, необходимо ввести *критерий близости* готовых деталей к совершенству, который определял бы качество работы станка-автомата.

Этот критерий целесообразно формулировать в возможно более четкой форме — лучше выразить его в виде числа. Так, для станка-автомата в качестве такого критерия можно выбрать сумму отклонений размеров готового изделия от размеров, заданных чертежом. При очень хорошей работе критерий близости к совершенству будет равен нулю, что значит — идеал достигнут. Не стоит и говорить о том, что такого значения критерий близости никогда не будет достигнут, так как невозможно добиться абсолютной точности в размерах детали. Если, например, суммарное отклонение размеров сделанного изделия от требуемого равно одному миллиметру, то говорят, что «расстояние до идеала» равно одному миллиметру.

Критерий близости определяют и иначе, например как процент брака. Иногда в основу критерия кладут еще какой-нибудь признак. Но в любом случае при составлении такого критерия следует обращать внимание на то, чтобы он был *один* и его минимальное значение соответствовало бы цели, которой вы добиваетесь. Когда говорят об идеале, который желательно достигнуть, всегда много раз повторяют слово «самое». Самый дешевый, самый точный, самый красивый и прочее, стремясь совместить в своем идеале много «наисамейших» черт. При выборе, например, марки велосипеда часто к нему предъявляют сразу несколько требований и хотят, чтобы он был: 1) самый надежный, 2) самый простой, 3) самый дешевый, 4) самый красивый и т. д. А когда дело доходит до покупки, то вдруг оказывается, что все эти требования в одном велосипеде не совмещаются. (Если, разумеется, есть из чего выбрать; в противном случае подобные сомнения уже не раздражают покупателя.)

В такое «трудное» положение попала, если вы помните, Агафья Тихоновна — невеста из пьесы Го-

голя «Женитьба». Ей предстояло выбрать одного из четырех женихов, а критерий идеального жениха у нее не один, а несколько. Вот и пришлось ей, бедняге, помучиться.

«Право, такое затруднение — выбор! — жалуется Агафья Тихоновна. — Если бы еще один, два человека, а то четыре. Как хочешь, так и выбирай. Никанор Иванович недурен, хотя, конечно, худощав, Иван Кузьмич тоже недурен. Да если сказать правду, Иван Павлович тоже, хоть и толст, а ведь очень видный мужчина. Прошу покорно, как тут быть? Балтазар Балтазарович опять мужчина с достоинствами. Уж как трудно решиться, так просто рассказать нельзя, как трудно!»

И тут Агафья Тихоновна излагает свои представления о прекрасном.

«Если бы губы Никанора Ивановича да приставить к носу Ивана Кузьмича, да взять сколько-нибудь развязности, какая у Балтазара Балтазаровича, да, пожалуй, прибавить к этому еще дородности Ивана Павловича, я бы тогда тотчас же решилась».

Видите, как нелегко было девице на выданье с разносторонними требованиями.

Но если можно, хотя и мысленно, совместить нос одного человека с губами другого, то уж никак не совмещаются требования минимальной стоимости вещи и ее наилучшего качества. Они несовместимы и отрицают друг друга. Но значит ли это, что, делая ставку на качество, нельзя учитывать стоимость? Или наоборот. Неужели, стремясь купить вещь подешевле, не следует учитывать качества? Ведь эдак придется приобретать тряпье!

Нет сомнения, что все надо учитывать, но по-разному. Делая ставку на качество, следует оговорить максимальную стоимость, допустимую для решения этой задачи. А покупая дешевую вещь, неплохо представить себе минимально-допустимое ее качество, ниже которого покупать не следует даже за бесценок.

Таким образом, при формулировке критерия близости к цели следует оговаривать те средства, которые допускаются при этом. Гордый и жестокий афо-

ризм: цель всегда оправдывает средства — не более чем парадокс, так как цель в жизни не одна и всякое средство, предназначенное для достижения самой сокровенной цели, не должно входить в противоречие с другими целями. Именно поэтому средства всегда ограничены. Не существует «любых средств». Средства для достижения самых важных и высоких целей не должны входить в противоречие с другими целями и принципами, может быть не столь высокими, но важными.

Указанный афоризм следовало бы сформулировать так: цель всегда оправдывает допустимые средства. Но после такой редакции он лишается своего гордого звучания и становится научно обоснованной истиной.

Но продолжим наш разговор о самонастройке.

самонастройка как управление

Пусть наш станок-автомат настроен и изготавливает превосходные гайки. При этом должны быть строго постоянны как параметры станка, так и параметры заготовок. Предположим, что на станок поступила партия заготовок, несколько отличных от предыдущих по форме или твердости материала. Естественно, что это обстоятельство не могло не оказать влияния на качество выпускаемых деталей и выступает как самая обычная помеха. Маловероятно ожидать от нее улучшения работы станка. Скорее всего качество выпускаемой продукции ухудшится, и наладчик должен будет переналадить станок: переналадить — значит найти такое положение управляющих ручек на станке, которое обеспечило бы выпуск наилучших деталей. Значит, наладчик будет стремиться сделать наименьшим (минимизировать) отличие вышеуказанных деталей от их идеала, представленного на чертеже. А это и есть управление.

Обобщая вывод из проведенного примера, скажем, что в процессе управления наладчик устраняет последствия непредвиденных случайных изменений, которые произошли в системе, и возвращает ее в маловероятное состояние, соответствующее минимуму критерия близости к совершенству.

Пока мы не будем интересоваться, как это делается. Сейчас нам важно установить факт, что система вышла из требуемого состояния и через некоторое время при воздействии со стороны другой системы (наладчик тоже «система») вернулась в прежнее состояние. А от этого факта рукой подать к понятию самонастраивающейся системы.

Если рассматривать более сложную систему, состоящую из станка и человека-наладчика, то ее, безусловно, можно назвать самонастраивающейся. В данном случае наладчик как раз и является настраивающим звеном в такой сложной системе.

Читатель, возможно, заметит, что тогда любая машина вместе с человеком является самонастраивающейся.

— Да, если человек, воздействуя на эту систему, улучшает какие-то ее свойства.

— Нет, если при взаимодействии с машиной, человек не преследует цель — улучшить ее работу.

Так шофер-механик, работающий на автомобиле, образует вместе с ним самонастраивающуюся систему. Он ездит на нем и время от времени регулирует и налаживает его. А шофер-любитель, как правило, уже не является настраивающим звеном; и система «машина — шофер-любитель» не самонастраивающаяся.

Естественно задать вопрос: а имеет ли вообще смысл рассматривать подобные самонастраивающиеся системы и не является ли это пустым фразерством и софистикой? Ведь если всю самонастройку «спихивать» на человека, то цена подобной «автоматике» — грош!

Следует сказать, что рассмотрение подобных систем самонастройки с человеком имеет глубокий смысл, так как позволяет понять особенности поведения человека-наладчика. А поняв их, можно затем пытаться создать автомат, заменяющий и освобождающий этого человека.

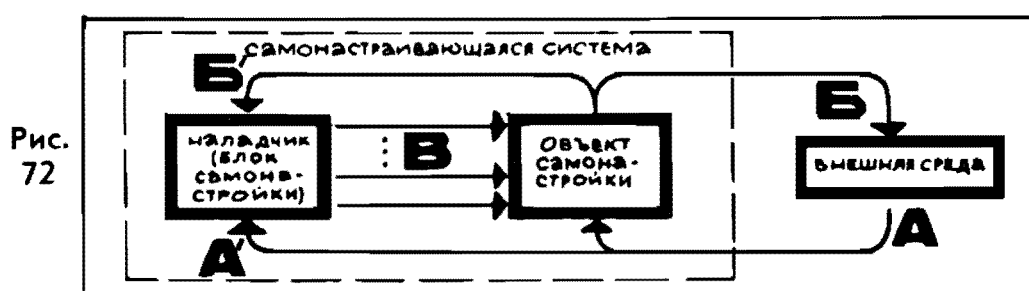
Чтобы создавать такой автомат, нужно четко представлять: что должен этот автомат «знать», что он должен «уметь» и что должен «запоминать» в процессе работы? А чтобы ответить на эти вопросы, надо серьезно изучить работу и поведение человека в ана-

логичных условиях. Занимаясь этим, мы тем самым готовим ему смену, то есть составляем схему работы будущего автомата, который заменит человека. Между прочим, поведение слесаря-наладчика, его приемы по настройке сложной системы станков-автоматов являются одной из важнейших и пока малоизученных проблем науки управления.

Теперь попытаемся сказать, что же такое самонастраивающаяся система.

Будем называть *систему самонастраивающейся*, если она самостоятельно, без вмешательства извне стремится к совершенству, то есть критерий ее близости к идеалу поддерживается ею самой на минимальном уровне, независимо от различных воздействий внешней среды.

Блок-схема такой самонастраивающейся системы при ее взаимодействии со средой показана на рисунке 72. Здесь блоком самонастройки является наладчик. Он наблюдает за качеством готовой продукции по каналу *Б* и одновременно по каналу *А* следит



за изменением свойств поступающих в автомат заготовок. Если заготовки изменились, то наладчик перестраивает станок, устанавливая новые значения его управляемых параметров. Для этого он должен знать, как поступать в том или ином случае, при том или ином отклонении заготовок от стандарта. Его поступки должны быть строго predetermined характером работы, совершаемой автоматом. Он должен либо знать все о процессе обработки, чтобы самостоятельно судить о том, каким образом менять параметры, либо располагать полной инструкцией поведения при всех возможных случаях отклонения заготовок от стандарта.

трудности наладки...

Кто хоть немного знаком со станками-автоматами, знает, что такая инструкция «на все случаи жизни» выглядела бы как Большая Советская Энциклопедия. А полное понимание процесса обработки потребовало бы от наладчика умения разбираться в тончайших вопросах обработки вообще и глубокого знания данного процесса в частности. Естественно, что такое положение мало кого устраивало бы и прежде всего оно обременительно было бы для самого наладчика. Ведь разбираться в многотомной инструкции — занятие крайне неприятное. Если к этому еще добавить, что довольно часто детали идут средними сериями, то есть примерно каждый месяц на автомат ставится новая деталь, то станет ясно, что жизнь наладчика, которому надо каждый месяц работать с новой толстенной инструкцией, и жизнь технолога, который должен каждый месяц составлять такую инструкцию, станет совсем невыносимой.

Трудности, испытываемые наладчиком и технологом, происходят из-за того, что ими был выбран не лучший в данном случае способ настройки автомата, известный под названием *«метод компенсации»*. При такой настройке автомата наш наладчик почти лишен возможности пользоваться каналом обратной связи *Б*, по которому он мог бы судить о качестве выпускаемой продукции. Такой метод создает затруднения не только для наладчика, но и для технолога.

Действительно, канал *Б* необходим лишь для того, чтобы знать, выпускает станок хорошую продукцию или брак. Выход брака является сигналом, по которому наладчик обращает внимание на вход системы, то есть на заготовки, так как при прочих равных условиях в первую очередь отклонение заготовок от стандарта могло вызвать брак на выходе станка-автомата.

А если «прочие равные условия» не соблюдаются? Если при этом по какой-то внутренней причине изменились параметры станка — предположим, ослабилась крепление одного из резцов? В инструкции, несмотря на ее объем, на этот счет никаких указаний

нет, поскольку она составлена лишь на случай изменения заготовок!

Единственное, что может сделать наладчик, так это внимательно изучить причины брака и попытаться устранить их, перенастраивая станок. А для этого он должен самым пристальным образом следить за состоянием канала *Б*, который фактически несет почти всю информацию о качестве работы станка.

Наблюдая по каналу обратной связи *Б* за результатом работы станка, наладчик может настроить автомат, даже если он вообще никогда не сталкивался с такой работой.

...и их преодоление

Пусть наш наладчик обладает самым минимальным запасом знаний из области настройки станков-автоматов и достаточно здравым смыслом. Знания нужны ему, чтобы выпускать продукцию требуемого наименования, и, скажем, при задании выпускать гайки он должен суметь «заставить» станок-автомат делать именно гайки, а не болты. (Для этого он должен иметь минимальную квалификацию.) А здравый смысл ему нужен для того, чтобы он мог в случае необходимости налаживать автомат, то есть сводить к минимуму число бракованных деталей, выпускаемых автоматом.

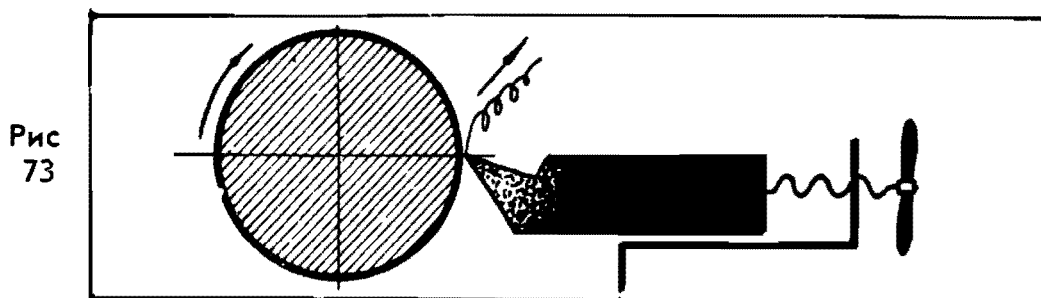
Пусть неналаженный станок выпускает гайки, отдельные размеры которых не соответствуют чертежу, скажем, выходят не шестигранные, а девятигранные гайки. Наладчик не знает, что нужно делать, чтобы эти размеры стали правильными, но он хорошо осведомлен, какие рукоятки этого автомата можно крутить, чтобы воздействовать на какие-то размеры гайки (ему неизвестно какие). Сначала он, по-видимому, попытается установить, как изменяются размеры выпускаемой гайки при изменении параметров станка. Повернув одну ручку (изменив один параметр) и сделав одну гайку, наладчик может выяснить, какие изменения в готовую продукцию вносит эта ручка. Во время такого анализа он может встретить ручки трех типов.

три типа рукояток управления

Ручки первого типа независимо от положения других ручек будут изменять только один размер гайки. Причем поворот в одну сторону, например в правую, соответствует увеличению какого-то определенного размера, а поворот в другую — уменьшению.

Обнаружив такие ручки, наладчик, вероятно, обрадуется, поскольку ими очень легко управлять. В самом деле, если размер увеличился, то соответствующую ему ручку нужно повернуть, причем настолько, насколько это необходимо, чтобы устранить ошибку в размере гайки.

На рисунке 73 показан пример действия ручки этого типа. Здесь положение резца относительно вращающейся детали и диаметр после обработки зависят от положения рукоятки управления резцом.



Ввинчивая эту рукоятку, мы тем самым подаем резец и уменьшаем диаметр детали, а вывинчивая, увеличиваем. Пусть один оборот ручки смещает резец на 1 миллиметр. Тогда наладчик, осматривая готовую деталь и обнаружив, что диаметр, управляемый этой ручкой, больше требуемого на 0,1 миллиметра, должен повернуть эту ручку по часовой стрелке на одну двадцатую оборота. Диаметр детали при этом уменьшится на 0,1 миллиметра и станет правильным.

Заметим, что все это наладчик может сделать с уверенностью лишь после того, как произведет эксперименты: попробует крутить ручку вправо и влево и будет наблюдать при этом за изменением размеров продукции на выходе автомата.

Теперь наладчик твердо знает, как нужно себя вести при изменении тех размеров, которые управ-

ляются ручками первого типа. После замеров готовой детали он сразу может установить ручки в такое положение, чтобы в следующей детали эти размеры совпадали бы с требуемыми.

Сделаем небольшой вывод. Отклонение размера, управляемого ручкой первого типа, несет полную информацию о том, куда и насколько следует повернуть эту ручку, чтобы указанное отклонение стало равным нулю. Регулирование размеров готовой продукции при помощи ручек первого рода не составляет серьезных затруднений и называется *регулированием по отклонению*.

Ручки второго типа сначала несколько озадачат наладчика. Поворот одной такой ручки приведет к изменению сразу нескольких размеров гайки. На рисунке 74 показан пример устройства с двумя ручками второго типа, которые определяют положение заготовки (в данном случае прямоугольника). Эту

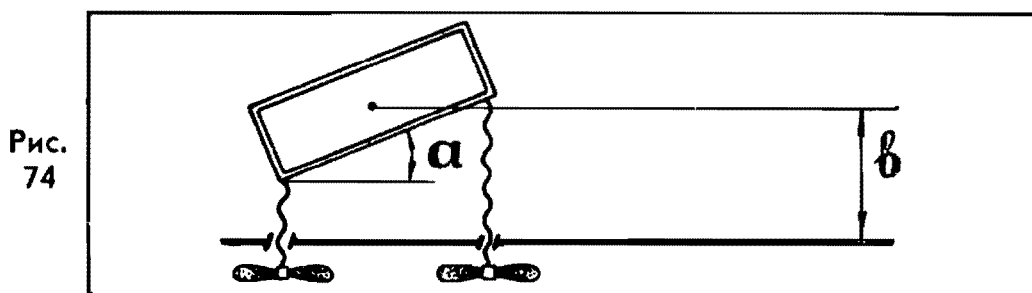


Рис.
74

заготовку необходимо поставить в определенное положение относительно станка, то есть надо выставить определенный угол наклона a и расстояние до центра b . Хорошо видно, что при вращении одной из указанных ручек меняются оба эти параметра положения. И ясно, что для достижения требуемых значений параметра a и b необходимо одновременно вращать обе ручки. Так, для изменения уровня b обе ручки следует поворачивать в одну сторону на один и тот же угол. При этом угол a не будет изменяться. Для изменения же угла a следует вращать ручки в разные стороны на один и тот же угол. При этом уровень b остается неизменным.

Таким образом, чтобы воздействовать только на один размер готовой продукции, необходимо определенным образом вращать сразу несколько ручек второго типа.

Как легко заметить, и в данном случае отклонение размеров продукции от требуемых также несет полную информацию о том, как нужно изменять положение ручек второго типа, чтобы это отклонение свести к нулю. Только зависимость здесь сложнее. Но и ее может уловить наладчик во время экспериментов со станком-автоматом. А уловив, сможет потом без труда определить то положение рукояток второго типа, которое гарантирует правильные размеры детали.

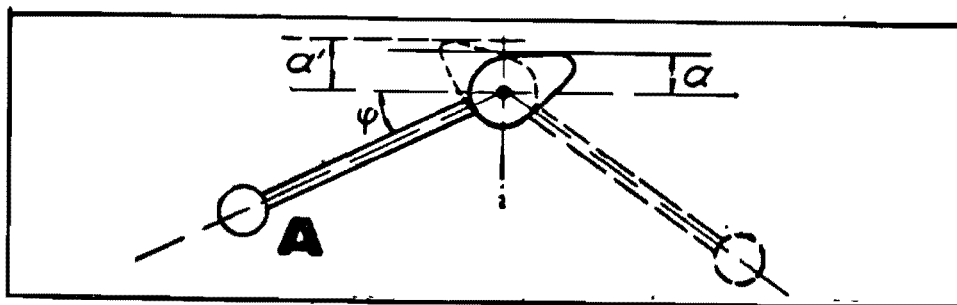
Как видно, ручки первого и второго типа позволяют очень оперативно устанавливать размеры выпускаемых деталей. Для этого достаточно один раз определить отклонение размера от требуемого значения, то есть достаточно одного наблюдения, чтобы совершенно точно знать, как поступить, чтобы отклонение сделать равным нулю.

Сделаем еще один вывод: ручки первого и второго типа не страшны наладчику. Однажды установив, как они себя ведут, он может быть уверен, что в любом случае сумеет сразу ликвидировать брак, если, конечно, этот брак происходит из-за нарушения тех размеров готовой продукции, которые управляются ручками первого и второго типа.

И наконец, при анализе станка-автомата наладчику встретятся ручки, которые его сначала поставят в тупик.

Ручки третьего типа, о которых пойдет речь, более сложные. Каждая из них при перестановке меняет сразу несколько размеров готовой продукции. Но изменение размеров будет различно для разных положений ручки. В одном положении перемещение ручки вправо будет увеличивать размер детали, а в другом — то же смещение приведет к уменьшению этого размера. Пример ручки третьего типа показан на рисунке 75, где размер a определяется углом поворота кулачка, который приводится во вращение ручкой A . Видно, что в левом положении ручки при ее вращении против часовой стрелки a увеличивается, в то время как в правом положении ручки при том же направлении вращения размер a уменьшается.

Рис.
75



Приведенный пример показывает, что существует такое положение ручки, при котором ее легкий поворот не изменяет размера a . На чертеже это положение соответствует углу поворота ручки φ , равном 90 градусам. Указанный угол в данном случае оказывается критическим и не зависит от положения других ручек. Но подобное бывает далеко не всегда. Очень часто критическое положение ручки зависит от положения других аналогичных ручек.

Другим типичным примером рукоятки третьего рода может служить ручка настройки радиоприемника. Когда станция «уплыла», приемник следует подстроить. В каком направлении следует крутить ручку настройки? На этот вопрос можно ответить только после пробы, так как ручка настройки является рукояткой третьего рода и поэтому нуждается в систематической проверке. Действительно, в одном случае для настройки необходим поворот ручки по часовой стрелке, а в другом — против часовой. Все зависело от того, куда «уплыла» станция.

Как видно, ручки третьего типа обладают коварной особенностью — они меняют степень своего воздействия на выход регулируемой системы. Если за ручками первого и второго типа достаточно пронаблюдать только один раз, чтобы определить величину воздействия на систему, то за ручками третьего типа нужен глаз да глаз, то есть за ними нужно следить все время. Настраивая систему, нужно все время исследовать, не сменила ли какая-нибудь ручка свое воздействие на обратное. Если сменила, то следует действовать уже с учетом этой новой ее особенности.

Следовательно, при работе с ручками третьего типа необходимо соблюдать следующее правило: поворачивать их на небольшой угол, с тем чтобы не

пропустить момента перехода какой-либо из ручек через критический угол.

Работа с ручками третьего рода напоминает военные действия; разница лишь в том, что воевать приходится не с неприятелем, а с природой. Каждому бою предшествует разведка, которая состоит в сборе информации о состоянии сил противника. Потом информация ложится в основу плана боевой операции. По окончании операции положение меняется — противник перестраивает свою оборону, и для следующей операции необходимо провести новую разведку и т. д.

Точно так «воюет» наладчик с рукоятками третьего рода. Прежде чем перестраивать эти ручки, он обязан произвести «разведку», которая даст ему возможность узнать, как следует крутить эти рукоятки, чтобы получить желаемый эффект. Произведя подстройку станка, наладчик снова производит «разведку», после чего снова подстраивает станок и т. д.

Схема «разведка — бой — разведка» применима и здесь, но в следующей трактовке: «эксперимент — настройка — эксперимент». При этом под экспериментом понимаются такие манипуляции с объектом, которые обеспечивают получение информации, необходимой для подстройки этого объекта.

8. СЛУЧАЙНЫЙ ПОИСК

Итак, наладчик то анализирует влияние ручек третьего типа на систему, то настраивает ее при их помощи. Именно поэтому управление при помощи этих ручек имеет двойственный характер и называется *поиском*.

Под поиском в данном случае подразумевается активный процесс сбора информации. Это не просто наблюдение за объектом, а эксперименты над ним для того, чтобы знать, как он поведет себя в тех или иных условиях, которые складываются при настройке объекта. Если объект не изменяется, то его обследование можно произвести один раз и навсегда. Таковы ручки первого и второго рода.

Напомним читателю, что эксперименты с ручка-

ми первого и второго типа наладчик производит лишь до тех пор, пока не опознает их тип. После этого никаких проб он уже не делает, так как ему вполне ясно, в какую сторону и насколько следует поворачивать эти ручки.

Иное дело ручки третьего рода. Они все время меняют свои свойства. Если вчера поворот какой-то из них увеличивал размер гайки, то сегодня — уменьшает. И наоборот.

Ручки третьего типа требуют постоянного поиска, так как при отклонении размеров готового изделия от требуемых совсем неизвестно, куда и насколько нужно их поворачивать. Поиск и состоит в том, что сначала делается несколько проб, и лишь затем появляется возможность настраивать систему. Значит, основную трудность при настройке станка наладчик испытает при работе ручками третьего типа, и следовательно, главное в его работе — процесс поиска.

Как же строится поиск?

Поразмыслив, наладчик может выбрать один из следующих путей.

ПУТЬ № 1

Повернув немного первую ручку третьего типа и изготовив при этом положение одну гайку, наладчик сравнит ее с предыдущей гайкой. Для этого ему понадобится применить критерий близости к цели, о котором говорилось раньше. Если величина этого критерия для новой гайки окажется меньше, чем для предыдущей (то есть гайка улучшилась), то эту ручку надо продолжать вращать в том же направлении. Если же критерий близости увеличился и гайка стала хуже, ручку нужно крутить в другую сторону. Постепенно вращая эту ручку, наладчик добивается наилучшей гайки. Она пока еще далека от идеала, но уже лучше первой — совсем плохой — и самая лучшая из всех тех, которые можно получить, вращая первую ручку автомата и пока еще не трогая другие.

Затем наладчик переходит ко второй ручке. Он

находит такое ее положение, при котором гайки получаются наилучшие. Потом переходит к третьей, четвертой и т. д. Может случиться и такое, что, повертев все ручки автомата, наладчик улучшит гайку, но не добьется такой, какая нужна. Тогда ему придется вернуться к первой ручке и снова искать ее наилучшее положение, так как при изменении положения других ручек наилучшее положение первой ручки могло измениться (напомним, что он вращает ручки третьего типа, которые влияют друг на друга). Затем переходит ко второй, потом к третьей и т. д. до тех пор, пока гайка не станет удовлетворять заданным техническим требованиям. Может ли оказаться, что этот процесс никогда не закончится?

Нет, не может. Ведь наладчик всякий раз только улучшает гайку, а не ухудшает ее. Значит, наступит момент, когда из автомата выйдет гайка нужных размеров.

И все же такой способ настройки автомата — он называется *способом поочередного изменения параметров* или *способом Гаусса — Зейделя*, — хоть и приводит к желаемому результату, однако он слишком трудоемкий. Поэтому наладчик может выбрать другой путь наладки автомата.

ПУТЬ № 2

Второй путь потребует от наладчика определенного времени лишь на анализ влияния ручек, а настраивать, точнее — подстраивать, систему он начнет потом.

Рассуждать он вправе следующим образом. Каждая ручка в разной степени влияет на величину критерия близости к цели. Поэтому выгоднее на больший угол поворачивать те ручки, которые сильнее воздействуют на качество выпускаемых деталей, и поменьше вращать ручки, оказывающие слабое влияние. В результате он придет к выводу, что ручки надо поворачивать пропорционально их влиянию на указанный критерий. Если одна из них в два раза сильнее влияет на критерий, чем другая, то при настрой-

ке угол ее поворота надо сделать в два раза больший, чем второй. Приведем пример.

Пусть имеются три ручки третьего типа, при помощи которых наладчик должен свести к минимуму критерий близости к идеалу готовых деталей. Прежде чем применить указанный принцип, он обязан знать степень влияния каждой из ручек на критерий. Для этого он поворачивает одну из них в одну сторону (пусть по часовой стрелке) на некоторый угол, например на 10 градусов. Изготовив гайку и определив критерий близости, он увидит, насколько тот изменился по сравнению с предыдущей гайкой. Пусть начальное значение критерия было равно 20, а после поворота первой ручки стало 22. Прирост, как видно, равен +2 — таково влияние первой ручки. Теперь ясно, что при обратном от исходного положения вращении первой ручки на 10 градусов он, по-видимому, получит значение критерия 18 (прирост критерия равен —2), что означало бы уменьшение критерия и улучшение детали. Но вращать ручку в этом направлении пока не следует до тех пор, пока не будет выяснено влияние остальных рукояток.

Вернув первую ручку в исходное положение, следует то же самое проделать со второй, затем и с третьей, определив тем самым их влияние. Сведем результаты этих экспериментов в таблицу (стр. 207).

Здесь знак плюс означает поворот ручки по часовой стрелке, знак минус — против. На этом анализ заканчивается.

Далее делается рабочий шаг. Все рукоятки поворачиваются одновременно на угол, пропорциональный их влиянию на критерий, то есть пропорционально приросту этого критерия во время только что проведенных экспериментов. Величина рабочего шага равна приросту критерия, умноженному на некоторый постоянный коэффициент (в данном примере он был выбран равным 5).

В последнем столбце таблицы приведены углы поворота ручек при рабочем шаге (настройке). Они, как видно, пропорциональны результатам проб.

Заметим, что выбор коэффициента пропорциональности в данном случае был произвольным. Однако его обычно выбирают таким, чтобы как можно силь-

| | Исходное положение ручек | Анализ | | | Рабочий шаг |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| | | первый эксперимент | второй эксперимент | третий эксперимент | |
| 1-я ручка | 0° | +10° | 0° | 0° | -10° |
| 2-я ручка | 0° | 0° | +10° | 0° | +10° |
| 3-я ручка | 0° | 0° | 0° | +10° | -5° |
| Величина критерия близости к цели | 20 | 22 | 18 | 21 | 15 |
| Прирост критерия | — | +2 | -2 | +1 | — |

нее понизить критерий близости к цели. Естественно, что при этом как чрезмерное увеличение коэффициента пропорциональности, так и его излишнее уменьшение плохо сказываются на настройке. Этот коэффициент в каждом конкретном случае выбирается отдельно.

После подстройки нужно опять определить степень влияния ручек, так как это влияние почти наверняка изменится. Затем снова подстроить систему в соответствии с новыми данными. Продолжать подстраивать надо до тех пор, пока детали не станут нужной кондиции.

Этот метод настройки носит название *метода пропорционального изменения параметров*, или *«метода градиента»*. Он отличается особой точностью и во многих случаях оказывается выгодней метода Гаусса — Зейделя.

Случается, что и он может не устроить наладчика, так как слишком уж часто нужно определять свойства ручек. Чтобы один раз подстроиться, нужно сделать столько экспериментов, сколько всего ручек третьего типа. А если этих ручек сто? Или ты-

сяча? Что делать тогда? Значит, метод градиента хорош для настройки простых систем, где небольшое число ручек (две-три). Если же ручек много, то нужно искать новые методы настройки. И вот тут-то на помощь опять приходит случайность.

ПУТЬ № 3 (случайный поиск)

Третий путь требует от наладчика, кроме здравого смысла, еще и смелости, так как ему предстоит совершать на первый взгляд весьма «странные» и «неразумные» поступки. Чтобы настроить систему этим способом, ему следует одновременно поворачивать все рукоятки в случайных направлениях на небольшой угол (напомним еще раз, что речь идет только о ручках третьего типа). А как добиться случайности? Для этого можно каждый раз подбрасывать монету и поворачивать ручку, например, вправо, если выпадет герб, и влево, если выпадет цифра. Нужно еще и запомнить все смещения.

Производя такую малопроизводительную и «кромольную» операцию, наладчик опирается на замечательное свойство случайности — содержать все возможные варианты. А среди них есть и те, которые улучшают гайку, причем их немало. Надо только сделать очередной случайный шаг. Если же он приведет к ухудшению гайки, следует вернуться обратно и восстановить предыдущее положение рукояток управления автоматом. Потом снова сделать случайный шаг, слегка повернув ручки управления в новом случайном направлении.

На первый взгляд кажется, что наладчик поступает крайне неразумно. Если при настройке по методу градиента (путь № 2) наладчик наверняка улучшал качество гайки, то теперь она может даже ухудшаться. Далее, где уверенность, что наладчику не понадобится для наладки слишком долго крутить ручки? Да и кончится ли этот процесс когда-нибудь?

Все эти вопросы и недоумения связаны с тем, что случайный способ наладки автомата — способ необычный. Если же присмотреться к нему внимательно, то можно увидеть большие его преимущества пе-

ред неслучайными (регулярными) методами настройки.

Действительно, при случайном повороте ручек управления деталь может либо улучшиться, либо ухудшиться, причем оба результата следует ожидать в равной мере. Значит, в среднем каждый второй поворот рукояток будет улучшать работу станка. Как показывают опыты и расчеты, скорость настройки случайным методом значительно возрастает. Так, при работе по методу случайного поиска с системой, насчитывающей 100 ручек управления, наладчик затрачивает в среднем в 10 раз (!) меньше времени, чем при ее настройке методом градиента. Наладчик, двигаясь к цели, при неудаче возвращается обратно и снова продолжает поиск. При этом он делает разные шаги: и *плохие*, ухудшающие качество гайки, — тогда они немедленно устраняются, и *хорошие*. Среди этих хороших всегда будут *просто хорошие*, незначительно улучшающие гайку, и *очень хорошие*, сразу делающие гайку значительно лучше, чем в предыдущем случае. Это означает, что выбранное случайное направление изменения параметров оказалось верным почти для всех параметров и именно в этом или почти в этом направлении следует искать оптимальное положение ручек управления, которое соответствует наилучшей работе настраиваемой системы. Однако эти «очень хорошие» варианты случайного изменения параметров автомата крайне редки и не они обеспечивают преимущество случайного поиска. Сила его в *просто хороших* вариантах, которые встречаются значительно чаще и которые поэтому легко случайно найти.

случайный поиск в одной игре

Описанный метод настройки хорошо иллюстрируется известной детской игрой в «тепло — холодно». Читатель наверняка забавлялся в детстве этой нехитрой игрой. Правила ее просты и ясны: водящий должен найти предмет, спрятанный в комнате. Если он идет в неправильном направлении, то присутствующие ему кричат: «Холодно!» Если же он движется

более или менее правильно, то его подбадривают криками: «Тепло!» Возгласы «Жарко!» сопровождают точное движение водящего на предмет.

Как ведет себя водящий? Какую стратегию поиска он выбирает? Сначала он делает шаг в случайном направлении. Услышав отрицательный ответ — «холодно», он снова делает случайный шаг. И так до тех пор, пока не услышит слова «тепло». Сделав шаг в этом направлении, он продолжает свои поиски удачного направления. Услышав «жарко», он уверенно двинется вперед.

Как легко заметить, игрок ведет себя так же, как самонастраивающаяся система. Для него сигналы «холодно», «тепло» и «жарко» определяют изменение критерия близости к цели (спрятанному предмету). Выбор им метода случайного поиска объясняется, по видимому, тем, что он не знает других каких-либо приемов поиска. Это незнание оказало ему хорошую услугу, так как какой-либо другой метод усложнил бы ему поиск и затянул бы игру, да и сделал бы ее менее интересной.

страсти вокруг случайного поиска

Продолжим наш разговор о самонастройке случайным методом.

Когда десять лет назад такой подход к решению проблемы самонастройки был предложен группой лиц — автор тоже приложил к этому руку, — он не оставил равнодушных. Все, кому пришлось сталкиваться со случайным поиском, отзывались о нем бурно и вдохновенно. Одни (их сначала было большинство) откровенно ругались, всячески упражняясь в остроумии по поводу случайного поведения. Другие так же откровенно встали на защиту случайного поиска, видя в нем определенную перспективу для преодоления «проклятия размерностей» сложных систем. (Это проклятие угрожает всем, кто берется настраивать очень сложную систему, имеющую большое число управляемых рукояток. Решать такие задачи пока никто не умеет.)

Споры вокруг случайного поиска постепенно утих-

ли, ибо стало ясно, что в некоторых сложных ситуациях с большим числом рукояток управления случайный поиск является единственным методом, гарантирующим решение задачи. Если же рукояток немного и объект простой, то лучше действовать регулярными методами поиска (пути № 1 и № 2).

Надо сказать, что и до сих пор можно встретить людей, которые не могут свыкнуться с мыслью, что в определенных тяжелых случаях быстрее и надежней действовать случайным образом. Однажды мой хороший приятель после бурного обсуждения случайного поиска на очередной научной конференции умолял меня признаться, что все это чушь.

— Я все хорошо понимаю, — говорил он, — тебе это нужно для диссертации. Уверен, что ты ее защитишь. Но скажи откровенно: случайный или неслучайный поиск — разве это так важно? А может быть, все-таки градиентный метод лучше? Признайся!

Я не признался.

А солидный теоретик авторитетно убеждал меня:

— Молодой человек, ну что вы занимаетесь случайным поиском? Я раньше тоже занимался им и доказал, что случайное поведение всегда равномерно хуже регулярного, а случайный поиск хуже регулярного поиска. Бросьте его!

Я не бросил.

В другой раз мне пришлось услышать, как один из рьяных противников случайного поиска жаловался:

— Я занимаюсь созданием сложнейших электротехнических устройств, и мне очень много приходится искать, моделируя поведение объекта на быстродействующей вычислительной машине. Так вот программисты определяют оптимальные варианты случайным поиском! Мне в конце концов безразлично, каким методом будет найден оптимальный вариант машины. Но ведь это же нелогично! Сколько я их ни убеждал, что случайный поиск это нонсенс, не могут понять! Если программист хоть один раз считал методом случайного поиска, его уже за уши не оттянешь. И что они в нем находят?

обучение при случайном поиске

Если в процессе случайного поиска наладчик еще и запомнит результаты своей работы с автоматом и последующий случайный выбор будет делать не совсем случайно, а с учетом результатов предыдущей работы, то такой метод даст еще больший выигрыш. Наладчик станет в минимальное время настраивать и перестраивать автомат. Более того, работая методом случайного поиска с самообучением, он сможет наилучшим образом поддерживать автомат в требуемом состоянии.

Как известно, в процессе эксплуатации автомат и его инструменты изнашиваются, что ведет к повышению процента брака. Нужно все время находить такое новое положение рукояток управления, при котором брака не будет. Делается это обычно так. При подстройке наладчик опирается на опыт предыдущей наладки, ибо причина расстройки автомата осталась, по-видимому, одной и той же, например в виде износа резцов. Следующую за ней подстройку наладчик производит на базе предыдущих. Ее он сделает уже в один-два шага, так как раньше обучился устранять данную расстройку автомата и знает, куда, как и какие ручки крутить, чтобы настроить автомат в один прием.

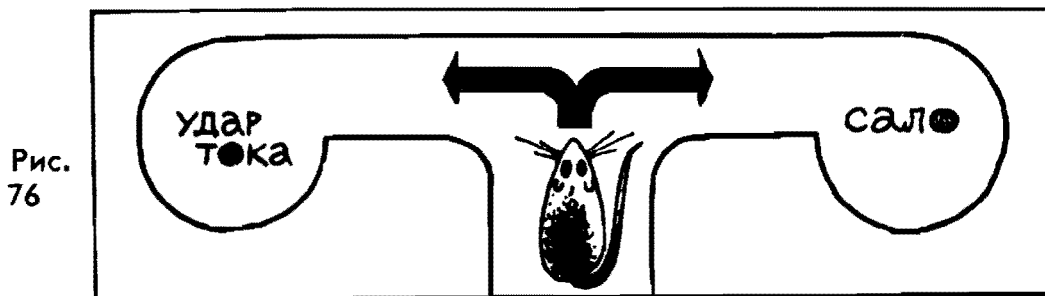
Процесс самообучения во время случайного поиска напоминает обучение животных. Если животное случайно сделало то, чего от него требует дрессировщик, оно поощряется. Поощрение производится в надежде подкрепить случайное поведение пищевым рефлексом.

В случае неудачи животное наказывается в расчете на то, что его дальнейшее поведение будет иным и среди этих иных поведений встретится такое, которого ждет дрессировщик.

Надо помнить, что наказание имеет смысл лишь в том случае, когда способов поведения немного. Тогда животное, уклоняясь от наказания, сможет быстро случайно совершить требуемый образ действий. В сложной обстановке, когда вариантов поведения много, наказание вводит нецелесообразно — оно почти не ускоряет обучение, а только нервирует

животное. Это и является теоретическим обоснованием преимуществ поощрения перед наказанием.

Рассмотрим простой опыт обучения лабораторных крыс в Т-образном лабиринте (он показан на рис. 76). Крысу выпускают в лабиринт с двумя ходами: направо и налево. Экспериментатор принимает решение научить крысу поворачивать направо, с этой целью он поощряет ее салом, если она поворачивает направо, и наказывает ударом тока, если она поворачивает налево. Через несколько сеансов обучения крыса уверенно сворачивает направо за салом. Она обучилась, чему способствовало и наказание и поощрение.



Можно ограничиться одним наказанием: не давать ей сала при повороте вправо и по-прежнему «ударять» током при повороте влево. Крыса и в этом случае научится поворачивать направо, избегая наказания. Хотя процесс обучения окажется более длительным.

Если оставить только поощрение, то крыса начнет обучаться лишь после того, как случайно забредет в правый коридор.

На примере обучения крысы в лабиринте хорошо видно, что, комбинируя соответствующим образом поощрение и наказание, можно добиться заданной цели.

Совершенно аналогично происходит самообучение в процессе случайного поиска. Здесь так же можно комбинировать поощрение (увеличение вероятности удачного шага) и наказание (уменьшение вероятности неудачного шага) и достигать при этом цели — убыстрения работы поиска.

Мы все время говорили о наладчике, то есть о человеке, который настраивает автомат. А теперь представим, что нам надо заменить наладчика автоматической системой настройки, то есть машиной. Как легко заметить, ситуация с наладчиком, работающим по методу случайного поиска, имеет существенное преимущество — в ней очень просто заменить человека. Сделать это можно потому, что программа случайного поиска крайне проста и очень легко реализуется на автоматическом устройстве.

автоматика случайного поиска

Схема такого устройства приведена на рисунке 77. Здесь настраиваемая система имеет определенное число управляемых параметров (ручек), которые приводятся в движение *генераторами случайности*. На выходе системы стоит преобразователь. Он определяет состояние настраиваемой системы и образует на выходе сигнал, который достигает нуля лишь при идеально настроенной системе. Преобразователь оценивает близость регулируемой системы к цели. Блок управления, наблюдая за этим критерием, воздействует на генераторы случайности, включая или выключая их в зависимости от поведения критерия близости.



Схема работает очень просто. Генераторы случайности изменяют положение ручек управления системы в случайном направлении. Если после этого настраиваемая система не стала лучше, то есть критерий близости к цели системы не уменьшился, то блок управления по каналу Γ отдает команду на возврат ручек в предыдущее положение. Если же критерий уменьшился, то генераторами случайности

отдается распоряжение на следующий случайный шаг, и т. д. Вот и все.

Для обучения достаточно по тому же каналу Γ сообщать генераторам случайности приказы на их перестройку. Делается это следующим образом.

Одновременно с возвратом ручек управления блок управления по каналу Γ отдает команду на изменение характеристик самих генераторов случайности. Изменения производятся такие, чтобы ситуация, требующая возврата ручек в первоначальное состояние, встречалась как можно реже. Это значит, что такое движение ручек управления после перестройки генераторов случайности будет встречаться значительно реже, чем до перестройки. Этим достигается более частое обращение к таким движениям ручек, которые приводят к улучшению работы регулируемой системы.

При описании рассматриваемого обучения можно использовать термины игры «тепло — холодно». Тогда обучение сведется к тому, что водящий, испробовав и получив «холодную» информацию, запомнит ее и уже с меньшей вероятностью шагнет в эту сторону в другой раз, то есть постарается реже ходить туда, где было «холодно», зато чаще будет пробовать другие направления. А исключив одно за другим «холодные», он обязательно наткнется на «теплое» или даже «горячее» направление.

Хорошо видно, что обучение в данном случае ограждает водящего от бесплодного повторения заведомо «холодных» шагов и наводит его одновременно на «теплые».

Как легко заметить, мы описали сейчас «обучение на собственных ошибках». В качестве «наказания» выбрано воздействие на генераторы случайности, уменьшающее вероятность появления неэффективных вариантов смещения ручек управления системы.

Можно воспользоваться также системой «поощрения», увеличивая вероятность тех смещений ручек, которые привели бы к улучшению качества работы системы, то есть к уменьшению критерия близости. В обоих случаях система успешно будет обучаться

настройке и быстрее улучшать работу регулируемой системы, чем в случае без обучения.

Такая самообучающаяся система, как было показано, все время стремится улучшить качество своей работы. Но это качество может быть нарушено в любой момент. И тогда система должна быть готова к поиску нового положения ручек, при котором критерий близости к совершенству окажется минимальным. Но так как нулевое значение критерия, увы, не достигается, то система «не знает», чем объяснить отличие его от нуля: то ли тем, что меньшего значения критерия вообще нельзя достигнуть, то ли тем, что помеха выбила систему из наилучшего состояния. Поэтому она все время пытается улучшить себя, непрерывно пробует различные варианты изменения параметров и ищет, ищет, ищет... Одной из проблем поиска и является определение момента, когда можно посчитать, что объект уже настроен и поиск следует выключить.

Самонастраивающиеся системы получают в последнее время большое распространение. Действительно, хорошо и удобно, когда система сама настраивается и не требует вызова наладчика. И все же соображения удобства в данном случае играют не самую важную роль. Такие системы применяются там, где человек становится «узким местом» и не может обеспечить нормальную работу объектов в силу своих ограниченных возможностей. Иногда это просто необходимо, особенно если ситуация изменяется очень быстро и человек не в состоянии следить за ней. Кроме того, настройка большинства объектов редко бывает увлекательной операцией, и освобождение человека от этой скучной и однообразной работы является большой и благородной задачей.

Но во многих случаях задача настройки больших систем типа автоматической линии бывает очень сложной. Нужны усилия огромного коллектива специалистов, чтобы ее отладить. В этом случае настройка оказывается во многом творческим процессом, и при ее автоматизации надо моделировать прежде всего творческую сторону настройки. А это возможно лишь в том случае, если мы поймем, что такое творчество.

Так задача автоматизации настройки объекта связывается с проблемой творчества, и ее решение является первым шагом к автоматизации творческих процессов.

В заключение раздела заметим, что описанный способ автоматической настройки системы имеет предел; настраиваемая система достигает совершенства (хотя практически этого почти никогда не бывает) и поэтому не может стать лучше своего идеала.

В самое последнее время появился новый тип систем, так называемые самоорганизующиеся системы, которые не имеют предела улучшения и, подобно живым организмам, способны неограниченно улучшать свои свойства.

Но это уже другой рассказ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот и закончено путешествие по нашему трижды случайному миру. Теперь, стряхивая дорожную пыль, можно признаться, что путешествие было не из простых.

Первая половина пути была целиком посвящена преодолению трудностей, которые возводит случай, препятствуя всяческому целенаправленному действию. Такая разрушительная тенденция случайности опирается на второе начало термодинамики, которое выражает негативную сторону нашего мира. Мы увидели, что единственной надежной защитой от хаоса, к которому ведет случайность, является управление. А наука о законах управления — кибернетика — это наука о борьбе с хаосом.

За двадцать лет своего существования она разработала эффективные методы борьбы со случайностью, которые призваны подавить и уничтожить случай на пути к познанию. Но это не единственная мера против случайности. Разработаны «мирные» средства сосуществования со случайностью, которые позволяют эффективно действовать в обстановке случайных помех.

Другая половина нашего пути по миру случая

была окрашена в розовые тона. Здесь случай выступал в новой и необычной для него положительной роли. Мы узнали, каким образом случай может быть использован человеком в его практической деятельности. Мы поняли, что метод Монте-Карло, имея самое малое отношение к игре в рулетку в Монако, является мощным средством решения большого числа важнейших практических задач. Мы убедились, что в игровых ситуациях случайности уделяется огромное внимание, так как она не позволяет противнику действовать уверенно, тем самым препятствует его выигрышу.

Мы познакомились со статистической гипотезой мозга, которая смело и обоснованно предполагает, что структура нашей нервной системы во многом случайна, а ее разумное поведение возникает в результате установления условных рефлексов. Эти рефлексы образуются за счет обучения и самообучения, где элемент случайности также играет существенную роль.

Мы узнали, как работает удивительная машина — персептрон, которая обладает «даром» узнавания любых образов. Элемент случайности, специально введенный в конструкцию персептрона, в значительной мере определяет эту его способность.

В живой природе случайности принадлежит также огромная роль. Процесс эволюции и совершенствования живых организмов в результате естественного отбора происходит за счет случайных изменений, вызванных мутацией и закрепленных в поколениях наследственностью. Мы познакомились с первым прибором, работающим по методу случайного поиска, — гомеостатом — и убедились, что он копирует процесс естественного отбора. Исходным сырьем для рассмотренного нами усилителя мыслительных способностей является шум, причем схема действия усилителя копирует процесс искусственного отбора, издавна применявшегося человеком.

И наконец, мы познакомились с различными способами наладки сложных систем, убедились, что и здесь метод случайного поиска обладает рядом преимуществ перед регулярными методами.

Изучение удивительного мира случая только на-

чинается. Науке еще предстоит проникнуть в этот мир, полный загадочных явлений и бесконечных перспектив.

Раскопки бесценных кладов случая начались! Трудно предвидеть, к чему это может привести. Но одно уже можно сказать определенно: надо привыкать относиться к случайности не как к досадной помехе, не как к «несущественной стороне явлений» (см. философский словарь), а как к источнику неограниченных возможностей, которые не может предугадать самое смелое воображение.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| Что такое случай? (Вместо предисловия) | 3 |
| Случай — это... | 7 |
| 1. Случай — помеха | |
| 1. Случай у колыбели кибернетики | 22 |
| 2. Управление | 25 |
| Библейская легенда на кибернетический лад | 25 |
| Хаос | 27 |
| Демон Максвелла | 30 |
| Управление как средство достижения заданных целей | 36 |
| 3. История управления | 42 |
| Первый этап | 42 |
| Второй этап | 45 |
| Третий этап | 47 |
| Четвертый этап | 51 |
| Сказка про Девочку на качелях, злого Волка и Электрический контур | 51 |
| 4. Битва со случайной помехой | 59 |
| 5. Фронт подавления случайности | 62 |
| Обратная связь | 62 |
| Семь раз отмерь... | 63 |
| Фильтрация | 65 |
| Осредняющий фильтр | 68 |
| Корреляция | 69 |
| Много ли информации в словах? | 73 |
| Корреляционный фильтр | 74 |
| 6. Сосуществование со случайной помехой | 77 |
| Канал с переспросом | 78 |
| Печальный рассказ со счастливым концом | 84 |
| Можно ли делать безошибочные вычисления на ошибающейся машине? | 87 |
| «Самолечение» кодов | 89 |
| 7. Стратегия, риск и решение | 94 |
| Сказка о добром молодце и дорожном камне | 95 |
| Он или не он? (Детектив) | 100 |

| | |
|---|-----|
| Быль об автомате, продающем газированную воду | 107 |
| Право на ошибку | 110 |

II. Счастливый случай

| | |
|--|-----|
| 1. Шерлок Холмс, наконец, говорит откровенно | 114 |
| 2. Метод Монте-Карло | 117 |
| Один эксперимент и его математическая модель | 119 |
| Монте-Карло и баллистические ракеты | 125 |
| Пьяный решает задачу | 126 |
| Модель пьяницы | 130 |
| 3. Случай и игра | 132 |
| Сыграем в орлянку | 135 |
| Игра в секреты | 137 |
| 4. Обучение, условные рефлексы и случайность | 138 |
| Обучение за партой | 140 |
| Делай, как я! | 142 |
| Самообучение | 143 |
| Память под мышкой | 145 |
| Что такое условный рефлекс? | 146 |
| Устройство нервной системы | 148 |
| Механизм образования условного рефлекса | 151 |
| Гипотеза о случайной структуре мозга | 153 |
| 5. Случай и узнавание | 155 |
| Мужчина или женщина? | 156 |
| Шифровка изображений | 153 |
| Как отличить нуль от двойки? | 159 |
| Персептрон | 163 |
| Обучение персептрона | 166 |
| Персептрон в роли врача | 169 |
| Роль случайности в персептроне | 171 |
| Бионика | 172 |
| 6. Случай, отбор, эволюция | 175 |
| Три особенности жизни | 176 |
| Что такое мутация? | 176 |
| Механизм естественного отбора... | 178 |
| ...и его блокхема | 180 |
| Гомеостат — модель отбора | 181 |
| Усилитель интеллекта | 184 |
| Искусственный отбор как усилитель | 187 |
| 7. Самонастройка | 188 |
| О связях | 183 |
| Среда и объект | 189 |

| | |
|--|------------|
| Близость к идеалу | 192 |
| Самонастройка как управление | 194 |
| Трудности наладки... | 197 |
| ...и их преодоление | 198 |
| Три типа рукояток управления | 199 |
| 8. Случайный поиск | 203 |
| Путь № 1 | 204 |
| Путь № 2 | 205 |
| Путь № 3 (случайный поиск) | 208 |
| Случайный поиск в одной игре | 209 |
| Страсти вокруг случайного поиска | 210 |
| Обучение при случайном поиске | 212 |
| Автоматика случайного поиска | 214 |
| <i>Заключение</i> | 217 |

К ЧИТАТЕЛЯМ

Отзывы об этой книге просим направлять по адресу: Москва, А-30, Сущевская ул., 21. Издательство ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». Редакция научно-популярной литературы.

Растригин Леонард Андреевич
ЭТОТ СЛУЧАЙНЫЙ, СЛУЧАЙНЫЙ, СЛУЧАЙ-
НЫЙ МИР. М., «Молодая гвардия», 1969. 51
224 с., с илл.

Редактор *В. Федченко*
Художники *Б. Жутовский, И. Савицкий*
Худож. редактор *Б. Федотов*
Техн. редактор *Г. Петровская*

Сдано в набор 20/1 1969 г. Подписано к печати
30/IX 1969 г. А01203 Формат 84×108¹/₃₂. Бумага
№ 2. Печ. л. 7 (усл. 11,76). Уч.-изд. л. 11,1.
Тираж 65 000 экз. Заказ 2355. Цена 48 коп. Т. П.
1969 г., № 137.

Типография изд-ва ЦК ВЛКСМ «Молодая гвар-
дия». Москва, А-30, Сущевская, 21.



РАСТРИГИН ЛЕОНАРД АНДРЕЕВИЧ

Окончив Московский авиационный институт по специальности самолетостроение и защитив в 1960 году кандидатскую диссертацию по механике, Л. Растригин сделал затем поворот на 179° и «ушел» в кибернетику. Здесь он занялся случайным поиском — одним из новых методов отыскания оптимальных решений сложных задач.

Путь в кибернетике приносит ему и радости и огорчения. На этом пути он стал доктором наук, профессором, руководителем единственной в мире лаборатории случайного поиска. Здесь ему приходится отстаивать право на существование случайного поиска и делом доказывать преимущества этого метода.

Хлопот у Л. Растригина много. Но едва выпадает свободный день — он берется за перо. За немногие годы им написано две монографии и свыше ста научных статей. «Этот случайный, случайный, случайный мир» — первая его книга, в которой он решил рассказать широкому кругу читателей о своей специальности.