

решения и меры по увеличению или уменьшению запасов или по поддержанию их в определенных пределах. Эти решения принимаются в соответствии с приходами и расходами, успехами и провалами, и так происходит во всех системах. Специалисты по динамике систем представляют себе мир как совокупность запасов с механизмами, которые регулируют их уровень за счет управления потоками.

Системные мыслители рассматривают мир как совокупность обратных связей.

### **Как система влияет сама на себя: механизм обратной связи**

Системы, контролируемые информационной обратной связью, лежат в основе всех человеческих действий

и самого существования человечества, начиная с медленных эволюционных изменений и заканчивая запуском спутников в космическое пространство...

Что бы ни делали отдельные люди, промышленные предприятия или общество в целом — все так или иначе связано с системами, имеющими информационную обратную связь.

#### ***Джей Форрестер<sup>11</sup>***

Если величина запаса стремительно увеличивается, быстро уменьшается или удерживается в определенных рамках независимо от того, что происходит вокруг, значит, в системе действует какой-то управляющий механизм. Другими словами, если вы наблюдаете какой-то тип поведения в течение некоторого времени, вы с полным на то основанием можете заключить, что в основе этого типа поведения лежит определенный механизм. Реализуется он через **цикл (петлю) обратной связи**. Демонстрация определенного типа поведения в течение продолжительного времени — первый признак того, что в системе присутствует обратная связь.

В системе точно присутствует цикл обратной связи, если изменение уровня запаса влияет на входные или выходные потоки, ведущие к запасу или исходящие из него. Обратная связь может быть явной и достаточно простой. Для примера можно привести накопительный вклад в банке. Суммарное количество денег на счете (запас) влияет на то, сколько денег будет начислено в качестве процентов и приплюсовано к вкладу. Именно поэтому начисление банковских процентов производится с определенной периодичностью (не реже раза в год). Суммы, начисленные в виде процентов (входной поток) не будут постоянными; они меняются в зависимости от того, какая сумма уже есть на счете.

Другой вариант простой обратной связи можно наблюдать, если у вас есть текущий банковский счет, на который вам перечисляют зарплату. Если при ежемесячной проверке счета вы заметили, что сумма на нем (запас) слишком уменьшилась, вы можете взять сверхурочную работу или подработку, чтобы получить больше денег. Деньги, перечисляемые на счет, — это входной поток, и вы его регулируете для того, чтобы довести сумму на счете до желаемого уровня. Если в результате ваших действий сумма существенно увеличилась, вы можете счесть, что пора расслабиться и работать поменьше, и таким образом уменьшите входной поток. Такой тип обратной связи позволяет контролировать сумму на счете и поддерживать ее в желаемых границах. Вы можете сказать, что увеличение или уменьшение доходов — не единственный цикл обратной связи, влияющий на сумму на счете. И будете правы: можно манипулировать еще и снимаемыми со счета средствами — то есть существует еще и цикл обратной связи, регулирующий исходящий поток.

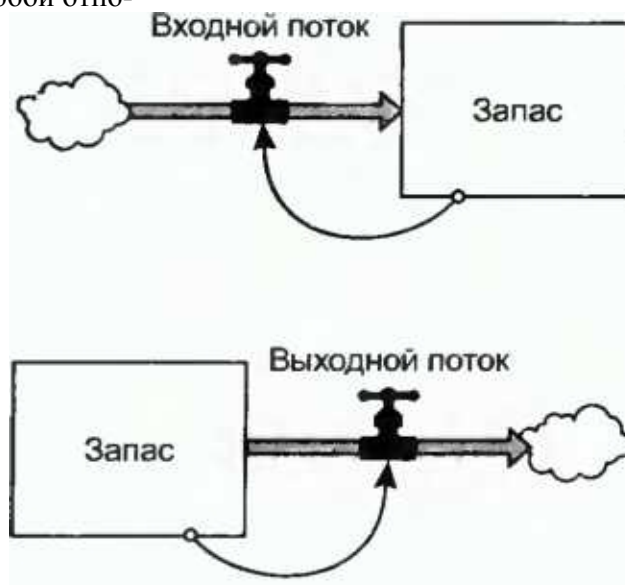
Циклы обратной связи могут удерживать уровень запаса в определенных пределах, заставляя его расти или уменьшаться. В любом случае потоки, ведущие к запасу или исходящие из него, меняются в зависимости от величины самого запаса. Что-то или кто-то, отслеживающий уровень запаса, принимает меры и изменяет величину входного и/или выходного потока, что приводит к определенному изменению уровня запаса. Уровень запаса

---

<sup>11</sup> Jay W. Forrester. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1961. 15. Книга издавалась на русском языке: *Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика)*. М.: Прогресс, 1971. 340 с.

управляется обратной связью, которая строится на последовательности сигналов и действий, позволяя запасу влиять на свою же величину.

Не во всех системах есть циклы обратной связи. Некоторые (немногочисленные) системы представляют собой отно-



**Рис. 8. Как читать потоковые диаграммы с обратными связями.**

На каждой диаграмме такого типа присутствуют: запас; поток, изменяющий величину запаса; информационная связь (показана дугообразной стрелкой), управляющая действием. Она либо усиливает действие, либо изменяет его за счет регулирования потоков

сительно простые последовательности запасов и потоков, не образующие замкнутый контур. На такую последовательность могут влиять внешние факторы, однако величины запасов никак не влияют на относящиеся к ним потоки. А вот системы, содержащие циклы обратной связи, встречаются достаточно часто. Они могут иметь интересную структуру и, как мы увидим дальше, порой демонстрируют довольно неожиданное поведение.



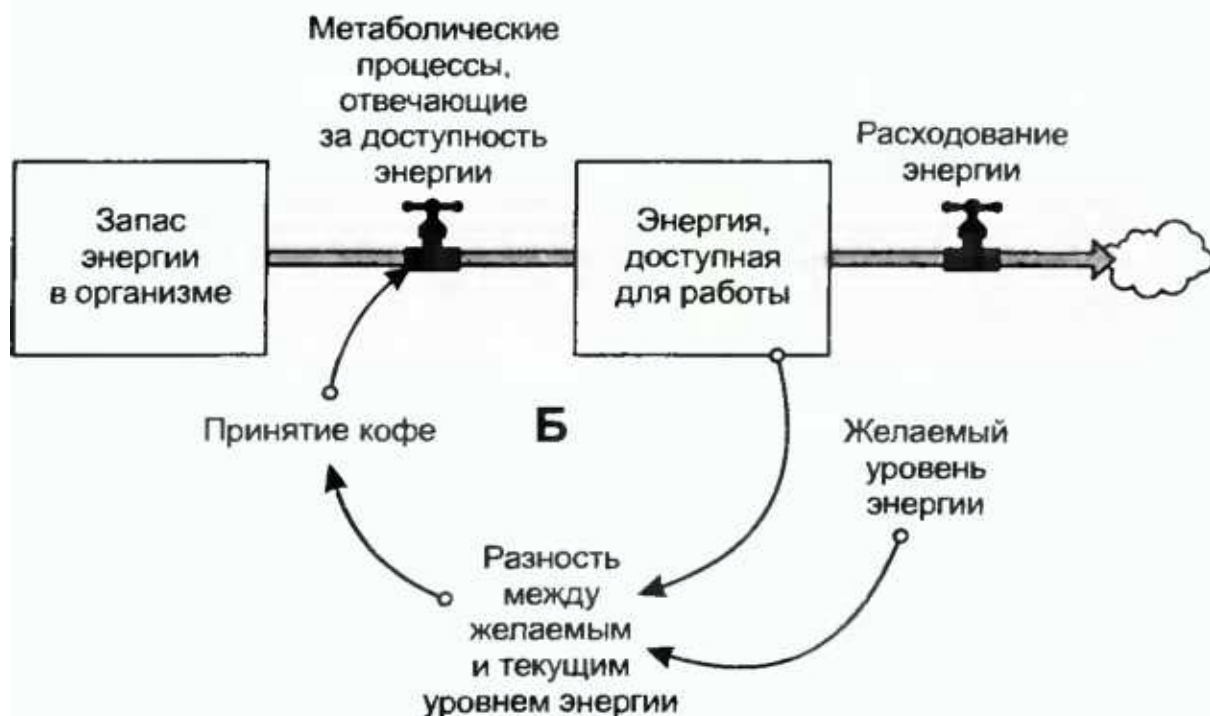
**Цикл (петля) обратной связи представляет собой цепочку причинно-следственных связей, исходящую из запаса и возвращающуюся к нему же. Связи реализуются через набор решений, правил, физических законов или действий, зависящих от величины самого запаса. Изменение запаса вызывает изменение потока, в свою очередь, вызывающее дальнейшее изменение запаса, и т. д.**

### **Стабилизирующие петли: балансирующий цикл обратной связи**

Один из широко распространенных типов обратных связей стабилизирует величину запаса на определенном уровне — так, как это было в примере с текущим банковским счетом. Уровень запаса может поддерживаться не совсем неизменным, а просто оставаться в каких-то границах. Приведенные дальше другие примеры стабилизирующих циклов обратной связи наверняка вам знакомы. На них мы сможем изучить отдельные составляющие петель обратной связи.

Если вы часто пьете кофе, то вам знакомо такое поведение: когда человек ощущает упадок сил, он наливает себе чашечку крепкого черного кофе, чтобы взбодриться. Любитель

кофе ориентируется на желаемое количество энергии для работы — это желаемая величина запаса. Задача такой системы доставки/потребления кофеина — поддерживать текущий запас энергии на желаемом уровне или близко к нему. Разность между текущим и желаемым



**Рис. 9. Запасы энергии в организме любителя кофе**

уровнем энергии и заставляет вас действовать, чтобы принять очередную порцию кофеина. (Кроме того, у вас могут быть и другие причины, чтобы пить кофе: может, вам просто нравится его вкус или доставляет удовольствие выпить кофейку в хорошей компании.)

Обратите внимание: все подписи на рис. 9, как и на других потоковых диаграммах в этой книге, не содержат в себе оценки «больше/меньше». «Запас энергии в организме» — это именно сама величина запаса, а не утверждение, что «энергии *слишком мало*». «Принятие кофе» не означает «выпить *больше* кофе». Подписи сформулированы именно так потому, что многие циклы обратной связи способны работать в обоих направлениях. В нашем примере с любителем кофе петля обратной связи может скорректировать как недостаточное потребление кофеина, так и избыточное. Если вы выпьете слишком много кофе, то ощутите переизбыток сил, они будут так и распирают вас, поэтому прием кофеина захочется на некоторое время прекратить. Избыток энергии тоже создает разницу между текущим и желаемым запасом энергии (ощущение «перебора»), поэтому вы воздержитесь от употребления кофе до тех пор, пока уровень энергии не уменьшится. Диаграмма показывает, что петля обратной связи может изменять уровень энергии в любую сторону — как увеличения, так и уменьшения.

Можно было бы показать входной поток энергии проистекающим из символа «облака», но вместо этого лучше чуть-чуть усложнить диаграмму. *Помните, все системные диаграммы — это упрощенные представления реального мира.* Мы сами выбираем масштабы этого упрощения. В данном случае лучше указать еще один запас — то количество энергии, что запасено в организме и может быть активировано с помощью кофеина. Это нужно для того, чтобы показать, что система — это не только петля обратной связи. Как известно всем любителям кофе, действие кофеина непродолжительно. Образно говоря, кофе может заставить мотор крутиться быстрее, но при этом запас топлива в баке не увеличивается. Довольно быстро стимулирующее действие кофе ослабевает, и организм в

результате испытывает еще больший дефицит энергии, чем до принятия кофеина. Появившаяся вновь разница между желаемым и имеющимся уровнем энергии заставит вас опять отправиться за кофейником. (Можете также посмотреть на систему, описывающую наркотическую зависимость, — она приводится дальше в этой книге.) Будет гораздо лучше, если вместо очередной чашки кофе вы прибегнете к какому-нибудь другому способу обрести энергию, более действенному и полезному для здоровья: пойдете поесть, отправитесь прогуляться, как следует выспитесь...

Петли обратной связи, стабилизирующие запас на ка-ком-то уровне, позволяющие его регулировать и достигать желаемого значения, называются балансирующими циклами обратной связи. Внутри такого цикла на диаграмме ставится буква «Б». Балансирующие циклы *стремятся к достижению какого-то значения, к стабилизации*. Каждый такой цикл старается удержать запас на каком-то уровне или в каких-то пределах. Балансирующий цикл противодействует любому внешнему воздействию на систему. Если запас слишком велик, балансирующий цикл постарается уменьшить его. Если запас слишком мал, балансирующий цикл будет стремиться увеличить его.

А вот еще один пример, в котором присутствует кофе, — только на этот раз речь пойдет не о принятии решения человеком, а о действии законов физики. Горячая кружка кофе постепенно остывает до комнатной температуры. Скорость остывания зависит от разности между температурой кофе и комнатной температурой. Чем больше разность, тем выше скорость остывания. Петля обратной связи работает и в другом направлении: если вы приготовите кофе со льдом в жаркий день, он будет нагреваться, пока его температура не сравняется с комнатной. Цель этой системы — привести к нулю разность между температурой кофе и температурой в помещении, и неважно, какой знак имеет эта разность.

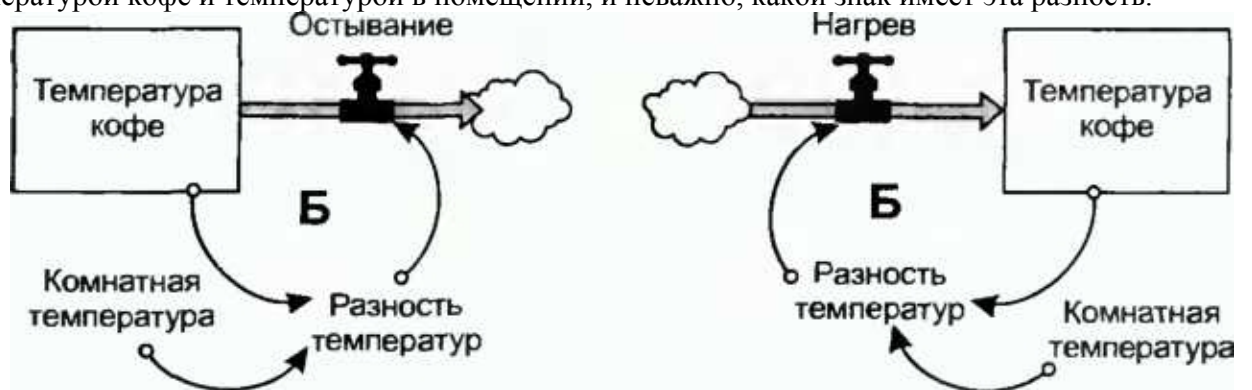
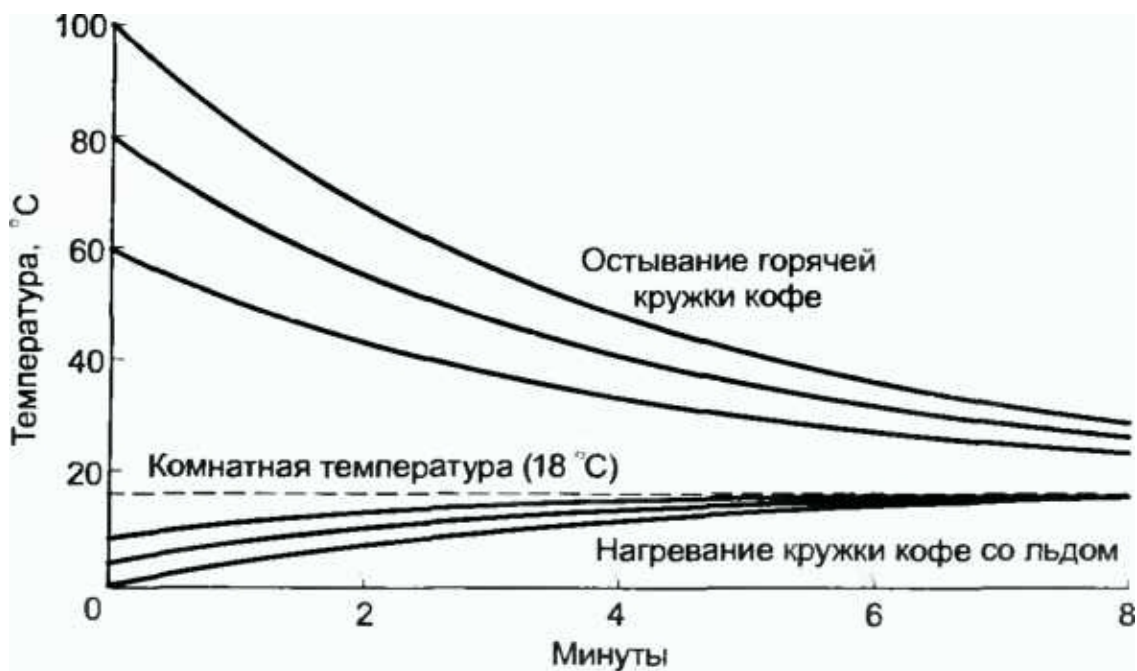


Рис. 10. Остывание (слева) и нагревание (справа) кружки с кофе

На рис. 11 показано, как меняется температура во времени, если кофе той или иной температуры приготовили, налили в кружку, но не стали пить. В примере рассматривается и горячий (даже почти кипящий) кофе, и кофе со льдом. Видно, как все кривые стремятся к одной и той же итоговой температуре — это и есть результат работы балансирующего цикла. Каким бы ни было начальное значение запаса в системе (в данном случае температура кофе), больше ли оно желаемого или меньше (выше или ниже температура, чем комнатная), балансирующий цикл обратной



**Рис. 11. Приближение температуры кофе к комнатной температуре**

связи приведет его к желаемому уровню. Скорость изменений в начале процесса выше, и она становится тем меньше, чем меньше разность между текущим и желаемым значением запаса.

**Балансирующие циклы обратной связи служат выравнивающими структурами в системе, позволяют достичь желаемого значения, выполняют функции одновременно источника стабильности и противодействия изменениям.**



Такой тип поведения — постепенное приближение к цели, определенной системой, — демонстрируется и во многих других случаях: радиоактивный распад, самонаведение ракет и снарядов, обесценивание активов, регулирование уровня воды в водохранилище, колебания уровня сахара в крови, торможение машины на запрещающий сигнал светофора... Вы сами можете придумать массу примеров. В мире присутствует огромное количество систем с балансирующими циклами обратной связи, которые стремятся достичь каких-то конкретных значений.

Присутствие в системе механизма обратной связи совсем не обязательно означает, что это механизм работает *эффективно*. Механизмы обратных связей могут быть недостаточно сильны для того, чтобы привести запас к желаемому уровню. Обратные связи — взаимные влияния, информационные составляющие системы — могут давать сбой по самым разным причинам. Информация может поступать слишком поздно или не туда, куда нужно. Она может быть неверно понята, может оказаться неполной, ее могут интерпретировать неправильно. Меры, принимаемые на основе этой информации, могут оказаться недостаточными и запоздалыми. Они могут ограничиваться имеющимися ресурсами или просто быть неэффективными. Вполне может статься, что цель цикла обратной связи — конкретное значение запаса — вообще никогда не будет

достигнута. Но в том, что касается кружки с кофе, можете быть уверены: ее температура в конце концов сравняется с комнатной.

## Петли, приводящие к выходу за пределы: усиливающий цикл обратной связи

Мне бы нужно отдохнуть, чтобы восстановить ясность мышления; но чтобы отдохнуть, нужно путешествовать, а чтобы путешествовать, надо иметь деньги, а чтобы иметь деньги, надо работать... Я попал в порочный круг... и вырваться из него невозможно.

*Оноре де Бальзак*<sup>12</sup>

Здесь мы сталкиваемся с очень важным явлением. Рассуждения словно замкнулись в круг: прибыли упали, потому что уменьшились капиталовложения, а капиталовложения уменьшились, потому что упали прибыли.

*Ян Тинберген*<sup>13</sup>, экономист

Второй тип циклов обратной связи — это петли, усиливающие сами себя, раскручивающие систему все сильнее, подобно тому, как растет снежный ком. Это порочный или добродетельный круг, который в итоге может либо вызвать разрушение системы, либо обеспечить здоровый рост. Такие петли называют усиливающими циклами обратной связи, и внутри диаграмм, описывающих такие системы,

ставится буква «У». Такие циклы создают тем больший входной поток, чем больше величина запаса (и тем меньший поток, чем меньше запас). Усиливающий цикл обратной связи придает системе дополнительное движение в том же направлении, что и внешнее воздействие — то есть усиливает его.

Например:

■ Всем знакома ситуация, когда дерутся дети: один толкнул другого, тот толкнул в ответ сильнее, поэтому первый толкнул еще сильнее, и т. д.

■ Чем выше цены, тем больше должна быть зарплата для поддержания прежнего уровня жизни. Чем больше зарплата, тем больше увеличиваются цены, чтобы обеспечить прибыльность, необходимую для выплаты зарплат. Раз цены опять выросли, приходится снова поднимать зарплаты, что приводит к дальнейшему росту цен.

■ Чем больше кроликов на ферме, тем больше родится крольчат. Чем больше крольчат, тем больше из них вырастет кроликов, которые произведут на свет еще больше крольчат.

■ Чем больше почва подвергается эрозии, тем меньше растений произрастает на ней и тем меньше становится корней, закрепляющих почву, поэтому почва разрушается еще сильнее, и на ней остается еще меньше растений.

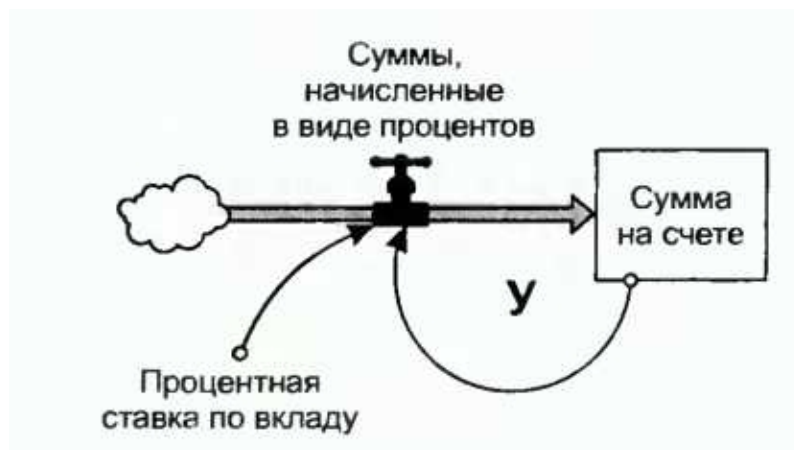
■ Чем больше часов я упражняюсь за роялем, тем большее наслаждение мне доставляют звуки, поэтому я еще больше времени посвящаю занятиям музыкой, и тем лучше играю.

Усиливающие циклы появляются в системах всякий раз, когда встречается какой-либо элемент, способный воспроизводить сам себя или какую-то свою часть. В число та-

---

<sup>12</sup> Оноре де Бальзак, цитируется по книге: *George P. Richardson. Feedback Thought in Social Science and Systems Theory. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1991. 54.*

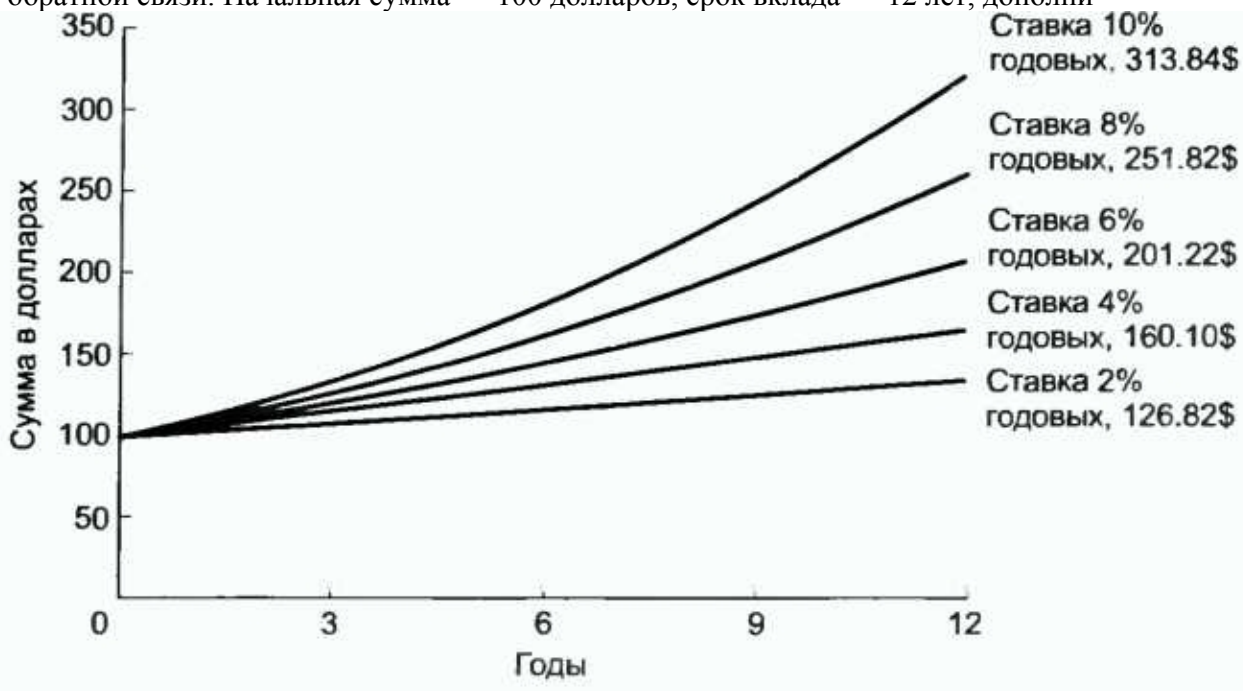
<sup>13</sup> Jan Tinbergen, цитируется по книге: *George P. Richardson. Feedback Thought in Social Science and Systems Theory. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1991. 44.*



**Рис. 12. Начисление процентов по накопительному вкладу в банке**

ких элементов входят численность населения и величина капитала в экономике. Вспомните пример с накопительным вкладом в банке. Чем больше денег у вас на счете, тем больше денег вам начисляется в виде процентов. Они приплюсовываются к сумме на счете, и в следующий раз доходы будут еще выше.

На рис. 13 показано, как растет сумма на счете в результате работы усиливающего цикла обратной связи. Начальная сумма — 100 долларов, срок вклада — 12 лет, дополни-



**Рис. 13. Рост суммы на счете в зависимости от величины процентной ставки**

тельные взносы не производятся, начисляемые проценты приплюсовываются к сумме вклада (капитализируются). Пять кривых соответствуют пяти различным процентным ставкам по вкладу: от 2 до 10% годовых.

Это не простой линейный рост. Величина прироста не постоянна, а изменяется с течением времени. График увеличения суммы на счете может показаться прямой линией, если процентная ставка мала, но только в первые несколько лет. С годами рост будет идти все быстрее и быстрее — чем больше на счете, тем больше добавится. Такой тип роста называется экспоненциальным. Вреден он или полезен — зависит от того, что именно

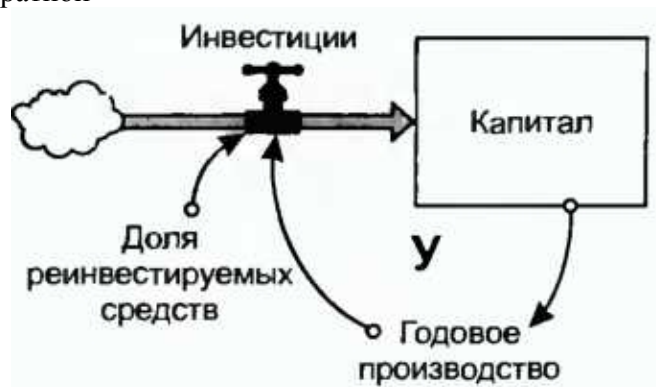
увеличивается: накопления в банке, количество больных СПИДом или носителей ВИЧ, популяция саранчи в поле, благосостояние населения или количество оружия в результате гонки вооружений.

На рис. 14 описано поведение тяжелой промышленности: чем больше у вас оборудования и заводов (вместе называемых «промышленным капиталом»), тем больше продукции и услуг вы можете произвести (объем производства за год). Чем больше объем производства, тем больше можно инвестировать в производство нового оборудования и заводов. Чем больше вы производите, тем больше можете вложить, чтобы произвести еще больше. Усиливающий цикл обратной связи — основная движущая сила, отвечающая за рост экономики.



**Усиливающие циклы обратной связи раскручивают сами себя, приводя к экспоненциальному росту или даже выходу системы за пределы.** Они встречаются в системах всякий раз, когда какой-либо запас обладает способностью воспроизводить себя или какую-то свою часть.

Теперь вы уже можете себе представить, какое значение имеют балансирующие и усиливающие циклы обратной



**Рис. 14. Реинвестирование капитала**

связи, ответственные за поведение систем. Иногда я предлагаю своим студентам вообразить, как люди принимали бы решения, не будь обратных связей. Какими были бы эти решения, если они вообще никак не соотносились с величиной запаса? Задумайтесь над этим. Чем больше вы будете размышлять на эту тему, тем больше циклов обратной связи вы обнаружите — они повсюду.

В качестве примера решений, не основанных на обратной связи, студенты чаще всего приводят влюбленность и попытки самоубийства. Предоставлю вам самим решить, действительно ли подобные решения принимаются без влияния обратных связей.

#### **Несколько слов об усиливающих циклах и времени удвоения**

Усиливающие обратные связи встречаются очень часто, поэтому полезно знать одну их характерную особенность: время удвоения — время, необходимое экспоненциальному росту для того, чтобы удвоить величину запаса, — приблизительно равно отношению 70 к скорости роста, выраженной в процентах.

*Пример:* если вы положили в банк 100 долларов под 7% годовых, то сумма увеличится вдвое через 10 лет ( $70:7 = 10$ ). Если банковская ставка всего 5%, то для удвоения суммы на счете потребуются 14 лет.

Будьте начеку! Если вы начнете везде замечать действие обратных связей, значит, вы



превращаетесь в системного мыслителя. Вместо того, чтобы замечать, только как А вызывает Б, вы начнете задумываться, а нет ли еще и влияния Б на А, и не усиливает ли (или ослабляет) А самое себя. И когда по радио передадут, что Федеральный резервный банк принимает какие-то меры, чтобы регулировать экономику, вы сразу сделаете вывод, что и экономика как-то повлияла на Федеральный резервный банк. И когда кто-то скажет вам, что рост населения вызывает распространение нищеты, вы зададитесь вопросом «Не может ли нищета приводить к росту численности населения?»

### Поразмыслите над этим

Если А служит причиной Б, возможно ли, что и Б, в свою очередь, тоже вызывает А?

Теперь вы будете представлять себе мир не как статичную структуру, а как динамическую, подверженную изменениям систему. Вместо того, чтобы искать виноватых, вы спросите себя: «Какова эта система?» Понятие обратной связи приводит нас к осознанию того, что система может быть причиной своего собственного поведения.

До сего момента мы рассматривали только простые системы с одним-единственным циклом обратной связи. Разумеется, в реальных системах обратные связи крайне редко встречаются поодиночке. Они связаны друг с другом и иногда составляют невообразимо сложную сеть. Один запас или уровень может участвовать в нескольких усиливающих и балансирующих циклах обратной связи, действующих в разных направлениях и с разной силой. На один поток могут влиять три, пять, да хоть двадцать запасов! При этом один запас может увеличиваться, другой истощаться, и в результате это приводит к изменению третьего. Разные обратные связи могут тянуть систему в разных на-

правлениях, бороться друг с другом, пытаться увеличивать запасы или сводить их к нулю. Обратные связи могут и уравнивать друг друга. Сложные системы в итоге демонстрируют гораздо больше вариантов поведения, чем экспоненциальный рост, постепенное приближение к какому-то значению или статичное состояние. Что это за варианты, вы увидите в следующей главе.

2

## ГЛАВА

### Краткий обзор систем разных типов (экскурсия в «системный зоопарк»)

**Основная задача любой теории... — сделать так, чтобы базовые элементы были максимально просты и так малочисленны, как только возможно без ущерба для адекватного представления... о том, что мы наблюдаем на практике.**

*Альберт Эйнштейн\**

Один из лучших способов учиться чему-то новому — изучать конкретные примеры, а не только общие положения и абстрактные зависимости. Это касается и поведения систем: существует несколько часто встречающихся, простых, но очень важных типов систем, и если в них как следует разобраться, то станут понятны основные принципы поведения и более сложных систем.

В изучении типовых систем есть свои плюсы и минусы, причем точно такие же плюсы и минусы свойственны любому зоопарку\*\*. С одной стороны, вы получаете представление о том, что в мире существует большое разнообразие

\*к

*Albert Einstein. On the Method of Theoretical Physics* — лекция имени Герберта Спенсера. Прочитана в Оксфорде 10 июня 1933 г. и опубликована в журнале *Philosophy of Science*. 1. no. 2(April 1934). 163-69.

Название «системный зоопарк» впервые использовал профессор Харт-мут Боссел из университета Касселя в Германии. Недавно была издана

систем; с другой стороны, то, что вы можете непосредственно наблюдать, лишь малая тшшка общего разнообразия. В зоопарке животные размещены по зоологическим семействам: обезьяны здесь, медведи там. Прямо как у нас: системы с одним запасом здесь, с двумя запасами там. Вы можете понаблюдать поведение обезьян и сравнить его с поведением медведей. Однако обстановка в зоопарке далека от естественной — образно говоря, она слишком стерильна. Чтобы посетителям было удобно наблюдать, одних животных отделяют от других и помещают в среду, которая далека от природной, зато позволяет зрителям больше увидеть. Животные, в зоопарке сидящие по разным клеткам, в естественной среде обычно перемешаны и образуют сложные экосистемы. Так и типовые системы, описанные в этой книге, в реальной жизни обычно перемешаны друг с другом и взаимодействуют между собой и с теми системами, про которые здесь вообще нет ни слова. Наша реальная жизнь — это настоящая мешанина систем, безостановочно бурлящая и очень сложная.

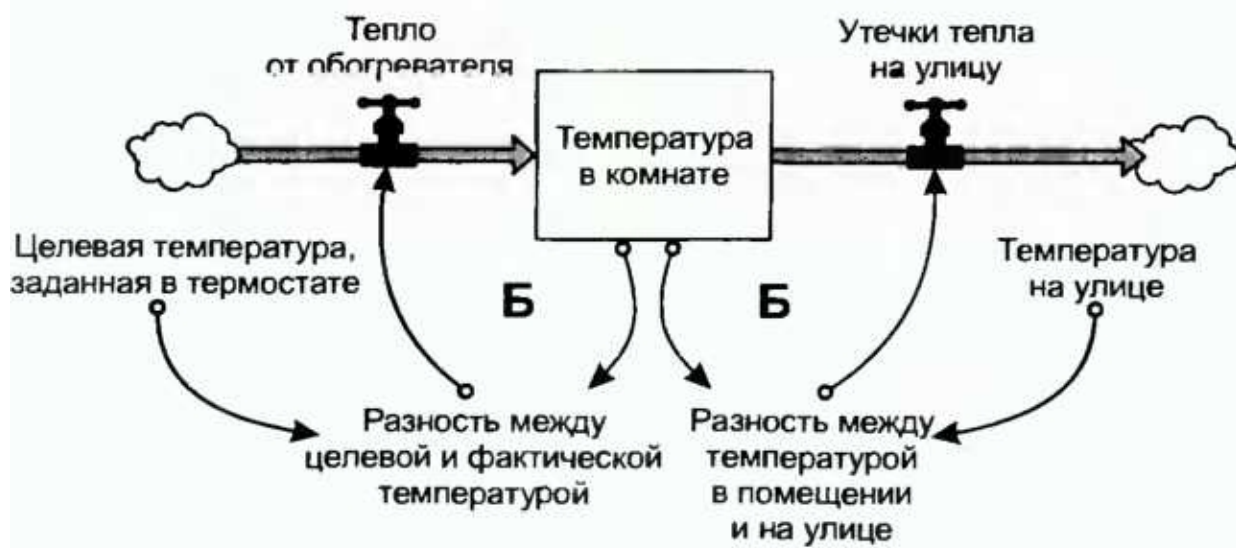
К экосистемам мы еще вернемся, а пока изучим по отдельности несколько типичных «системных животных» в нашем зоопарке.

### Системы с одним запасом

**Запас и два балансирующих цикла обратной связи (циклы конкурируют между собой) — так работают обогреватели с термостатом**

В примере с кружкой кофе мы увидели поведение системы, которая управляется одним балансирующим циклом об-

в трех томах его книга о «системном зоопарке», в которой приведены описания и результаты имитационного моделирования для более чем ста «системных животных». Некоторые из них в слегка измененном виде приводятся в данной книге. *Hartmut Bossel. System Zoo Simulation Models. Vol. 1: Elementary Systems, Physics, Engineering; Vol. 2: Climate, Ecosystems, Resources; Vol. 3: Economy, Society, Development. Norderstedt, Germany: Books on Demand, 2007.*



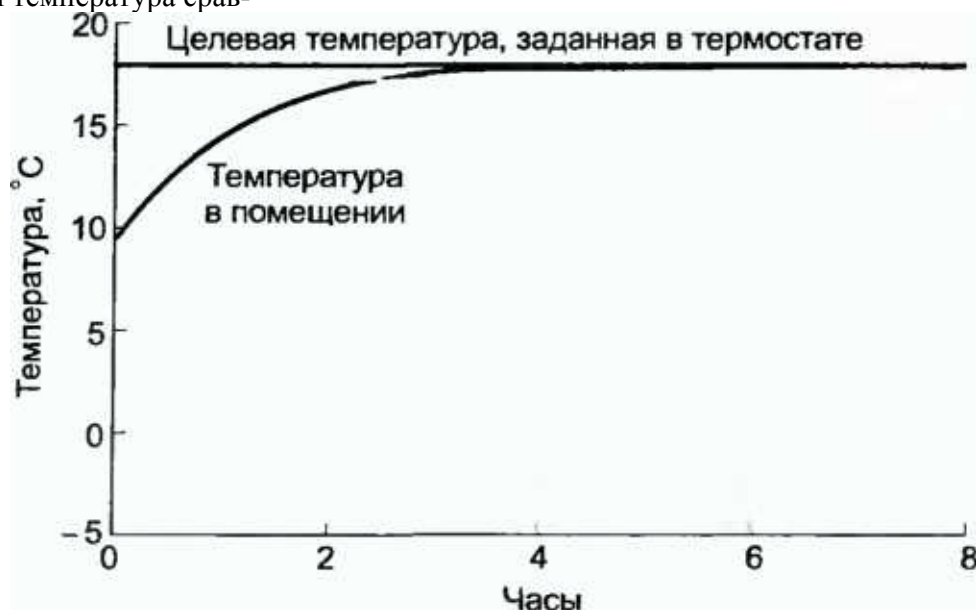
**Рис. 15. Температура в помещении регулируется обогревателем с термостатом**

ратной связи, а он стремится сравнить температуру кофе с комнатной. Что же произойдет, если в системе будет два таких цикла, изменяющих величину запаса в разных направлениях?

Классический пример такой системы — работа комнатного обогревателя с термостатом. Он регулирует температуру в помещении, при необходимости включаясь и

нагревая воздух. Как и все модели, представление термостата на рис. 15 сильно упрощено — реальные системы контроля температуры в помещениях могут быть гораздо сложнее.

Если температура в помещении падает ниже целевой температуры, заданной в термостате обогревателя, датчик улавливает разницу и подает сигнал включить нагревательный элемент, чтобы нагреть воздух в комнате. Когда температура в помещении достигает желаемого значения, термостат выключает нагревательный элемент. Это простой балансирующий цикл обратной связи, направленный на поддержание конкретного значения запаса; на схеме он показан слева. Если бы в системе не было никаких других составляющих, то ее поведение выглядело бы так, как показано на рис. 16: холодная комната, термостат установлен на 18 °С, обогреватель начинает греть воздух, температура поднимается. Когда фактическая температура срав-



**Рис. 16.** Холодная комната прогревается до температуры, установленной в термостате

няется с целевой, заданной в термостате, нагревательный элемент отключится, температура перестанет меняться и останется равной целевой.

Однако в системе этот цикл не единственный. Часть тепла уходит из помещения на улицу в виде потерь. Утечки тепла описываются вторым балансирующим циклом обратной связи, показанным на рис. 15 справа. Он неустанно пытается сравнить температуру внутри помещения с уличной — точно так же, как было с остывающей кружкой кофе. Если бы в системе был только этот цикл (то есть если бы не было обогревателя), тогда температура в комнате менялась бы так, как показано на рис. 17 — становилась бы все ниже и ниже, пока в итоге не сравнялась бы с уличной.

Комната не может быть идеально заизолирована, поэтому, если снаружи холодно, то утечки тепла из нагретой комнаты на улицу неизбежны. Но чем лучше теплоизоляция, тем меньше эти утечки, и тем медленнее будет понижаться температура.

А теперь вопрос: что будет происходить, если оба цикла в системе работают одновременно? Допустим, что теплоизоляция комнаты выполнена достаточно хорошо, а обогреватель имеет достаточную мощность. Тогда цикл, отве-



**Рис. 17.** Теплая комната постепенно остывает, пока температура в ней не достигнет 10 °C, как на улице

чающий за нагрев, будет сильнее, чем цикл, отвечающий за остывание. Вам удастся нагреть помещение, даже если поначалу было холодно и снаружи, и внутри. Температура будет меняться так, как показано на рис. 18.

Чем выше становится температура в комнате, тем больше будут утечки тепла на улицу, поскольку разность меж-



**Рис. 18.** Обогреватель поднимает температуру в помещении, несмотря на утечки тепла из комнаты на улицу

ду температурой внутри и снаружи растёт. Обогреватель продолжает работать, подавая тепла больше, чем уходит в виде утечек, температура будет расти и дальше, просто несколько медленнее, но в итоге все-таки достигнет значения, близкого к тому, что установлено в термостате. Затем обогреватель отключится, а после этого будет время от времени включаться снова, компенсируя потери тепла.

В нашем примере в термостате установлено целевое значение 18 °С, но реальная температура в комнате установится на уровне немного ниже 18 °С из-за утечек, которые не прекращаются ни на минуту. Так ведут себя все системы с соперничающими балансирующими циклами обратной связи, хотя иногда их поведение может показаться неожиданным. Образно говоря, система пытается наполнить доверху ведро с дырявым дном. Мало того, что ведро протекает, так еще и количество вытекающей жидкости управляется циклом обратной связи: чем больше воды в ведре, тем выше давление и тем быстрее вода утекает. В примере с комнатой мы пытаемся поднять температуру в помещении, чтобы внутри стало теплее, чем снаружи. Но чем теплее в комнате, тем больше утечки тепла на улицу. Обогревателю нужно время, чтобы после включения компенсировать эти потери, но в это время тепло все равно продолжает теряться. В доме с хорошей теплоизоляцией утечки тепла меньше, поэтому обстановка там комфортнее, чем в плохо заизолированном доме, даже если поставить в нем мощную печь.

С домашними обогревателями люди научились управляться, устанавливая в термостате температуру чуть выше, чем та, которой они на самом деле хотят добиться. *Насколько* выше — это уже другой вопрос, тут не все очевидно, ведь в холодный день утечки тепла на улицу больше, чем при хорошей погоде. Но обычно все-таки удается подобрать нужные настройки и обеспечить себе комфортную обстановку.

В других системах с такими же разнонаправленными циклами балансирующих связей подобное изменение запаса может сильно осложнить все попытки взять ситуацию под контроль. Представьте себе, что вам необходимо поддерживать определенный запас товаров на складе при магазине. Допустим, какое-то наименование почти распродано. Заказ новой партии требует некоторого времени, но ведь во время ожидания продажи будут продолжаться. Если вы не будете учитывать, сколько товара будет продано за время ожидания новой партии, ваш склад постоянно будет испытывать нехватку продукции. Точно такие же сложности возникнут при попытке постоянно иметь определенный запас наличных денег, удерживать уровень воды в водохранилище на какой-то отметке, поддерживать определенную концентрацию вещества, участвующего в непрерывной химической реакции...

Все эти примеры роднит один общий принцип, и еще один относится к системам с термостатом. Он формулируется так: информация, получаемая за счет обратной связи, может повлиять только на будущее, предстоящее поведение; внутри системы информация распространяется с запаздыванием, и воздействие не может быть настолько быстрым, чтобы моментально скорректировать поведение, вызвавшее текущую обратную связь. Лицо, принимающее решение на основе обратной связи, не может изменить текущее поведение системы, вызвавшее эту обратную связь; все принимаемые решения повлияют только на ее поведение в будущем.



**Информация, которую передает цикл обратной связи (даже если эта связь не носит физического, вещественного характера), может повлиять только на будущее поведение системы. Сигнал невозможно доставить настолько быстро, чтобы это позволило скорректировать поведение, вызывающее текущую обратную связь. Даже если информация имеет абстрактный характер, она передается в системе с определенным/ запаздыванием.**

Почему это так важно? Потому, что отклик всегда будет поступать с запаздыванием. Ни один поток не может повлиять на другой поток во мгновение ока. Влияние возможно только опосредованно, через изменение запаса, и только после некоторой задержки в принятии поступающей информации. В ситуации с наполнением ванны на то, чтобы оценить уровень воды и решить, как подрегулировать краны, уходит доля секунды. Во многие экономические модели заложена большая ошибка, поскольку их разработчики полагают, что потребление

или производство могут дать мгновенный отклик, к примеру, на изменение цены. Это одна из причин, по которой реальные экономические системы ведут себя не совсем так, как предсказывают модели.

Принцип, который относится к системам с термостатом (вы могли бы и сами сформулировать его на основе нашего несложного примера), заключается в том, что вы всегда должны учитывать утечки, непрерывно происходящие в том или ином направлении. Если вы не будете брать их в расчет, вы никогда не достигнете желаемого значения запаса. Если в помещении надо обеспечить температуру в  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то в термостате нужно установить значение немножко выше, чем желаемое. Если вы хотите полностью погасить кредит (или страна хочет рассчитаться с долгами), то платежи надо увеличить настолько, чтобы покрыть те проценты, что будут начислены за время прохождения платежа. Если вам надо увеличить штат сотрудников,

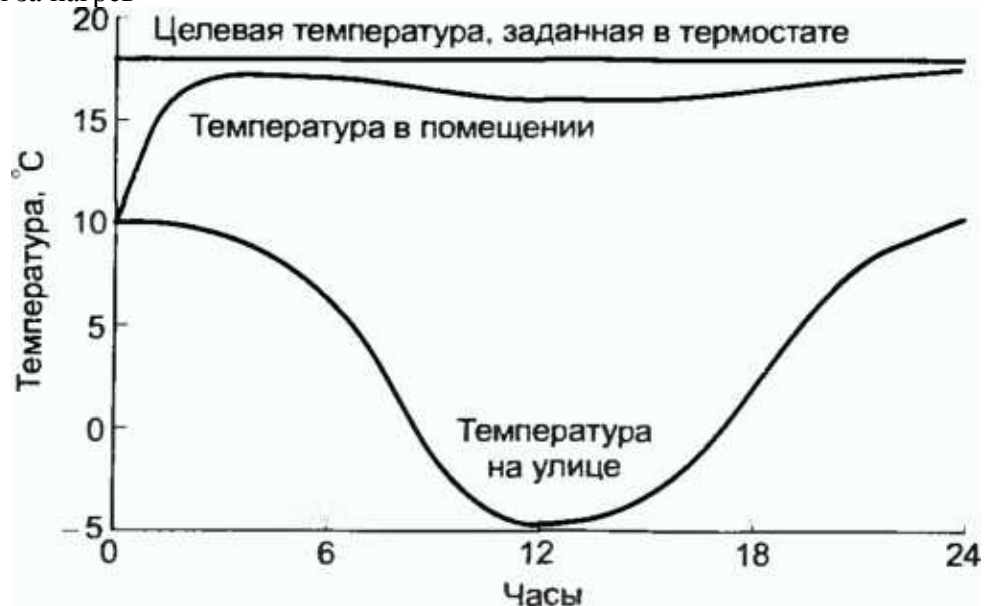


**В балансирующий цикл обратной связи, направленный на поддержание запаса неизменным, нужно вносить поправку на то, чтобы компенсировать влияющие на него же постоянные утечки, в каком бы направлении они ни происходили. Без такой поправки система промахнется мимо желаемого значения, и запас достигнет либо меньшей, либо большей величины.**

то придется проводить наем быстрее, чем обычно, чтобы компенсировать уход тех сотрудников, кто уволится, пока вы нанимаете новых служащих. Другими словами, сложившееся у вас представление о системе — мысленная модель — должна включать все важные потоки. В противном случае поведение системы вас сильно удивит.

Прежде чем мы закончим изучение системы с термостатом, нужно проанализировать, как будет меняться поведение в зависимости от изменения температуры на улице. На рис. 19 показан характерный график изменений за сутки для нормально работающей системы с термостатом в условиях, когда ночью сильно холодает и температура падает ниже нуля.

У любого балансирующего цикла обратной связи есть некая переломная точка, после которой другим циклам, влияющим на запас, удастся пересилить первый цикл и увести величину запаса в сторону от желаемого значения. В нашей системе с термостатом такое может произойти в том случае, если увеличатся утечки (на улице холоднее или теплоизоляция дома хуже) или обогреватель будет менее мощным — то есть либо цикл, отвечающий за нагрев

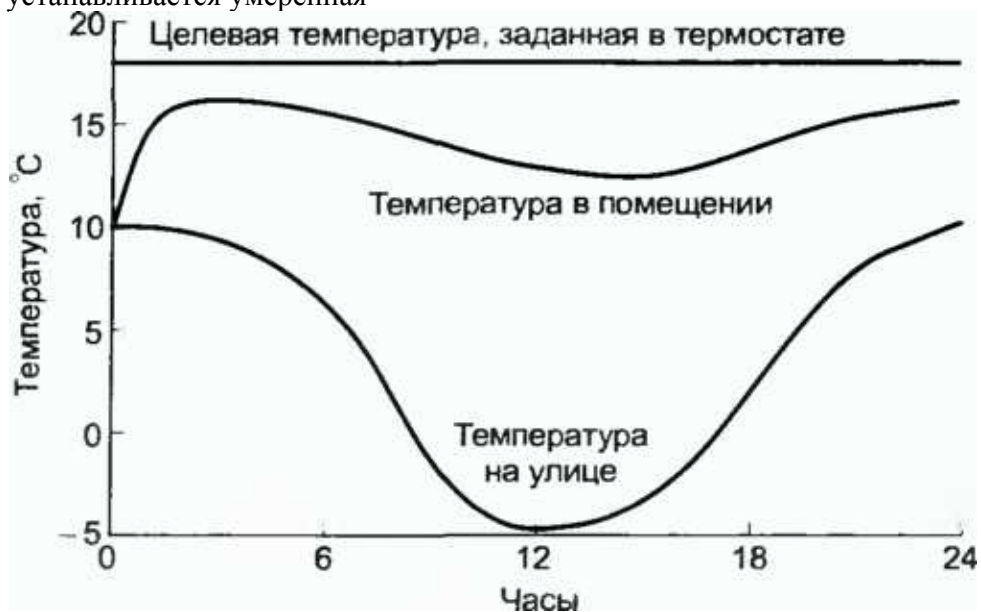


**Рис. 19. Обогреватель поднимает температуру в холодной комнате, несмотря на то что постоянно происходит утечка тепла из помещения на улицу, где ночью температура существенно ниже нуля**

воздуха в помещении, станет слабее, либо цикл, описывающий утечки тепла наружу, станет сильнее. На рис. 20 показано, что происходит в системе, если на улице температура точно такая же, как на рис. 19, а тепло теряется быстрее. В этом случае обогреватель не сможет справиться с утечками тепла. Цикл, стремящийся сравнять температуру в помещении с уличной, станет в системе доминирующим, и в комнате тогда будет очень неуютно.

Обратите внимание: изменение во времени переменных, изображенных на рис. 20, происходит с определенной взаимной зависимостью. Сначала и на улице, и в комнате одинаково холодно. Поток тепла от обогревателя больше, чем потери тепла из-за утечек, поэтому в помещении становится теплее. В течение одного-двух часов температура на улице еще довольно умеренная, обогревателю удастся компенсировать потери почти полностью, и температура в комнате держится близко к желаемому значению.

Однако затем на улице холодает, утечки становятся сильнее, и обогреватель уже не в состоянии компенсировать все потери. Температура в помещении снижается. Когда к утру на улице снова устанавливается умеренная



**Рис. 20. В холодный день обогреватель не справится со своей задачей, тепло будет улетучиваться из всех щелей**

температура, потери тепла уменьшаются, и обогревателю, который на самом деле все это время работал на полную мощность, удастся понемногу поднимать температуру и нагревать комнату.

Изменения происходят по тому же сценарию, что и наполнение ванны: всякий раз, когда обогреватель дает больше тепла, чем теряется из-за утечек, температура в помещении растет. Верно и обратное: всякий раз, когда входящий поток становится меньше выходящего, температура снижается. Если вы потратите некоторое время на изучение изменений в системе по этим графикам и соотнесете их с потоковой диаграммой, у вас сложится довольно полное представление о структурных связях в этой системе и о том, как два цикла обратной связи меряются силами и тем самым вызывают изменение поведения во времени.

**Запас, один усиливающий цикл и один балансирующий цикл обратной связи — так**

## изменяются численность населения и величина промышленного капитала

Что будет происходить, если в системе на один и тот же запас влияют усиливающий и балансирующий циклы обратной связи? Это одна из самых важных структур, она часто встречается в реальной жизни. Помимо всего прочего, именно она описывает изменение численности населения и величины капитала в экономике.

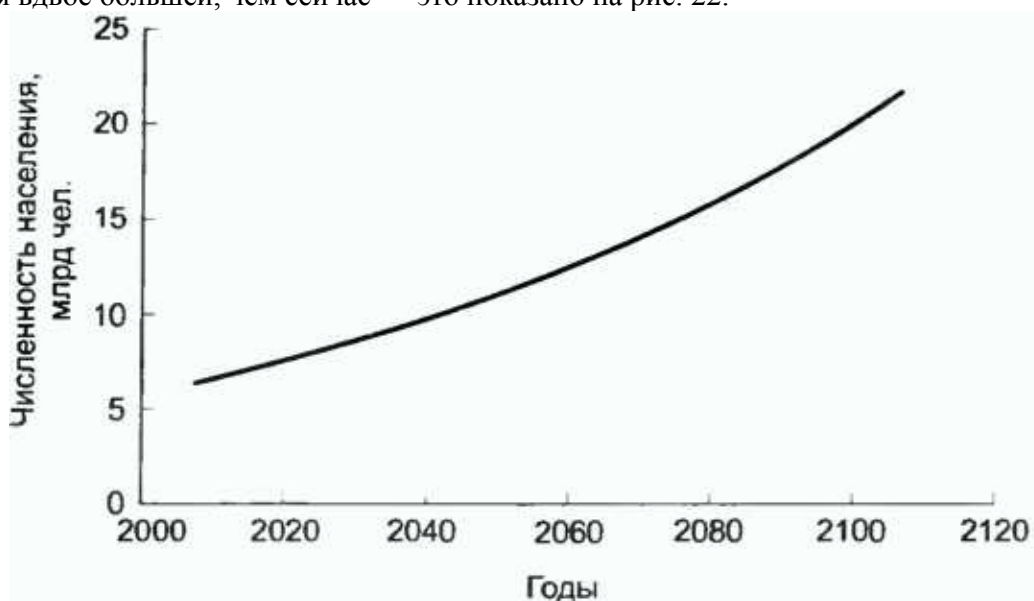
Численность населения определяется усиливающим циклом, который описывает ее рост за счет рождаемости, и балансирующим циклом, который описывает ее уменьшение из-за смертности.

Если рождаемость и смертность постоянны (а в реальном мире так бывает редко), то поведение системы описать довольно просто. Население экспоненциально растет или же уменьшается, в зависимости от того, какая петля обратной связи сильнее: усиливающий цикл, ответственный за рождаемость, или балансирующий цикл, описывающий смертность.



**Рис. 21. Численность населения зависит от усиливающего цикла, описывающего рождаемость, и балансирующего цикла, описывающего смертность**

Например, в 2007 г. численность населения в мире составила 6,6 млрд человек, при этом коэффициент рождаемости обеспечивал примерно 21 рождение на тысячу человек в год (составлял 21 чел./тыс. в год). Коэффициент смертности составлял 9 чел./тыс. в год. Рождаемость была существенно выше смертности, и усиливающий цикл в системе был доминирующим. Если коэффициенты рождаемости и смертности останутся такими же, то ребенок, родившийся в 2007 г., к шестидесяти годам будет жить в мире с численностью населения вдвое большей, чем сейчас — это показано на рис. 22.

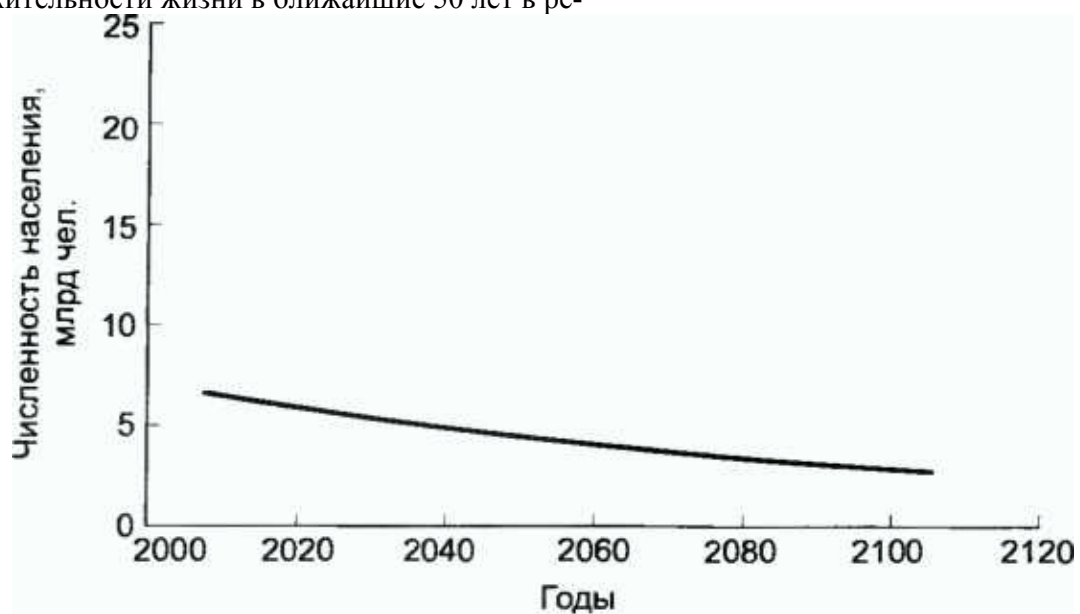




**Рис. 22. Рост численности населения, если коэффициенты рождаемости и смертности останутся такими же, как в 2007 г. (21 чел./тыс. в год и 9 чел./тыс. в год соответственно)**

Если в результате какой-нибудь страшной эпидемии коэффициент смертности резко увеличится, например, до 30 чел./тыс., а коэффициент рождаемости останется прежним, в системе будет доминирующим уже другой цикл — описывающий смертность. В мире ежегодно будет умирать больше людей, чем рождается детей, и численность населения будет постепенно уменьшаться — это показано на рис. 23.

Поведение системы становится более интересным, если коэффициенты рождаемости и смертности со временем меняются. Когда ООН делала долговременные прогнозы изменения численности населения, предполагалось, что по мере промышленного развития стран средний коэффициент рождаемости будет уменьшаться (приближаясь к уровню воспроизводства, когда на одну женщину в среднем приходится 1,85 ребенка). До недавнего времени предполагалось, что коэффициент смертности тоже будет снижаться, однако медленнее, поскольку он и так невелик в большинстве стран мира. Однако из-за эпидемии ВИЧ/СПИДа теперь ООН выдвигает предположение о том, что рост ожидаемой продолжительности жизни в ближайшие 50 лет в ре-



**Рис. 23. Уменьшение численности населения, если коэффициент рождаемости останется таким же, как в 2007 г. (21 чел./тыс. в год), а коэффициент смертности резко возрастет (до 30 чел./тыс. в год)**

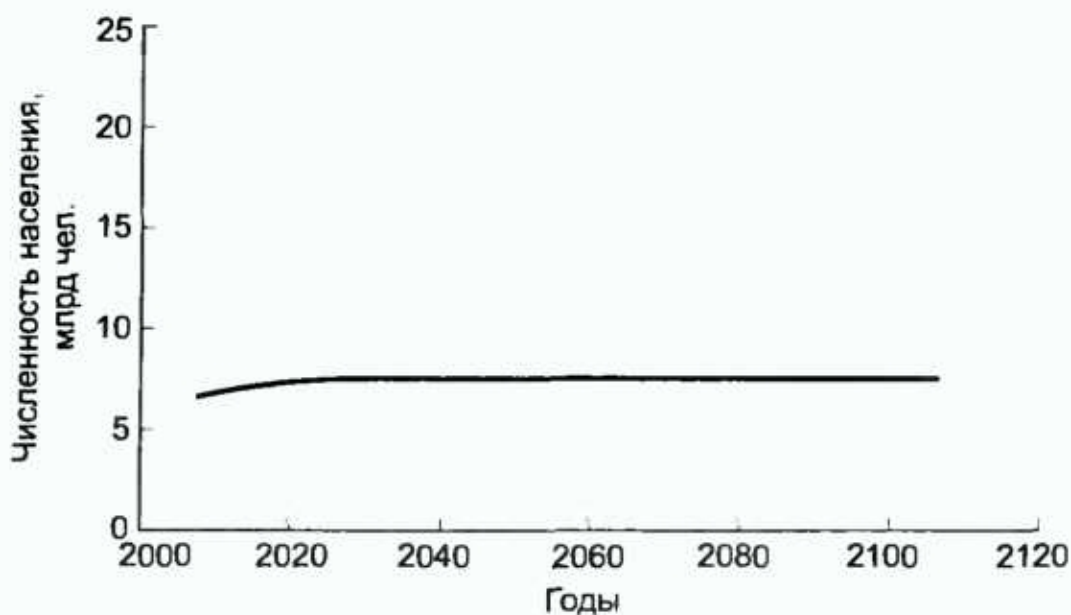
гионах, где распространены ВИЧ и СПИД, будет гораздо медленнее, чем оценивалось раньше.

Изменение потоков (рождаемость и смертность) вызывает изменение во времени величины запаса (численность населения), и график меняется. Если, к примеру, к 2035 г. рождаемость в мире снизится и сравняется со смертностью, и после этого соответствующие коэффициенты останутся неизменными, то численность населения стабилизируется (это показано на рис. 24). Рождение детей будет точно восполнять естественную убыль населения, установится динамическое равновесие.

Такое изменение в поведении называется обратимым доминированием циклов обратной связи. Доминирование — очень важное понятие в системном мышлении. Если один цикл доминирует над другим, он в большей степени определяет поведение системы. В системах зачастую бывает несколько конкурирующих петель обратной связи, работающих

одновременно, но именно доминирующий цикл определяет поведение системы.

В нашем примере поначалу коэффициент рождаемости был больше коэффициента смертности, и доминировал



**Рис. 24. Если рождаемость сравнивается со смертностью, численность населения стабилизируется**

усиливающий цикл, ответственный за рост численности населения. В результате система демонстрировала экспоненциальный рост. Однако по мере того, как уменьшался коэффициент рождаемости, этот цикл постепенно становился слабее. Под конец он сравнялся по мощности с балансирующим циклом, отвечающим за смертность, и тогда установилось динамическое равновесие. При равновесии ни один из циклов не является доминирующим.

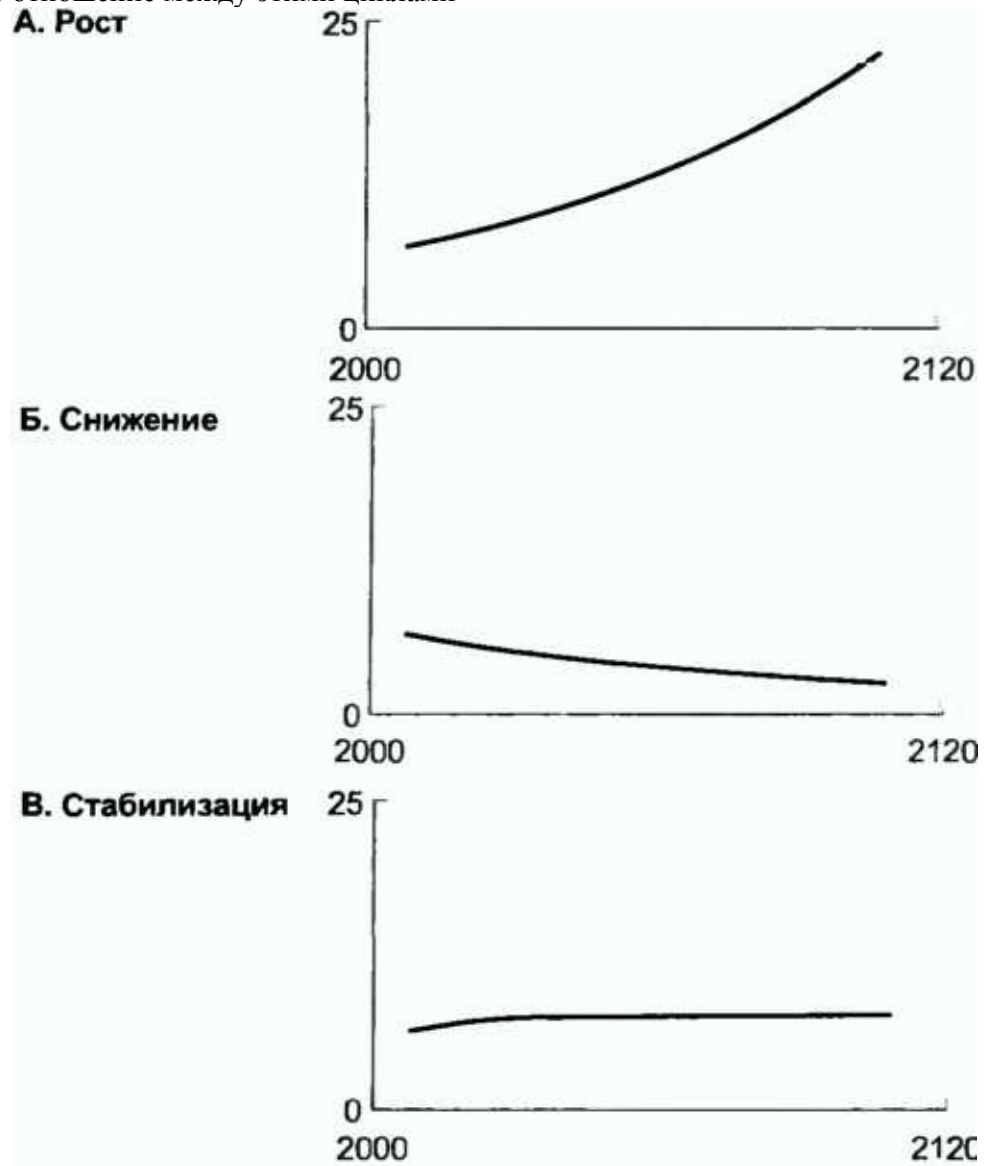
Обратимое доминирование присутствовало и в системе с термостатом: когда температура на улице существенно понижалась, утечки тепла в доме с плохо выполненной теплоизоляцией настолько усиливались, что обогреватель уже не справлялся с ними, поэтому в комнате становилось ощутимо холоднее. Если раньше доминировал цикл, отвечающий за нагрев, то потом основное воздействие на систему оказывал цикл охлаждения.



**Сложное поведение систем часто объясняется переходом доминирования от одного цикла обратной связи к другому. В этом случае в разные моменты времени поведение системы определяют разные петли обратной связи.**

Система, запасом в которой выступает численность населения, может вести себя ограниченным числом способов в зависимости от того, как меняются переменные, определяющие, кто «захватит управление» системой, — то есть коэффициенты рождаемости и смертности. В простой системе с одним усиливающим и одним балансирующим циклом таких ключевых переменных очень мало. Запас, управляемый усиливающим и балансирующим циклами, будет экспоненциально расти, если доминирует усиливающий цикл; будет постепенно снижаться, если доминирует балансирующий цикл; и не будет меняться, если циклы окажутся одинаковой мощностью (все эти варианты показаны на рис.

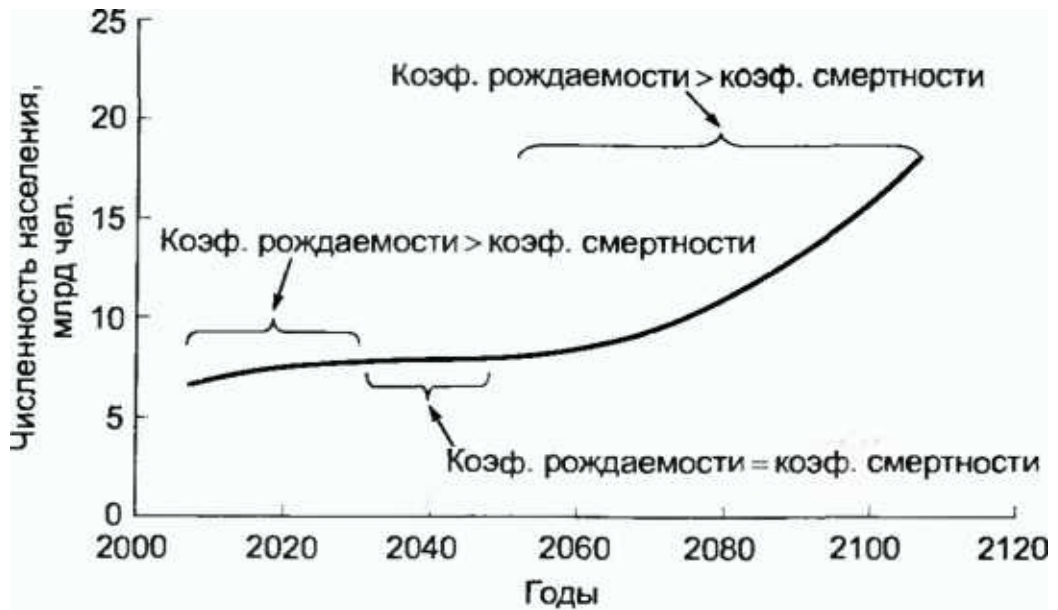
25). Если же отношение между этими циклами



**Рис. 25. Три возможных варианта изменения численности населения: рост, постепенное снижение или стабилизация на каком-то уровне**

меняется во времени, то система будет демонстрировать то первый, то второй, то третий вариант поведения (это иллюстрирует рис. 26).

Выбранные сценарии поведения системы — если речь идет о численности населения — можно назвать провокационными, но зато они прекрасно иллюстрируют особенности моделей и показывают, каким в принципе может быть развитие событий. Всякий раз, когда вы имеете дело



**Рис. 26. Обратимое доминирование циклов рождаемости и смертности**

со сценариями (а ведь экономические прогнозы, такие как бюджет компании на будущий год, прогноз биржевого маклера — это все сценарии, равно как и прогнозы погоды, и предсказание изменения климата...), вопрос в том, насколько точно модель описывает реальную систему.

■ Могут ли движущие силы изменяться таким образом? (Как обычно изменяются коэффициенты рождаемости и смертности и как они в принципе могут изменяться?)

■ Если могут, то будет ли система реагировать именно так? (Действительно ли рождаемость и смертность изменяют запас — численность населения — так, как мы привыкли считать?)

■ Что управляет движущими силами? (Что влияет на коэффициент рождаемости? На коэффициент смертности?)

На первый из приведенных вопросов ответить с точностью нельзя. Можно лишь предположить, что будет в будущем, а такие предположения в принципе не могут быть точными. Даже если вы интуитивно или на основе опыта

в чем-то уверены, невозможно доказать (или опровергнуть) вашу правоту до тех пор, пока будущее не наступит. Системный анализ позволяет проверить ряд возможных сценариев, чтобы посмотреть, какими могут быть последствия при том или ином изменении движущих сил. В этом состоит одна из целей системного анализа. Но определить, насколько правдоподобен тот или иной сценарий, способен ли он воплотиться в жизнь, можете только вы сами.

Системно-динамический анализ не предназначен для того, чтобы *предсказывать*, что произойдет. Он позволяет выяснить, что *может произойти*, если те или иные движущие силы поведут себя так или иначе.



**Системно-динамические модели рассматривают возможные сценарии будущего поведения и отвечают на вопрос «Что, если...?».**

Второй вопрос — будет ли система в действительности вести себя таким образом? — требует научного подхода, чтобы оценить, насколько адекватна модель, насколько точно она имитирует поведение реальной системы. Независимо от того, как вы себе представляете

будущее изменение движущих сил, *будет ли система вести себя соответственно их изменениям?*

В сценарии изменения численности населения, показанном на рис. 26, ответ на этот вопрос будет «В целом, да», потому что если рождаемость и смертность будут находиться именно в таком соотношении, как показано на графике, то численность населения будет расти или уменьшаться в соответствии с их изменениями. Модель изменения численности населения, приведенная в нашем примере, очень проста. В более сложных моделях, к примеру, есть деление на возрастные группы. Однако в общем и целом эта модель дает представление о том, по какому пути может пойти реальный мир: при одних условиях рост будет наблюдаться и в модели, и в реальной жизни, при

### Вопросы для проверки адекватности модели

Чтобы определить, система перед вами или набор разрозненных деталей, проанализируйте:

1. Могут ли движущие силы изменяться таким образом?
2. Если могут, то будет ли система реагировать именно так?
3. Что управляет движущими силами?

других — и в модели, и в реальном мире численность населения будет уменьшаться. Конкретные цифры могут отличаться, но общие тенденции поведения описываются верно.

Наконец, третий вопрос. Что управляет движущими силами? Что заставляет меняться входные и выходные потоки? Этот вопрос связан с пониманием границ системы. Необходимо детально разобраться, независимы ли эти движущие силы или они находятся под влиянием других частей системы.



**Полезность модели, ее адекватность зависят не столько от того, реалистичны ли сценарии изменения ее движущих сил (никто за это поручиться не может), сколько от того, реалистичны ли типы поведения, которые она демонстрирует.**

Влияет ли как-нибудь численность населения на то, какими могут быть коэффициенты рождаемости и смертности? Влияют ли на рождаемость и смертность другие факторы — экономические, экологические, социальные? Влияет ли численность населения на эти экономические, экологические и социальные факторы?

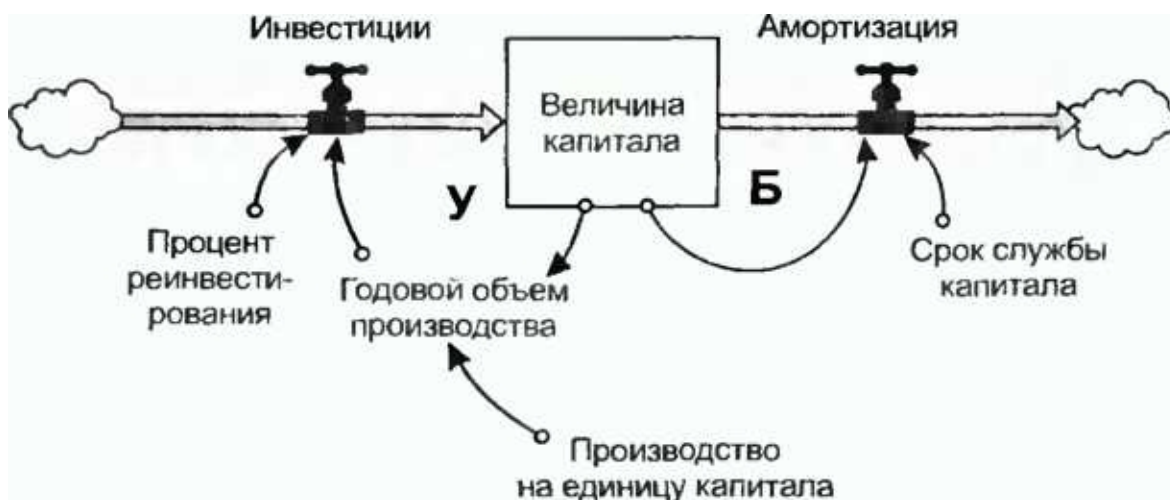
Конечно, ответом на все эти вопросы будет «Да». Рождаемость и смертность тоже управляются циклами обратной связи. Как минимум на некоторые из этих циклов влияет величина численности населения. В нашем зоопарке систем «животное», отвечающее за численность населения, — лишь один из фрагментов гораздо более сложной системы.<sup>14</sup>

На численность населения влияет другой очень важный фрагмент большой системы — тот, что описывает поведение экономики. В его основе лежат два других цикла обратной связи — усиливающий и балансирующий. Они образуют такую же структуру, как и та, что управляет численностью населения (посмотрите на рис. 27), и ответственны за такое же поведение.

Чем больше в экономике величина физического капитала (оборудование и заводы) и чем выше эффективность производства (объем производства на единицу капитала), тем больше годовой выпуск продукции (товаров и услуг).

Чем больше объем производства, тем больший процент может быть инвестирован в создание нового капитала. Это — усиливающий цикл обратной связи, подобный пик-

<sup>14</sup> Более полный вариант модели приводится в книге «Динамика роста в конечном мире» (на русский язык не переводилась): *Dennis L. Meadows et al. Dynamics of Growth in a Finite World. Cambridge MA: Wright-Allen Press, 1974. См. главу «Population Sector».*



**Рис. 27. Как и в структуре с численностью населения, экономический капитал зависит от усиливающего цикла, ответственного за рост (инвестиции в виде доли от годового объема производства), и балансирующего цикла, ответственного за снижение капитала (амортизация)**

лу рождаемости. Инвестируемый процент капитала подобен коэффициенту рождаемости. Чем большую долю годового валового продукта инвестирует общество, тем быстрее растет капитал.

Физический капитал уменьшается из-за амортизации — выхода из строя, износа и устаревания оборудования. Балансирующий цикл, описывающий амортизацию, подобен циклу смертности. «Смертность» капитала определяется в соответствии со средним сроком службы капитала. Чем больше срок службы капитала, тем меньшая его часть ежегодно выбывает и подлежит замене.

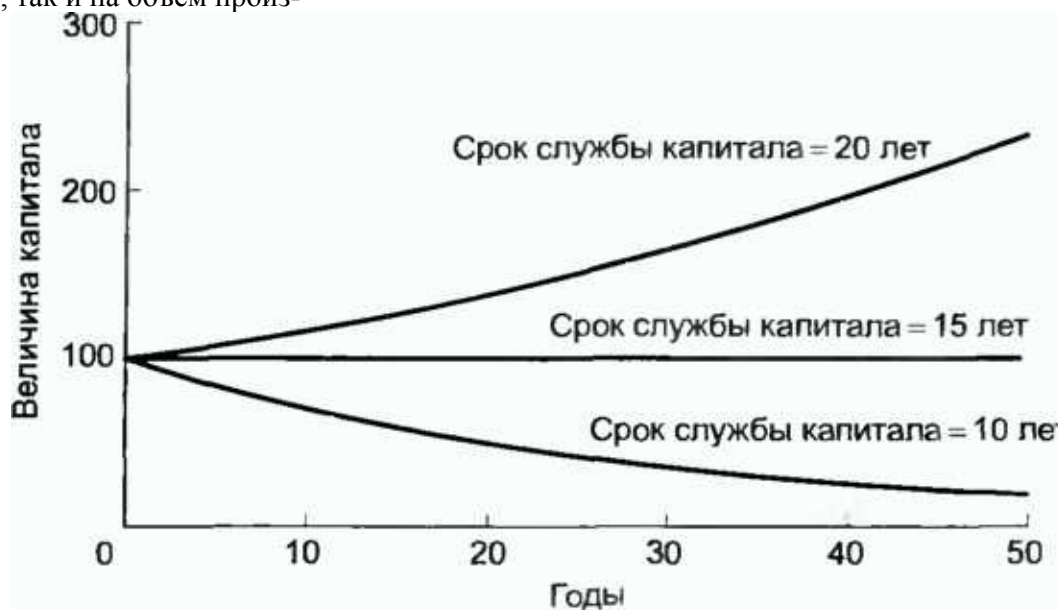
Раз в этой системе структура такая же, как в системе, описывающей численность населения, то и поведение должно быть такое же. Современная история изменения капитала, как и численности населения, показывает доминирование усиливающего цикла, а это вызывает экспоненциальный рост. Будет ли капитал расти в будущем, останется ли постоянным или станет уменьшаться — зависит от того, будет ли усиливающий цикл доминировать над балансирующим циклом, описывающим амортизацию. Это, в свою очередь, зависит от:

- процента инвестируемого капитала — какую долю ежегодного объема производства общество предпочитает не потратить, а вложить в дальнейшее развитие производства;
- эффективности работы капитала — сколько капитала нужно для производства заданного объема продукции,
- и, наконец,
- среднего срока службы капитала.

Если реинвестировать фиксированный процент годового объема производства, увеличивая капитал, и вкладывать определенный процент в повышение эффективности капитала (то есть его способности производить продукцию), то величина капитала может уменьшаться, расти или быть постоянной в зависимости от того, каков срок службы капитала. Графики на рис. 28 показывают, как ведет себя система при разных сроках службы капитала. Если срок невелик, то капитал изнашивается быстрее, чем восполняется. Инвестиций не хватает на то, чтобы покрыть амортизацию, и экономика постепенно начинает приходить в упадок. Если амортизация и инвестиции компенсируют друг друга, экономика будет находиться в состоянии динамического равновесия. При более продолжительном сроке службы капитал будет экспоненциально расти. И чем продолжительнее срок службы, тем быстрее будет рост.

Это еще одно проявление принципа, с которым мы уже сталкивались: запас можно заставить расти не только за счет увеличений входного потока, но и за счет уменьшения выходного.

Точно так же, как на коэффициенты рождаемости и смертности влияли многие факторы, так и на объем произ-



**Рис. 28.** Изменение величины капитала в зависимости от продолжительности срока его службы. В системе с объемом производства на единицу капитала порядка  $1/3$  и ежегодным реинвестированием 20% капитала при 15-летнем сроке его службы будет происходить лишь восполнение изношенного капитала. При меньшем сроке службы капитал будет постепенно уменьшаться, при большем — экспоненциально возрастать

водства на единицу капитала, процент реинвестирования и срок службы капитала влияет очень многое: банковские проценты, уровень развития технологий, налоговая политика страны, сложившиеся потребительские привычки, цены, и это далеко не полный список. Население тоже влияет на инвестирование в производство: от рабочей силы зависит объем выпуска, а растущие запросы потребителей способны привести к уменьшению процента реинвестирования. Годовой объем производства, в свою очередь, тоже может влиять на численность населения. В богатых странах, как правило, хорошо развито здравоохранение, поэтому коэффициент смертности ниже. Но и коэффициент рождаемости в них обычно меньше.

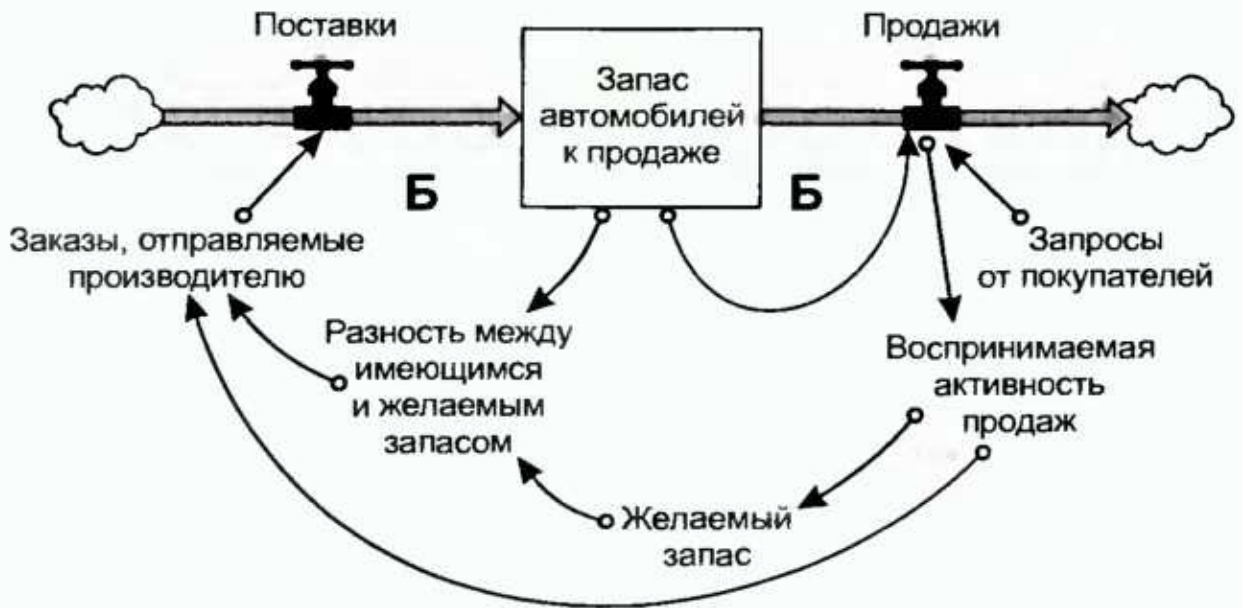
Практически в любой модели реальной экономики, рассчитанной на долговременную перспективу, должны присутствовать структуры, описывающие численность населения и капитал, причем должно учитываться и их взаимное влияние. Ключевой вопрос развития современной экономики — как поддержать усиливающий цикл накопления капитала на более высоком уровне, чем усиливающий цикл роста численности населения, чтобы люди становились богаче, а не беднее.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Системы с одинаковой структурой обратных связей демонстрируют схожие типы поведения.

Одно из ключевых положений системной теории (настолько же важное, как и вывод о том, что системы в основном сами служат причиной собственного поведения) гласит: системы с одинаковой структурой обратных связей демонстрируют схожие типы поведения, даже если во внешнем облике этих систем нет никаких общих черт.

Население и промышленная экономика ничем не похожи друг на друга, за исключением того, что они в состоянии сами воспроизводить себя и тем генерировать экспоненциальный рост. И население, и капитал стареют и умирают. Охлаждение кружки с кофе и нагретой комнаты, радиоактивный распад, старение и умирание населения, старение и выбывание капитала имеют одну и ту же динамику. В каждом случае

Может показаться странным, что в нашем «зоопарке» структура, отвечающая за численность населения, и структура, описывающая капитал, отнесены к «животным» одного вида. Система производства, включающая заводы, партии товара и финансовые потоки, выглядит не слишком похожей на систему, описывающую динамику населения с появлением людей на свет, их старением, бесконечным круговоротом рождений и смертей. Однако с системнодинамической точки зрения эти системы, столь непохожие во внешних проявлениях, имеют общую принципиальную основу: структуры обратных связей. Обе они управляются усиливающим циклом обратной связи, который стремится увеличить запас, и балансирующим циклом, который стремится тот же запас стабилизировать. В обеих системах существует понятие старения. Сталелитейные заводы, токарные станки и турбины стареют и рано или поздно покидают этот мир — так же, как люди.

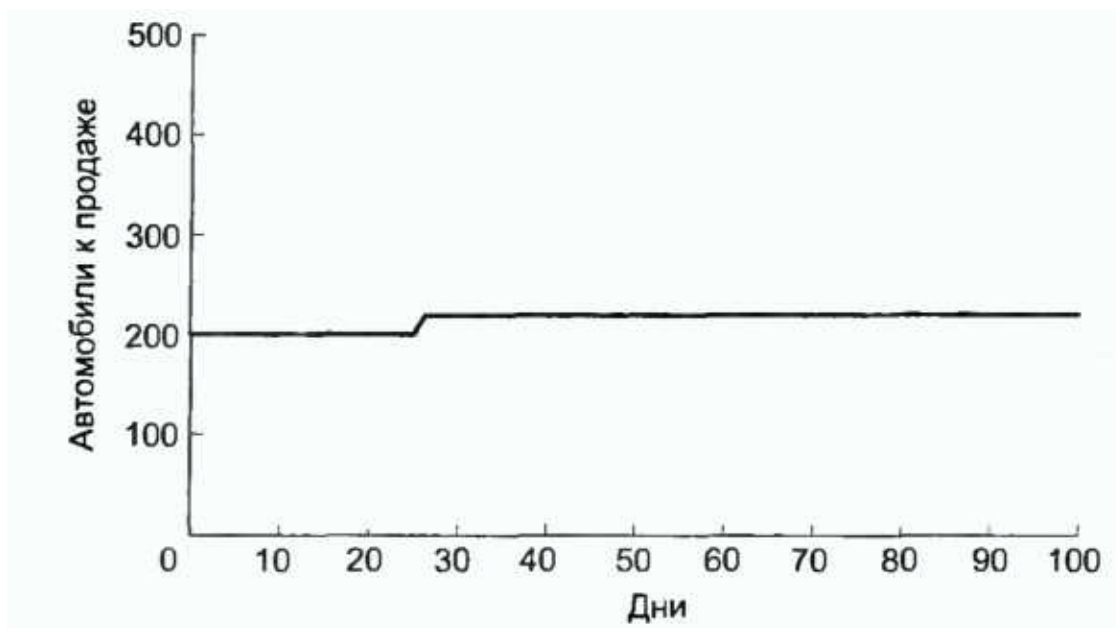


**Рис. 29.** Запас автомобилей на стоянке у дилера поддерживается постоянным за счет двух конкурирующих циклов балансирующей обратной связи: один отвечает за продажи, другой — за поставки

Теперь представьте себе управляющую систему обратных связей, предназначенную для того, чтобы поддерживать запас на складе достаточно большим — таким, чтобы можно было обеспечить полноценные продажи в течение десяти дней (схема показана на рис. 29). Дилер в любом случае вынужден держать склад, ведь заказы и поставки не могут совпадать день в день. Заранее предсказать желание покупателя приобрести машину в какой-то конкретный день просто невозможно. К тому же дилер должен учитывать вероятность задержек с поставками от производителя по тем или иным причинам, и на такой случай нужно иметь некоторое количество автомашин в качестве «буфера».

Милая девушка-менеджер, работающая в дилерской компании, отслеживает продажи (воспринимаемую ею покупательскую активность), и если ей кажется, что продажи растут, то производителю отправляется увеличенный заказ, чтобы привести запас автомобилей к новому желаемому уровню, достаточному для поддержания более активных продаж на протяжении десяти дней. Более высокие фактические продажи означают, что становятся выше





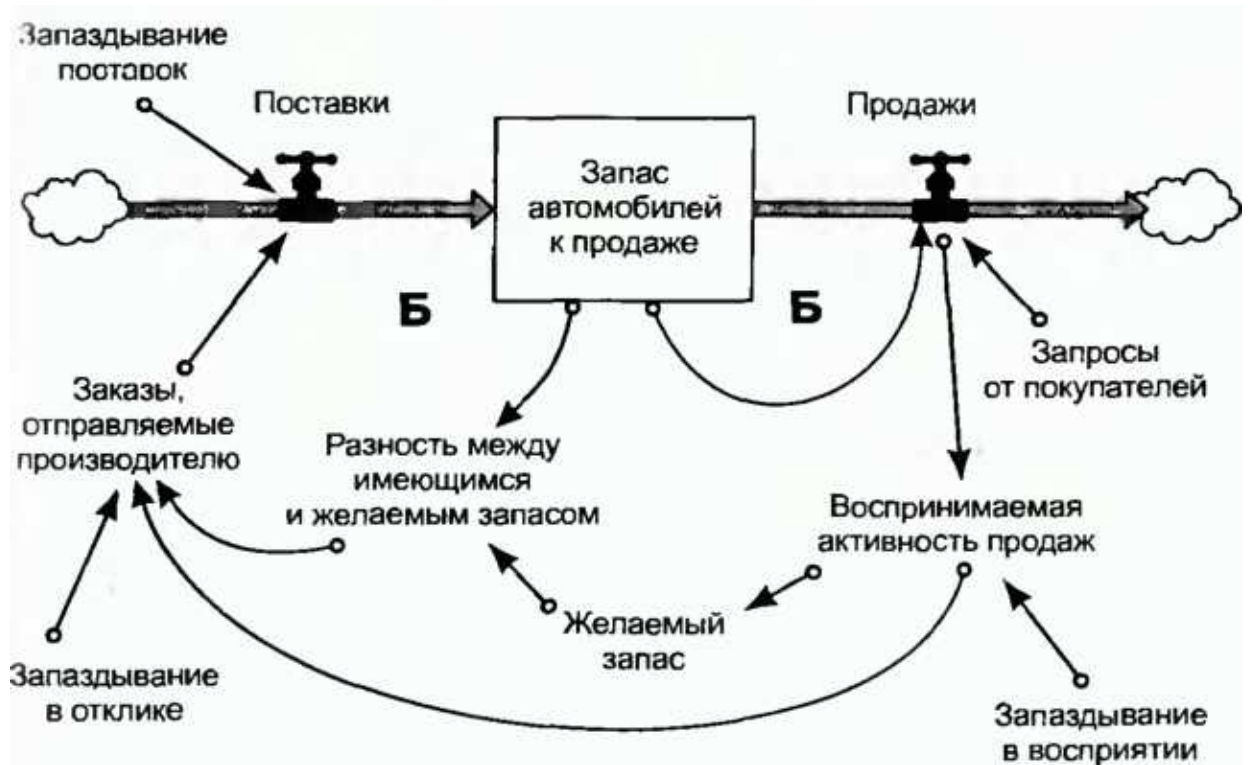
**Рис. 30.** Запас автомобилей на стоянке у дилера в ответ на возросшие запросы покупателей увеличивается на 10%, начиная с 25-го дня

ожидаемые продажи, то есть увеличивается разность между имеющимся и желаемым складским запасом. Увеличивается заказ продукции у изготовителя, увеличиваются поставки, увеличивается запас на складе, достаточный, чтобы поддержать более активные продажи.

Эта система представляет собой модификацию примера с термостатом: один балансирующий цикл обратной связи уменьшает величину запаса, а конкурирующая с ним балансирующая петля поддерживает запас на складе за счет восполнения проданных автомобилей новыми. На рис. 30 показано поведение системы в ответ на увеличение покупательской активности на 10%, причем это поведение вполне ожидаемо.

На рис. 31 в нашей простой системе появляется дополнительный фактор — трехдневное запаздывание — с этим явлением в реальной жизни сталкивается каждый из нас.

Во-первых, существует задержка в восприятии (в данном случае намеренная). Девушка-менеджер не должна реагировать на каждый случайный всплеск продаж. Прежде чем разместить дополнительный заказ у производите-



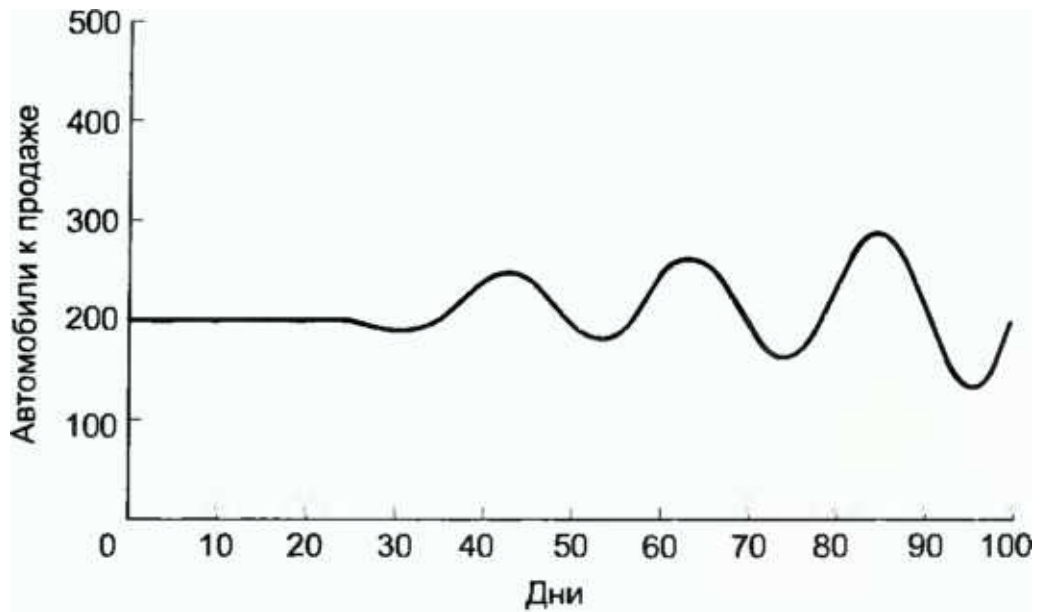
**Рис. 31. Запас автомобилей на стоянке у дилера изменяется с учетом трех запаздываний, введенных в схему: запаздывание в восприятии, в отклике и в поставках продукции**

ля, ей нужно вычислить средние продажи за последние пять дней, чтобы отсеять случайные провалы и всплески продаж и определить реальные тенденции.

Во-вторых, существует задержка в отклике. Даже если точно известно, что нужно дополнительно заказать сколько-то машин, менеджер должна разместить это количество не в одном заказе, а в нескольких. Сначала делается заказ, покрывающий примерно треть предполагаемой дополнительной потребности. Потом еще такой же заказ, и еще один. Фактически, такими частичными дозаказами дилер перестраховывается, чтобы в течение дополнительных трех дней убедиться, что тенденция роста действительно есть.

В-третьих, существует еще запаздывание поставок. Изготовителю на заводе нужно пять дней, чтобы получить, обработать и выполнить заказ, доставив продукцию дилеру.

Система по-прежнему состоит из двух балансирующих циклов обратной связи, точно как упрощенная система с



**Рис. 32. Изменение запаса автомобилей на стоянке у дилера в ответ на 10% -е увеличение продаж, если в системе присутствуют запаздывания**

термостатом, но поведение ее будет совершенно иным. На рис. 32 показано, что же произойдет в системе, если в продажах будет наблюдаться такое же увеличение на 10%, как и в предыдущем случае.

Колебания! Простой скачок продаж может привести к тому, что в какой-то момент запас станет нулевым — стоянка опустеет. Казалось бы, девушка-менеджер достаточно предусмотрительна и предпринимает действия только тогда, когда убедится в том, что продажи действительно увеличились и это не кратковременный скачок. Она начинает заказывать больше автомобилей, чтобы покрыть текущие (более высокие) потребности продаж и увеличить запас автомобилей на стоянке. Но на размещение и выполнение заказов нужно время. За это время стоянка ощутимо пустеет, поэтому заказы приходится увеличивать еще и еще — без этого не обеспечить запас, достаточный для поддержания продаж в течение 10 дней.

Затем заказанные автомобили начинают прибывать к дилеру, запас на стоянке восполняется — и оказывается, что автомобилей даже больше, чем было нужно для простого восполнения склада! Просто за то время, пока сказыва-

**Зяпядыняние I\* балансирующем цикле обратной связи приводит систему к колебаниям.**



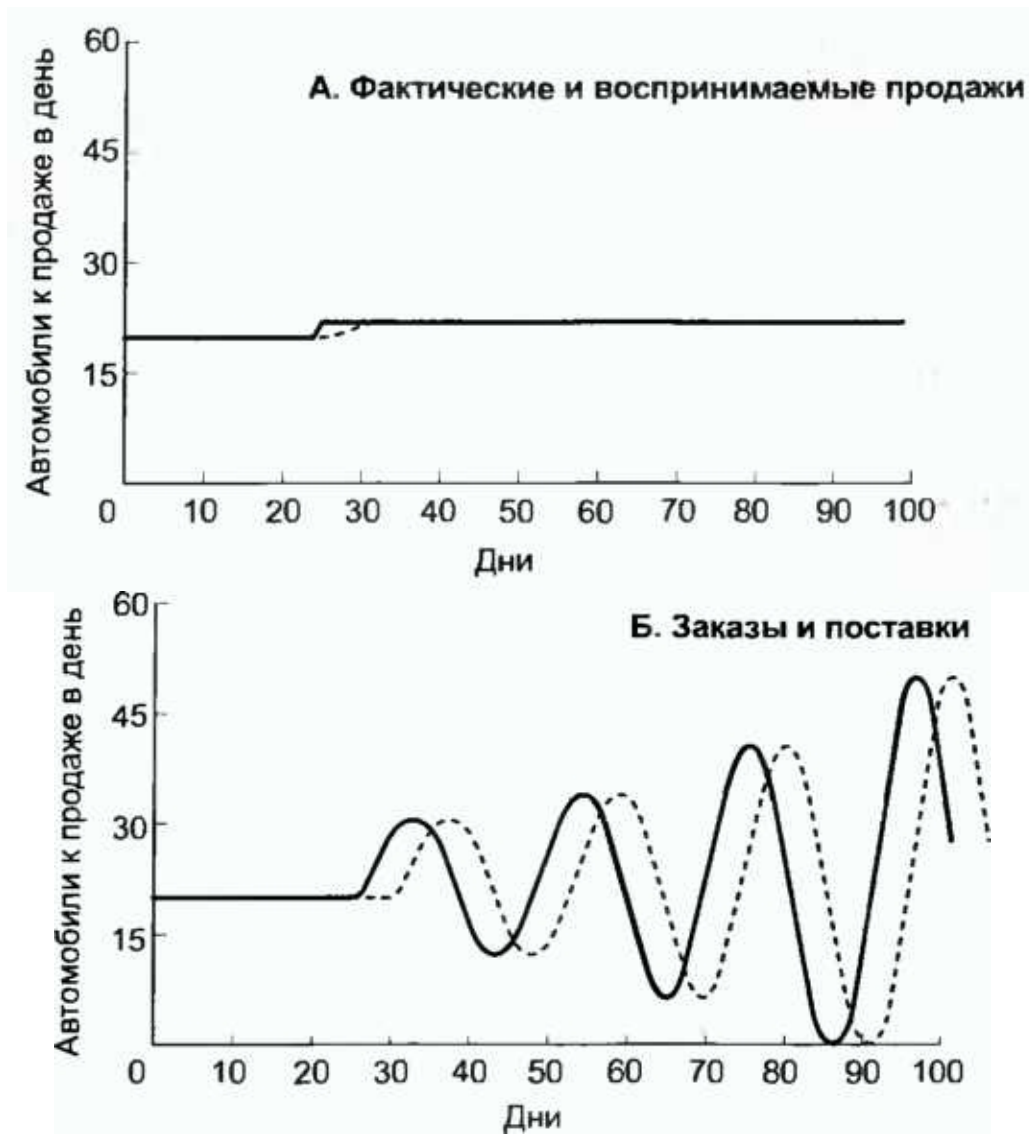


Рис. 33. Отклик заказов и доставок на увеличение запросов покупателей. На рис. А показано, что на 25-й день происходит небольшой, но резкий скачок в продажах. Менеджер воспринимает возросшую активность продаж с запаздыванием, поскольку усредняет количество проданных автомобилей за три дня. На рис. Б показана кривая заказов (сплошная линия) и отстающая от нее кривая поставок от изготовителя (пунктирная линия)

лось запаздывание, наша девушка-менеджер успела заказать слишком много. Она оеознает слою ошибку и, чтобы исправить ее, сокращает заказы. Но ранее сделанные заказы (большие!) продолжают прибывать, поэтому с каждым днем она вынуждена заказывать все меньше и меньше. На самом деле, теперь она заказывает меньше, чем нужно, поскольку не знает наверняка, как будут разворачиваться события с продажами дальше. Склад снова начинает пустеть. Колебания около новой желаемой величины запаса продолжают... На рис. 33 показано, что произойдет несколькими циклами позже.

Чуть позже будет описано несколько способов погасить такие колебания в величине складского запаса, но прежде всего необходимо понять, почему они вообще возникли. Вовсе не потому, что милая девушка-менеджер бестолкова и не умеет работать. Настоящая причина в том, что она вынуждена работать в рамках системы, в которой не хватает оперативной информации (ее и не может быть), к тому же существует физическое запаздывание между

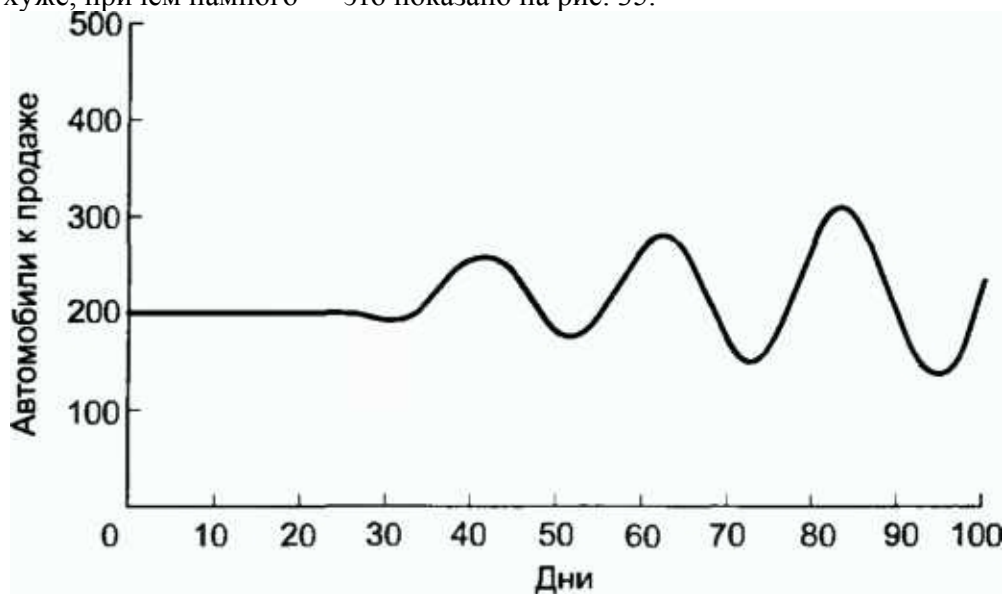
действиями, которые предпринимает менеджер, и откликами на них — изменением запаса автомобилей на стоянке. Никто не знает, как поведут себя покупатели в будущем. Если сейчас они покупают, то это совсем не значит, что завтра они будут покупать так же и столько же. Когда наша девушка-менеджер размещает заказ, она не получает немедленного отклика на него. Такие ситуации встречаются очень часто — нехватка оперативной информации в сочетании с физическими запаздываниями. Подобные колебания встречаются и на складах, и во многих других системах. Попробуйте, например, принять душ и точно отрегулировать температуру, если труба от смесителя горячей/холодной воды до душевой насадки будет длинной — и вы на собственном опыте ощутите все «прелести» колебаний, вызванных запаздыванием.

Каким должно быть запаздывание, чтобы вызвать конкретные колебания в конкретных условиях, — вопрос довольно сложный. На том же примере с автомобилями можно показать, почему.

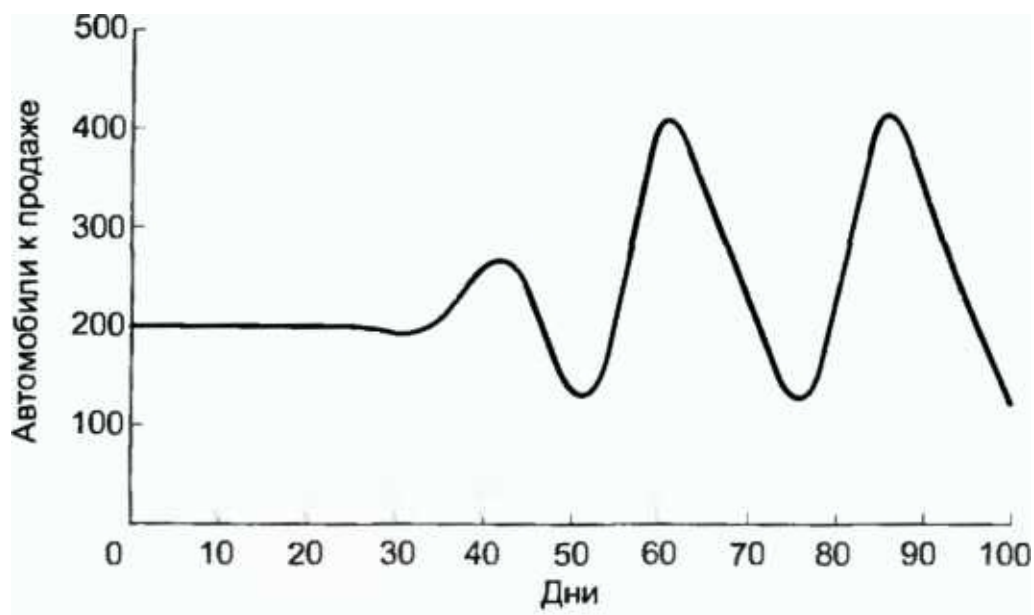
«С этими колебаниями мириться нельзя! — говорит себе наша девушка. Она способна к обучению и хочет найти способ устранить колебания запаса на вверенном ей складе. — Сокращаю-ка я запаздывания. Срок поставки от изготовителя я, конечно, изменить не могу, но со своей стороны реагировать буду быстрее. Можно усреднять данные по продажам не за пять, а за два дня, прежде чем принимать решение об изменении заказа».

На рис. 34 показано, что произойдет, если дилер станет воспринимать рост продаж по усреднению за два дня вместо пяти.

Как видите, даже если наша девушка-менеджер будет реагировать быстрее, ей это не поможет. Наоборот, ситуация с колебаниями в количестве автомобилей на стоянке станет даже хуже — обратите внимание на цену деления на вертикальной оси. Если же вместо уменьшения запаздывания в восприятии она решит уменьшить запаздывание в своем отклике (будет распределять дополнительное количество не по трем заказам, а по двум), все станет еще хуже, причем намного — это показано на рис. 35.



**Рис. 34. Изменение запаса автомобилей на стоянке у дилера в ответ на то же 10%-е увеличение продаж, если дилер будет опираться на усреднение за два дня, а не за пять**



**Рис. 35. Изменение запаса автомобилей на стоянке у дилера в ответ на то же 10% - е увеличение продаж, если отклик дилера будет предусматривать распределение дополнительного количества по двум заказам вместо трех**

В системе что-то надо менять. Поскольку нашей системой управляет сотрудница, способная к обучению, она попытается принять меры. «У меня есть мощный рычаг, но похоже, что я его применяю не в том направлении», — говорит себе наша девушка, обладающая задатками системного мыслителя, с грустью наблюдая результаты своих попыток погасить колебания в системе. Подобные плачевные результаты, кстати говоря, встречаются буквально всюду: кто-нибудь, руководствуясь лучшими намерениями, пытается стабилизировать систему с помощью интуитивно понятного рычага, и действительно оказывает на систему очень сильное воздействие, но только совсем не в том направлении, которое нужно! Это лишь один из множества примеров, как системы могут совершенно неожиданно вести себя при попытке их изменить.

В нашем примере одна из проблем состоит в том, что девушка-менеджер реагирует не слишком медленно, как она сама полагает, а наоборот, слишком быстро. При существующей конфигурации системы дилер реагирует слишком

активно. Ситуацию можно улучшить, если вместо того, **чтобы размещать дополнительные заказы в два приема**, менеджер начнет делить их на шесть частей, распределяя дополнительные запросы по шести заказам. Результат показан на рис. 36.

Как показывает рис. 36, это изменение позволяет практически полностью погасить колебания, и система довольно быстро приходит к новому равновесию.

Запаздывания и задержки могут очень сильно влиять на системы — во многом они определяют тип поведения систем. **Изменение величины запаздывания может привести к очень серьезным изменениям в поведении системы.** (А может и не привести — в зависимости от типа запаздывания и его величины относительно других запаздываний.)

В нашей системе самое важное запаздывание находится вне ответственности менеджера — на задержку поставки машин с завода-изготовителя она повлиять не в силах.

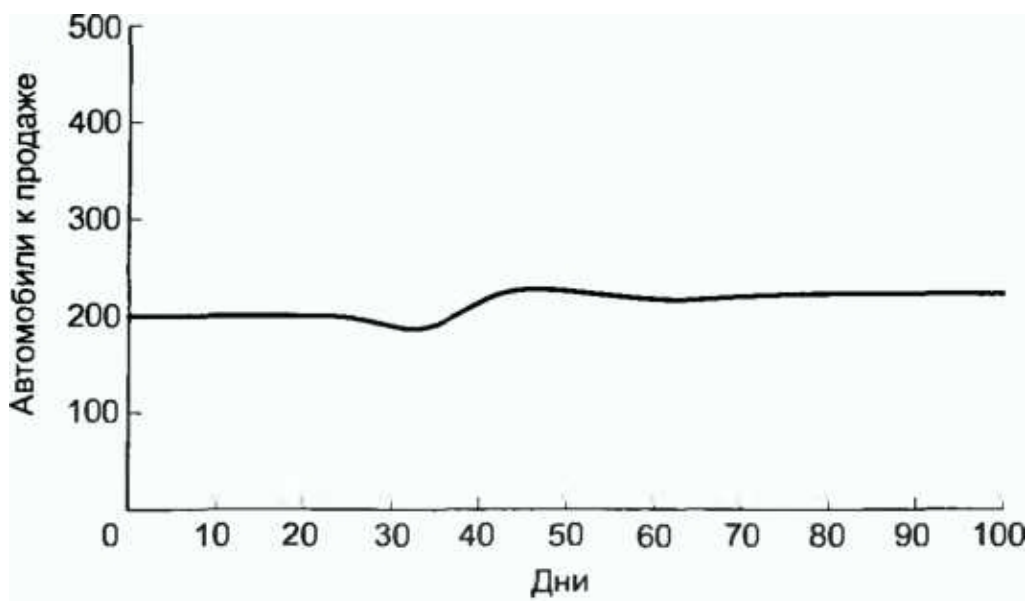


Рис. 36. Изменение запаса автомобилей на стоянке у дилера, если размещать дополнительный заказ в шесть приемов

Но даже если не касаться не подвластной ей части системы, все равно она может научиться хорошо управлять своими складскими запасами.

Изменение запаздываний в системе может сделать управление системой либо гораздо более простой, либо гораздо более сложной задачей. Это объясняет, почему многие системные мыслители буквально одержимы проблемой запаздываний. Приходится всегда отслеживать, где в системе есть запаздывания, какой они продолжительности, каков их характер — физический или информационный. В динамическом поведении системы невозможно разобраться, если не знать, где и какие в ней присутствуют запаздывания. К тому же системщики знают, что некоторые запаздывания можно использовать как мощные рычаги воздействия. Увеличение или уменьшение запаздывания может привести к радикальным изменениям в поведении систем.

Проблемы отдельного склада, по большому счету, решить несложно. Но представьте себе масштабы проблем, если речь пойдет обо всех непроданных автомобилях в пределах США. Заказы на большее или меньшее количество автомобилей повлияют не только на производство на сборочных заводах и фабриках, выпускающих запчасти, но также и на сталелитейные производства, предприятия по выпуску резины, стекол, текстиля. Будут затронуты также поставщики и производители энергии. В рамках всей сложной системы встречаются задержки в восприятии, запаздывания в производстве, доставке, сборке... А теперь подумайте о том, что существует взаимосвязь между производством автомобилей и количеством рабочих мест: чем больше производство, тем больше в нем занято людей, которые затем купят больше машин. Это усиливающий цикл обратной связи, но он может работать и в противоположном направлении: чем меньше производство, тем меньше рабочих мест, тем ниже продажи, и тем меньше в итоге производство. Учтите, что существует еще один усиливающий цикл обратной связи: спекулянты на бирже покупают и перепродают акции автопроизводителей и их поставщиков, основываясь на недавних результатах экономической деятельности этих предприятий, — подъем продаж вызывает рост стоимости акций, в то время как уменьшение продаж приводит к снижению котировок.

Такая очень большая и сложная система связывает между собой различные отрасли промышленности и обладает самыми разными запаздываниями; в ее разных частях могут возникать колебания, они могут распространяться на другие части, усиливаясь в результате действий спекулянтов и из-за других факторов... Так возникает экономическая цикличность с