

# Оглавление

Предисловие от издательства .....	11
Предисловие .....	12
<b>Глава 1. Введение.....</b>	<b>19</b>
1.1. Обратная связь .....	20
1.2. Блок-схемы, системы, входы и выходы .....	21
1.3. Еще о блок-схемах.....	25
1.3.1. Запись музыки.....	25
1.3.2. Соединенные резервуары для воды .....	27
1.3.3. Выводы .....	28
1.4. Обратная связь и динамика .....	30
1.4.1. Обратная связь в душе .....	30
1.4.2. Акустическая обратная связь .....	31
1.4.3. Контроль уровня воды в паровом котле .....	31
1.4.5. Производство и роботы .....	32
1.4.6. Разработка и синтез обратной связи.....	33
1.5. Системы, причинно-следственная связь, стационарность и линейность.....	34
1.6. Модели .....	37
1.6.1. Моделирование .....	38
1.6.2. Объединение систем.....	39
1.7. Базовый контур управления.....	40
1.8. Построение схемы управления .....	42
1.9. Заключительные замечания .....	43
1.10. Дополнительное чтение и обсуждение .....	44
<b>Глава 2. Аналогии .....</b>	<b>47</b>
2.1. Введение и обоснование .....	47
2.2. Сигналы и их графическое представление .....	48
2.3. Сигналы и аналогии.....	53
2.4. Примеры систем .....	55
2.4.1. Разогрев духовки.....	55
2.4.2. Заполнение кухонной раковины .....	57

2.4.3. Зарядка конденсатора .....	57
2.4.4. Компьютерный алгоритм .....	58
2.6. Дискретное или непрерывное время? .....	61
2.7. Системы-аналоги .....	62
2.8. Объединение систем и разделение распределенных систем .....	64
2.9. Колебания .....	65
2.9.1. Обмен энергией .....	65
2.9.2. Системный взгляд .....	66
2.10. Дополнительное чтение и обсуждение .....	67

### **Глава 3. Наглядно про обратную связь и управление ..... 69**

3.1. Введение и обоснование .....	69
3.2. Производство керамической плитки .....	70
3.3. Системы самотечного орошения .....	75
3.4. Конструкция сервопривода радиоастрономической антенны .....	83
3.5. Простые автоматы .....	90
3.6. Гомеостаз .....	91
3.7. Социальные системы .....	97
3.7.1. Простые структуры управления .....	100
3.7.2. Другие подходы к управлению .....	103
3.8. Дополнительное чтение и обсуждение .....	105

### **Глава 4. Анализ сигналов ..... 107**

4.1. Введение и обоснование .....	107
4.2. Сигналы и классы сигналов .....	108
4.2.1. Сигналы, определенные с помощью математических алгоритмов .....	109
4.2.2. Периодические сигналы .....	116
4.2.3. Стохастические (случайные) сигналы .....	119
4.2.4. Хаотические сигналы .....	121
4.3. Преобразование сигналов .....	122
4.4. Измерение сигнала .....	123
4.4.1. Величина сигнала .....	124
4.4.2. Дискретизация сигнала .....	125
4.4.3. Выборка периодических сигналов: проблема сглаживания .....	126
4.5. Обработка сигналов .....	128
4.6. Запись и воспроизведение .....	130
4.6.1. Запись и воспроизведение речи .....	132
4.7. Дополнительное чтение и обсуждение .....	135

### **Глава 5. Системы и модели ..... 137**

5.1. Введение и обоснование .....	137
5.2. Системы и их модели .....	138
5.2.1. От сигнала к модели системы .....	139
5.2.2. От системы к модели .....	141
5.2.3. Классы моделей .....	142

5.3. Объединение систем.....	145
5.4. Упрощающие допущения .....	146
5.5. Некоторые базовые системы.....	149
5.5.1. Линейный коэффициент усиления.....	149
5.5.2. Транспортная задержка.....	151
5.5.3. Интегратор .....	152
5.5.4. Интегратор в контуре обратной связи .....	155
5.6. Линейные системы .....	155
5.6.1. Линейные операторы .....	156
5.6.2. Расчет блок-схем для линейных систем.....	158
5.7. Системный анализ .....	160
5.7.1. Время отклика .....	161
5.7.2. Частотная область.....	162
5.7.3. Каскадно подключенные системы .....	165
5.7.4. Последовательные интеграторы с обратной связью .....	165
5.8. Синтез линейных систем.....	167
5.9. Описание пространства состояний линейных систем.....	169
5.10. Несколько слов о системах дискретного времени.....	171
5.11. Нелинейные модели .....	172
5.12. Дополнительное чтение и обсуждение .....	174

## **Глава 6. Устойчивость, чувствительность**

### **и робастность..... 176**

6.1. Введение и обоснование .....	176
6.2. Некоторые примеры .....	177
6.3. Устойчивость автономных систем.....	180
6.4. Линейные автономные системы .....	182
6.4.1. Общие линейные автономные системы в дискретном времени ..	184
6.4.2. Непрерывное время, линейная система.....	185
6.4.3. Изучение устойчивости .....	186
6.5. Нелинейные системы: устойчивость по Ляпунову.....	190
6.5.1. Первый метод Ляпунова.....	191
6.5.2. Энергия и устойчивость: второй метод Ляпунова.....	191
6.6. Неавтономные системы .....	194
6.6.1. Линейные системы .....	194
6.6.2. Нелинейные системы .....	195
6.6.3. Устойчивость вход–состояние при каскадном соединении .....	198
6.7. За пределами равновесия .....	199
6.7.1. Предельные циклы и хаос.....	199
6.8. Чувствительность.....	201
6.8.1. Робастность .....	203
6.8.2. Вычисление чувствительности .....	204
6.8.3. Общий подход .....	205
6.8.4. Чувствительность к изменениям динамики системы.....	206
6.8.5. Измерения чувствительности .....	206
6.9. Дополнительное чтение и обсуждение .....	207

**Глава 7. Обратная связь..... 209**

7.1. Введение и обоснование .....	209
7.2. Внутренняя обратная связь .....	211
7.3. Обратная связь и неопределенности моделей .....	213
7.4. Стабилизация и регулирование системы .....	215
7.4.1. ISS и системы обратной связи .....	217
7.4.2. Линейные системы с обратной связью .....	219
7.4.3. Критерий устойчивости Найквиста .....	221
7.4.4. Интегратор с задержкой и отрицательной обратной связью .....	223
7.5. Устранение влияния помех .....	223
7.5.1. Обратная связь по шуму .....	224
7.6. Управление с двумя степенями свободы .....	226
7.7. Проектирование обратной связи .....	227
7.8. Обсуждение .....	229
7.9. Дополнительное чтение и обсуждение .....	230

**Глава 8. Подсистема управления..... 232**

8.1. Введение и обоснование .....	232
8.2. Информационный поток .....	235
8.3. Цели управления .....	236
8.4. Разомкнутый контур .....	240
8.5. Замкнутый контур .....	244
8.6. Другие структуры управления .....	246
8.6.1. Управление 2DoF .....	246
8.6.2. Каскадное управление .....	247
8.6.3. Выборочный контроль .....	248
8.6.4. Системы обратного отклика .....	248
8.7. Распределенное и иерархическое управление .....	250
8.8. Совместное проектирование процессов и систем управления .....	251
8.8.1. Управление с масштабированием процесса .....	252
8.8.2. Перепроектирование процесса .....	253
8.9. Дополнительное чтение и обсуждение .....	254

**Глава 9. Компоненты подсистем управления..... 256**

9.1. Введение и обоснование .....	256
9.2. Датчики и системы сбора данных .....	259
9.2.1. Измерительные преобразователи .....	262
9.2.2. Программные датчики .....	264
9.2.3. Коммуникация и создание сетей .....	265
9.2.4. Сети датчиков и исполнительных устройств .....	265
9.3. Контроллер .....	266
9.3.1. Автоматы и программируемые логические контроллеры (ПЛК) ..	266
9.3.2. Релейное управление .....	267
9.3.3. Непрерывное регулирование: ПИД .....	268
9.4. Контроллеры на компьютерной основе .....	270
9.5. Исполнительные устройства .....	272

9.5.1. «Умные» исполнительные устройства.....	274
9.5.2. Спаренные исполнительные устройства.....	275
9.6. Дополнительное чтение и обсуждение .....	275

## **Глава 10. Проектирование управления..... 277**

10.1. Введение и обоснование.....	277
10.2. Разработка системы управления .....	281
10.3. Местное управление .....	284
10.3.1. Логическое управление на основе событий.....	284
10.3.2. Следящее регулирование.....	287
10.3.3. Взаимодействие .....	292
10.4. Адаптация и обучение .....	294
10.4.1. MRAS: MIT-правило .....	295
10.4.2. Самонастройка .....	296
10.4.3. Планирование усиления .....	296
10.4.4. Обучаемые системы.....	298
10.5. Надзор.....	299
10.6. Оптимизация.....	300
10.6.1. Управление головкой чтения/записи жесткого диска.....	301
10.6.2. Модель прогнозирующего управления .....	302
10.7. Общие замечания .....	303
10.8. Дополнительное чтение и обсуждение .....	304
11.1. Введение .....	306
11.2. Медицинские приложения .....	307
11.3. Домашняя автоматизация.....	309
11.4. Промышленные приложения.....	310
11.4.1. Безопасность и надежность.....	311
11.4.2. Энергетическая, материальная или экономическая эффективность.....	312
11.4.3. Устойчивость .....	313
11.4.4. Более эффективное использование инфраструктуры.....	314
11.4.5. Допустимое поведение .....	315
11.4.6. Некоторые области применения .....	316
11.5. Социальные риски .....	318
11.6. Дополнительное чтение и обсуждение .....	318

## **Глава 12. Взгляд в будущее ..... 320**

12.1. Введение .....	320
12.2. От аналоговых контроллеров к распределенному и сетевому управлению.....	321
12.2.1. Встроенные системы управления .....	322
12.2.2. Сетевые системы управления .....	324
12.2.3. Киберфизические системы .....	325
12.3. От автоматических манипуляторов к человекоподобным роботам.....	327
12.3.1. Вызов гуманоидов.....	327
12.3.2. Системы «ведущий–ведомый» .....	328

---

12.4. Искусственный интеллект в управлении .....	329
12.4.1. Интеллектуальная окружающая среда .....	331
12.4.2. Агенты.....	332
12.5. Системы и биология .....	333
12.5.1. Моделирование биосистем.....	333
12.5.2. Биомиметика.....	334
12.5.3. Бионика.....	335
12.5.4. Биоконпонентные системы .....	335
12.5.5. Белок и наноразмерная биохимическая инженерия.....	336
12.6. Дополнительное чтение и обсуждение .....	337

# Предисловие

*Уверенность – это хорошо, но управлять ситуацией лучше!  
Важно знать, что происходит, но важна и обратная связь!*

Наш путь по созданию общего введения в тему систем управления и обратной связи начался с осознания того, что в этой области ее приверженцам потребовалось немного времени, чтобы проецировать основные идеи за пределы сообщества посвященных. Приходится постоянно напоминать себе, что нет общей осведомленности о технике и технологии управления, несмотря на ее повсеместное распространение, когда мы пытаемся представить себя в качестве инженера-разработчика. Неизменно это приводит к поиску ответа на вопрос, что такое инженер в этой области. Мы подозреваем, что большинство инженеров по системам управления даже не пытаются представиться таковыми. Это, безусловно, плохой повод для общения.

Коллеги, друзья, соавторы часто задают вполне естественные вопросы типа: «Хорошо, допустим, ты учишься на разработчика систем управления. Есть ли введение в эту область для неспециалистов? Могу ли я почитать что-то, чтобы получить представление об этой области теории систем? На какие вопросы вы пытаетесь отвечать? Каковы основные результаты?» В ответ мы можем указать на огромное количество технической литературы, основанной на математике, вполне приемлемой для некоторых инженеров или выпускников математических факультетов, но, скорее, представляющей серьезное препятствие для большинства. Реакция на наши извиняющиеся ответы, дополненные ссылкой на историю области или какую-то системную философию, неизменно одна и та же: поднятые брови, удивление, недоверие и неодобрение.

Но как написать о теории всего того, что применяется повсеместно? Ясно, что абстракция – это возможный путь, но абстракция, адресованная инженерам (таким, как мы), является улицей с односторонним движением в математику.

Задача кажется слишком сложной. Конечно, мы можем легко понять, почему так мало было предпринято в попытке сделать теорию управления и технику управления более широко доступными. В самом деле, оправдания слишком легко найти:

- это делать должен кто-то другой, более квалифицированный;
- наши коллеги не одобряют нестрогое изложение, а другим может показаться, что материал все еще слишком сложный. Это похвальное начинание, но с большей вероятностью провала, чем успеха;
- мы, возможно, не можем изложить предмет с достаточной полнотой, охват слишком велик и все еще слишком быстро развивается, чересчур незрело. Всю идею лучше отложить;
- проводить исследования важнее, так много еще предстоит сделать и может быть сделано, и, по крайней мере, проводя исследования, мы раздвигаем границы возможного знания.

Тем не менее при поддержке нескольких друзей (мы хотели бы выделить Петара Кокотовича и активную поддержку наших семей) мы, наконец, исчерпали для себя список оправданий и ощутили готовность начать писать о системах управления для всех. Не потому, что мы убеждены, что можем сделать это хорошо, а потому, что это необходимо. Теория управления и техника управления играют важную роль в мире проектирования, и обратная связь имеет одинаково фундаментальное значение как в природе, так и в мире технологий. Обратная связь и системы управления заслуживают большей аудитории.

## КАК И ГДЕ БЫЛА НАПИСАНА ЭТА КНИГА

Наш проект растянулся на пять лет и продвигался в темпе два шага вперед, один назад, два шага вперед, один назад. Разговоры с нашим общим другом, Карлом Й. Острёмом, о том, как донести до молодежи (детей и внуков) сложные вопросы, навели нас на интереснейшую книгу «Как устроена жизнь» (Hoagland, Dodson, 1995), демонстрирующую возможность передачи ключевых понятий простым языком. Авторы этой книги используют много иллюстраций, которые мы не смогли делать, но идея была подхвачена, и мы начали над ней работать.

Для создания этой книги было необходимо сконцентрироваться вдали от наших повседневных обязанностей в знакомой обстановке (исследования, преподавание, системы управления, бытовые мелочи). Мы проводили недели взаперти, вдали от друзей, семьи и коллег. В незнакомых условиях, изолированные от интернета и мобильной связи, мы могли сосредоточиться не только на написании, но, что наиболее важно, на критике нашей работы: «Конечно, слишком много математики», «Нет, это слишком небрежно», «Мы, возможно, не видим тонкие моменты, которые должны отразить здесь», «Кто-нибудь может понять, что мы хотим здесь сказать?», «Очевидно, это заходит слишком далеко», «Извини, но это слишком поверхностно», «Здесь не осталось сути» и т. д.

Таким образом, нам нужно было постоянно себе напоминать, что книга предназначена для всех, так как слишком легко вернуться на свою знакомую территорию. Мы благодарны ряду учащихся высшей школы и некоторым нашим студентам-второкурсникам, которые добровольно прочитали некоторые главы и предоставили бесценную обратную связь. В самом деле, мы ввели дополнительные примеры и дополнительные пояснения после предварительного чтения этих молодых «коллаборационистов». Спасибо Мигелю, а также Серхио, Кармен, Тамаре, Пабло, Мигелю Анхелю, Феликсу, Солу, Исмаэль, Пуре, Альваро, Мерседес и многим другим. Таким образом, мы провели время в Мельбурне, Валенсии, Праге, Севилье, Сингапуре, Сан-Диего, Афинах и, наконец, снова Мельбурне, чтобы положить замковый камень.

Нашим друзьям, которые принимали нас, самых нелюдимых сотрудников. Мы в большом долгу перед ними. Спасибо.

## Что ожидать от книги

Если вы рассчитываете найти элегантную математику, недвусмысленно указывающую, что такое системы управления и каковы их великие достижения, дальше не продолжайте. Вы можете закрыть книгу прямо сейчас. Мы отказа-



лись от любых попыток добиться точности, общности или полноты. Краткость исключает как точность, так и общность, а наш недостаток знаний делает невозможным полноту. Несмотря на то что простота побеждает точность, мы также никогда не пытаемся ввести в заблуждение там, где важна точность и не хватает деталей. Наша главная цель, однако, состоит в том, чтобы обеспечить и попытаться передать красоту ключевых идей, а также влияние инженерных достижений. Если мы, возможно, побудим некоторых пойти дальше и изучать специальную литературу, это было бы приятным бонусом.

Если вы ожидаете, что вообще не найдете математики, извините, мы вас тоже разочаруем. Мы доблестно пытались исключить большую часть математики, но ясно, что теория систем управления является математической областью. Ее общность требует абстракции, на которую способна математика, и вырвать все это значило бы уничтожить самое ее сердце. Использование математики действительно ограничено, и большая часть текста вообще не опирается на нее. В нескольких местах мы вынуждены прибегнуть к уравнениям и математическим выражениям, но наиболее сложные из них можно либо пропустить, либо просмотреть в первом чтении, и обычно они сопровождается текстом, чтобы объяснить, что говорят уравнения. Однако для тех, кто мотивирован так же сильно, как и мы сами, и готовы овладеть идеями, лежащими в основе сигналов и систем, или даже раздвинуть их границы, некоторые математические сложности и вычислительное тестирование должны стать частью жизни. Путешествие пройдет не без усилий, но и награды вы получите существенные.

Мы стремимся к тому, чтобы большая часть книги была доступна с базовым пониманием типичного вузовского уровня. Кроме того, надеемся, что изложение достаточно автономно, чтобы позволить читателю, который хочет пропустить больше математических фрагментов, сделать это и перейти на обычное повествование без потерь. Мы позволим вам выбирать самостоятельно.

Помимо собственно идей, мы также хотим проиллюстрировать на примерах некоторых технологий, на что они способны, где применяются и куда развиваются. Помимо всего прочего, создание технологий – это то, чем занимаются инженеры<sup>1</sup>.

## КАК ЧИТАТЬ ЭТУ КНИГУ

Наша книга представляет собой рассказ, использующий простые интуитивно понятные примеры для изложения, что имеет значение, а что нет в области систем управления.

Вы можете изучать отдельные главы почти случайным образом. В каждой из них, как мы надеемся, вы найдете наводящие на размышления идеи без особой подготовки. Тем не менее идеи излагаются в определенном порядке, как мы предполагаем, облегчающем знакомство с повествованием. Первая глава представляет краткое изложение предмета книги, содержание которого прорабатывается в следующих главах. Некоторые из «рецензентов» предпочитали, чтобы мы сначала определили концепцию, а затем проиллюстрировали ее

<sup>1</sup> Слово «инженер» происходит от лат. *ingenere*, что можно перевести как «создавать». – Прим. авт.

примерами и приложениями. Мы отказались от этого уже в начале книги, и, начиная с главы 3, сразу рассматриваем ряд различных примеров, где наличие обратной связи и системы управления имеет бесспорное значение.

Вводная глава 1 развивает представления общности предмета и устанавливает общеупотребительную терминологию. В каком-то смысле большинство представленных здесь идей и концепций повторяются и описываются впоследствии. Используемые здесь примеры пересматриваются под разными углами на протяжении остальной части книги. В конце этой главы, как и в конце всех остальных, есть раздел, в котором освещаются основные моменты и под-сказки для дальнейшего чтения и изучения.

В главе 2 развита идея аналогии как для сигналов, так и для систем. Аналогии, по нашему мнению, лежат в основе абстракции, столь широко используемой в исследовании сигналов и систем. Цель состоит в том, чтобы убедить читателя, что на самом деле возможно построить осмысленную теорию всего, применимую ко всему на свете, если заданы ограничения. Аналогия, безусловно, не является исключительной областью теории систем. На самом деле понятие аналогии более распространено в психологии и социальных науках в качестве методологии для постепенного расширения понятий от простых до более сложных, но в некотором смысле здесь вы увидите аналогичный сценарий.

В главе 3 мы описываем некоторые процессы, для которых характерны системы управления с обратной связью. Выбранные нами инженерные примеры представляют собой процесс производства керамических плиток, автомойку, крупную систему распределения воды для полива и радиоастрономическую антенну. Мы концентрируемся на том, что измеряется, как эта информация используется, чтобы решить, что делать дальше, и как решения затем выполняются и определяют будущее поведение процесса. Если измерения, обработка, вычисления и приведение в действие выполняются автоматически, мы имеем дело с автоматической системой управления. Если система управления реагирует на измерения, работает обратная связь. Многие искусственные элементы системы управления вдохновлены природой – обратная связь преобладает во всех естественных процессах. В организме человека весь гомеостаз основан на обратной связи. Большинство психологических и социальных процессов прямо или косвенно используют преимущества обратной связи.

Два основных компонента, которые нам нужны для понимания обратной связи, – это сигналы и системы; сигналы – потому что обратная связь должна измеряться, прежде чем она сможет действовать, и системы – потому что обратная связь используется для воздействия на их поведение<sup>2</sup>. Кроме того, оба ингредиента переплетены между собой: всякий раз, когда мы ссылаемся на системы, мы ссылаемся на что-то, что может создать или изменить сигнал. В главе 4 мы представляем сигнал. Что такое сигналы? Какими свойствами они обладают? Как мы можем их представлять? Как мы их обрабатываем? Мы приводим примеры передачи сообщений, но каждый сможет идентифицировать большое количество сигналов в своем непосредственном окружении: звуки (музыка, шум, пение птиц), ощущения (температура, влажность, свет, запах) и многие

<sup>2</sup> В контексте воздействия на систему входные сигналы часто называют *факторами* или *параметрами*. – Прим. перев.

другие физические или физиологические величины (сила, скорость, перемещение, вес, чувство юмора, усталость, концентрация). Поскольку в основе обратной связи лежат количественные рассуждения, а тема все-таки рассматривается с точки зрения инженерной дисциплины, математическое представление сигналов играет важную роль. Тем не менее наше повествование и рассуждения никогда не основываются только на математическом формализме.

Центральное место в теории систем и обратной связи занимает концепция моделей. Цель главы 5 состоит в том, чтобы представить основные идеи и инструменты, используемые при работе с системами и их моделями. Модель – это удобное представление интересующего нас реального процесса, причем «удобное» часто будет означать «вычислимое». В основном мы рассматриваем простые примеры для иллюстрации силы моделирования. Мы кратко обсудим, как прийти к модели, и обратим немного внимания на конструктивные особенности.

Некоторые основные свойства системы, имеющие значение в контексте обратной связи, а именно стабильность, чувствительность и эксплуатационная надежность (робастность), кратко представлены в главе 6. Эти концепции являются предметом многочисленных и тщательных исследований. На самом деле нет конца изучению теории систем. В конце концов, это теория всего, поэтому гарантия занятости никогда не будет проблемой. В частности, при работе с крупномасштабными или сложными («большими») системами теория находится действительно в зачаточном состоянии.

Глава 7 посвящена центральной теме книги. В этом месте книги большинство идей об обратной связи уже рассмотрено, и здесь преимущества и недостатки обратной связи пересматриваются и обобщаются. Выяснится, что обратная связь может быть использована как преимущество при резком изменении поведения систем, несмотря на наложенные ограничения.

Важно подчеркнуть, что некоторая форма управления с помощью обратной связи имеется в любой системе, которая хорошо работает. Подсистеме управления и возможным структурам для взаимодействия с ней посвящена глава 8. Здесь вы прочтете о многих различных способах, которыми система управления может взаимодействовать с процессом, и как это изменяет ее полезность и применимость. Мы приведем вас к выводу, что лучшая эффективность может быть достигнута, когда процесс и система управления рассматриваются вместе, комплексным образом с самого начала проектирования.

Технология является важным фактором в развитии обратной связи, и, в свою очередь, обратная связь является основным двигателем технологии. Различные компоненты, входящие в состав подсистемы управления – датчики, коммуникации, фильтры, исполнительные устройства, компьютеры и их программное обеспечение – представлены в главе 9. В этой главе показаны некоторые современные аппаратные средства и варианты программного обеспечения, доступные для реализации системы управления. Несомненно, содержание этой главы скоро будет принадлежать области археологии.

Далее идут концепции проектирования и тестирования. Существует ряд дизайнерских и тестовых методов, поддерживаемых вычислительными инструментами, доступными для проектирования систем управления. Некоторые из них изложены в главе 10. Разнообразные модели, цели, ограничения

и сигналы, задействованные в схеме управления, не позволяют перечислить все варианты. В этой области предстоит еще много работы. Разработка системы управления требует много творчества и изобретательности, и нет единого рецепта успеха. Более того, несмотря на наше указание, что правильный подход к системе управления состоит в том, чтобы представлять его с самого начала как часть проблемы общего проектирования системы, насколько нам известно, фактически не существует строгих разработок в области инженерного проектирования на этом пути.

Обратная связь и системы управления имеют большое значение, и действительно многое дают обществу. В главе 11 подчеркиваются некоторые из этих преимуществ. Мы надеемся, что вы сможете выявить множество других преимуществ. Фактически цель всей книги состоит в том, чтобы привести вас к пониманию, как много можно получить с помощью надлежащего использования систем управления с обратной связью и сколько было реализовано, чтобы эта «скрытая технология»<sup>3</sup> стала очевидной. Чтобы быть объективными, мы также указываем на некоторые риски, связанные с обратной связью, но если вы прочитаете книгу до этого места, то будете хорошо подготовлены, чтобы решать такие вопросы самостоятельно.

Наше путешествие по вопросам управления завершается в главе 12 взглядом на непредсказуемое будущее. Некоторые тенденции очевидны, некоторые непосредственные результаты эволюции технологий легко угадываются, но мы также здесь представляем более смелые прогнозы. Будущее открыто, и мы надеемся, что кто-то из наших читателей решит внести свой вклад, чтобы еще больше расширить «удовольствие от обратной связи»<sup>4</sup>.



**Способы чтения.** Вы можете следовать официальному пути, читая главы последовательно, как они представлены, или вы можете пойти по более простому пути: начать с глав 1–3 и перейти к последним двум главам, чтобы получить более неформальное представление. Затем перейти к главам 8–10, где используется немного математики, но они все еще очень просты для понимания. Наконец, главы 4–7 вводят некоторые понятия, где математика неизбежна, чтобы лучше понять их смысл.

<sup>3</sup> Прямая цитата из Карла Астрома (Karl Astrom), прекрасного учителя, исследователя и практика, а также великого энтузиаста управления. – *Прим. авт.*

<sup>4</sup> Цитата из Петара Кокотовича (Petar Kokotovic), друга, вдохновителя и выдающегося лидера в области контроля и обратной связи. – *Прим. авт.*

Кстати, каждая глава проиллюстрирована картинкой, пытающейся резюмировать суть понятий этой главы. Мы очень благодарны Артуру за его прекрасную работу по простому изображению нашего инженерного жаргона.

Педро и Ивен



Два источника вдохновения авторов: Афинский Парфенон (2008) и синусоидальная колонна в Праге (2005).

# Глава 1

---

## Введение

*Откройте окно и посмотрите на природу.  
Вы можете этого не видеть, но везде присутствует управление.*

Системы управления и обратная связь действительно встречаются повсюду и касаются всех нас. Они играют решающую роль как в естественном, так и в искусственном мире. На самом деле ни природа, ни наш технический мир не мог бы функционировать без обратной связи. Тем не менее, несмотря на ее распространенность, мы часто совершенно не подозреваем о ее присутствии. Часто говорят, что управление – это скрытая технология, что не так уж и плохо для технологии, но не очень хорошо для самооценки инженеров.

Интуитивно под обратной связью обычно понимают получение замечаний или предложений о действии, которое мы совершили. В нашем сценарии обратная связь – это информация, полученная из системы<sup>5</sup>, используемой для изменения своего поведения. Обратная связь лежит в основе:

- *термостатов* – например, устройств, которые регулируют или контролируют температуру в комнате или доме с помощью центрального блока отопления и/или охлаждения. Термостаты также встречаются в большинстве автомобилей, к ним принадлежат духовки, морозильники и холодильники и, конечно же, водонагреватели;
- *смывного механизма в туалете* – механизма управления, который обеспечивает смыв в туалете с автоматическим заполнением бачка до заданного уровня. Подобные механизмы используются в оросительных каналах и везде, где необходимо управлять уровнем жидкости;
- *круиз-контроллеров* – устройств, которые более или менее поддерживают движение автомобиля с заданной водителем постоянной скоростью, несмотря на изменения наклона дороги. Более продвинутым механизмом в том же ключе является автопилот, используемый в самолетах для полета из одной точки пути к другой, и автоматический руль, используемый на кораблях для поддержания заданного курса. Более того, вся функциональность современных автомобилей и лайнеров, в том числе их безопасность, критически зависит от систем управления;
- *метро Копенгагена* – сети легкорельсового транспорта, где вагоны управляются автоматически с помощью централизованного управления без необходимости наличия машиниста в каждом поезде.

<sup>5</sup> Этот термин разъясняется позднее, а пока что система – это просто собирательное название для обозначения экземпляра процесса, физической машины или инструмента – всего, что может обрабатывать информацию в той или иной форме. – *Прим. авт.*



Следующий анекдот может служить иллюстрацией того, как проявляется технология скрытого управления. В начале восьмидесятых было принято благодарить пилота за мягкую посадку аплодисментами. Однажды утром при посадке в Париже пилота поблагодарили за отличную посадку обычным способом. Вскоре капитан вышел по системе громкой связи не для того, чтобы поблагодарить пассажиров, а для того, чтобы сообщить им, что посадку совершил автопилот. Аплодисменты были вполне заслуженными.

В природе обратная связь лежит в основе:

- *гомеостаза*<sup>6</sup> – это термин, используемый для обозначения того, что в живых организмах критически важные переменные находятся в допустимых пределах<sup>7</sup>, такие как температура нашего тела или уровень глюкозы в крови, например;
- *круговорота воды в природе* – как вода испаряется, затем конденсируется в облака, движется вокруг земного шара, осаждается на Землю и стекает обратно в океаны, ее основной резервуар-накопитель;
- *модели «жертва–хищник»* – то, как вид-хищник питается своей добычей и, следовательно, зависит от выживания этой жертвы для его собственного выживания. Большинство экологических систем зависит от наличия обратной связи для поддержания баланса видов в экологии.

В природе, как и в инженерном мире, системы управления и обратная связь необходимы для поддержания жизни такой, какой мы ее знаем (Hoagland, Dodson, 1995). От одиночных клеток к сложной экологии всей нашей планеты, от дедушкиных часов до современного реактивного лайнера – везде обратная связь играет решающую роль в поддержке функциональности.

В этой главе мы представим некоторые идеи, которым посвящена эта книга. Центральная проблема заключается в понятии обратной связи, и именно с него мы начнем. Вводятся все понятия интуитивным образом, не слишком строгим, но так мы будем уверены, что устанавливаем общий словарь технических терминов. Каждая концепция исследуется далее в последующих главах, и мы предоставим ссылки, выходящие далеко за рамки материала этой книги.

## 1.1. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Вероятно, первая ассоциация, которая приходит на ум в отношении обратной связи, – предоставление или получение обратной связи. Родители обеспечивают обратную связь со своими детьми, чтобы получить желаемый поведенческий результат. Нас, как потребителей, постоянно просят высказать свое мнение об уровне обслуживания, которое мы получили, или о том, насколько мы (не)удовлетворены конкретным продуктом. Врачи обеспечивают обратную связь со своими пациентами, чтобы помочь естественным лечебным процес-

<sup>6</sup> Буквально с греч.: сохранение того же самого состояния. – *Прим. авт.*

<sup>7</sup> *Гомеостаз* – общий термин, означающий способность любой системы сохранять стабильное состояние. Большинство авторских примеров есть примеры гомеостаза (термостат, например, представляет собой типичный частный случай гомеостата). Здесь и в дальнейшем авторы используют этот термин применительно только к биологическим системам. – *Прим. перев.*

сам. В университете студентов просят дать обратную связь профессорам о качестве обучения, которое они получили. Предположительно обратная связь позволит учителям улучшить предлагаемые курсы и добиться лучших результатов обучения, а также повысить удовлетворенность студентов в следующий раз.

Что важно в этом контексте, так это направление потока информации. Чтобы обеспечить обратную связь относительно обучения, ученики должны сначала получить информацию от учителя. Затем полученный опыт сообщается учителю. Затем учитель усваивает информацию и использует ее для корректировки материала курса и стиля презентации для следующего набора студентов. Наличие направленного контура является определяющей характеристикой обратной связи; не бывает обратной связи без замыкания информационного контура.

Направление, связанное с информационным потоком, конечно, связано с причинностью. Сначала приходит опыт учения, затем этот опыт сообщается учителю, затем учитель интерпретирует полученный опыт и реагирует улучшенными лекциями. Можно сказать, что обратная связь всегда ре-активна и, следовательно, всегда запаздывает. Событие, ошибка или действие должны произойти, прежде чем обратная связь может привести к ответному действию.

Обратная связь чрезвычайно важна и, как правило, имеет центральное значение для понимания любого поведения, так как присутствует почти в любом поведении, о котором мы только можем подумать.

## 1.2. Блок-схемы, системы, входы и выходы

Будет очень полезно наглядно представить информационный контур, связанный с обратной связью, с помощью так называемой структурной схемы (блок-схемы). Мы будем широко использовать блок-схемы повсюду в этой книге.

Для примера «ученик–учитель», который мы только что обсуждали, можно использовать блок-схему, показанную на рис. 1.1. И учитель, и ученик представлены отдельным прямоугольником–блоком. Отличительной особенностью такого блока на блок-схеме является то, что он может выполнять действия (например, преподаватель предоставляет лекции, результаты и оценочные задания). Кроме того, когда мы производим над блоком наблюдения или измерения, то получаем информацию о его возможных действиях (например, можно наблюдать за командами учителя, как он управляет своим голосом во время лекций). И действия, и наблюдения обозначены стрелкой, выходящей из рамки блока. Выходящая из блока стрелка указывает на то, что информация была из него извлечена. Мы называем такие случаи выходами.

Кроме того, блок может получать информацию на вход, и это указано стрелкой, направленной в него. В частности, блок может производить действие в ответ на входное воздействие; но не все выходные данные должны инициироваться входными данными или быть ответом на них. Учитель может доставить некоторые данные в ответ на полученную информацию, но большая часть лекционного материала не является ответом на комментарии студентов. Выход одного блока может быть входом в другой блок, как это видно на рис. 1.1.

Когда мы идентифицируем на блок-схеме замкнутый контур, мы знаем, что имеется обратная связь. Блоки на блок-схеме обычно называют системами или подсистемами, а вся блок-схема интерпретируется как интересующая нас система.



Блок-схемы – очень полезный инструмент для наглядного представления системы или ее части. Они представляют нашу точку зрения на систему. Любая система может иметь несколько различных блок-схем, связанных с ней, в зависимости от того, какая информация может нас заинтересовать или какие факторы мы хотим принять во внимание. Блок-схема фиксирует и сообщает зрителю, как взаимодействуют подсистемы в том, что мы считаем важным.



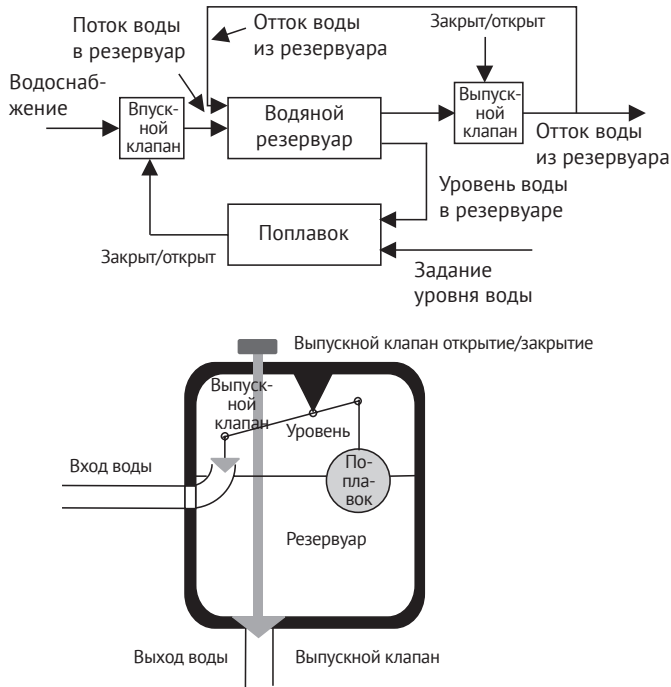
Рис. 1.1. Контур обратной связи: взаимодействие студента и учителя

Общее поведение при взаимодействии учителя и студента также будет зависеть от других факторов, например информации, поступающей из среды, в которой происходит взаимодействие студента и учителя. Также учитель должен будет планировать обучение, чтобы соответствовать требованиям учебной программы, и убедить совет по аккредитации в том, что соблюдаются необходимые стандарты. Точно так же важную роль будут играть влияние со стороны сверстников и то, насколько студент делает успехи. Подобная информация также обозначена на блок-схеме рис. 1.1 стрелками, входящими извне в блоки. Они означают внешние факторы, поступающие из других систем, не идентифицированных точно и обычно называемых окружающей средой.

Иногда может быть полезно указать информацию, извлеченную из системы, которая доступна в окружающей среде. Такая разновидность представлена стрелками, направленными вовне блока. Можно себе представить, что блок-схема на рис. 1.1 – всего лишь маленькое подмножество значительно большей системы с учетом многих других взаимодействий и дополнительных контуров обратной связи.

Рассмотрим в качестве другого примера рис. 1.2, на котором показана обратная связь, присутствующая в обычной системе смыва в туалете.

Здесь у нас есть четыре главных блока (или подсистемы): впускной клапан, водяной резервуар, выпускной клапан и поплавок. Для полноты картины мы могли бы также рассмотреть подачу воды, унитаза и слив. Работа выпускного клапана исключена из рассмотрения, им можно было управлять либо вручную, либо с помощью датчика присутствия. Что мы измеряем (или где проводим границу блока) – действительно наш выбор, блок-схема просто отражает интересующие нас переменные. Здесь на рис. 1.2 нас интересует уровень воды в водяном резервуаре (бачке), приток воды и отток воды, а также входное воздействие, подаваемое на впускной клапан от поплавка.



**Рис. 1.2.** Контур обратной связи: простой механизм смыва в туалете

Поток на входе в резервуар определяется по положению клапана и давлению воды в водопроводе, но мы решили не рассматривать эти аспекты. Мы просто обрабатываем поток на входе в бачок, модулируемый клапаном. Обратная связь выполняется через поплавок. Поплавок гарантирует, что, пока уровень воды ниже желаемого, впускной клапан остается открытым. Детали работы впускного клапана, механика поплавка и то, как возникает поток на выходе, может представлять интерес, но для понимания общей работы системы несущественно.

Существует также второй контур обратной связи, присущий работе смывного бачка: обратная связь от оттока к бачку. Действительно, отток также определяет уровень воды в резервуаре. Этот контур прекрасно иллюстрирует тот факт, что стрелки на блок-диаграмме касаются информации, а не материального потока. Если бы было только последнее, очевидно, единственная стрелка находилась бы вне цистерны, так как отток означает физический выход воды из бачка. Тем не менее количество воды, выходящей из бачка, вместе с притоком определяет уровень воды; для определения уровня требуется информация, связанная с оттоком, отсюда и стрелка от выпускного клапана обратно в бачок.

Внешними входами в систему являются предполагаемое в достаточном количестве водоснабжение, положение выпускного клапана и заданное (опорное) значение уровня, который обычно скрыт во входном клапанном механизме. Это один из важных моментов в использовании блок-схем. Точного знания внутренней работы отдельных подсистем на блок-схеме часто не требуется для понимания общей работы системы на блок-схеме.

Простое представление круговорота воды в природе, представленное на рис. 1.3, показывает, что рециркуляция в любом материальном потоке, а не только в воде, подразумевает обратную связь. При изображении на блок-схеме круговорота воды мы выделили три основные водосодержащие среды: атмосферу, океаны и почву; а также показали направления водообмена между ними.

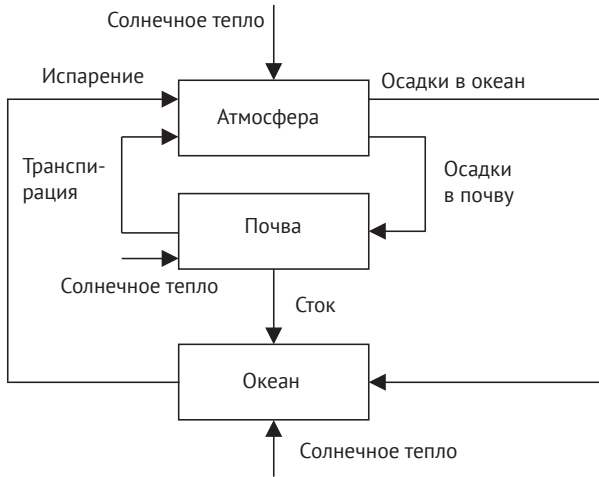


Рис. 1.3. Контур обратной связи: круговорот воды на планете Земля

Эта блок-схема отражает наш интерес к распределению воды и ее перемещениям. Каждый блок на схеме – водный резервуар, его входы представляют собой притоки, а выходы – оттоки воды. Ясно, что здесь многого не хватает (во-первых, нет никакой информации о потоках, во-вторых, неизвестно количество воды в резервуарах). Указан основной источник энергии, движущая сила всего кругооборота воды – она исходит от Солнца. Чтобы сделать описание более полным, мы могли бы дополнительно подразделить почвенный резервуар и рассмотреть отдельно поверхностные и грунтовые воды.

В совокупности входы и выходы называются сигналами. Сигналы меняются со временем, т. е. они являются функциями времени. Таким образом, блок-схема в первую очередь передает идею о том, что система воздействует на входной сигнал, чтобы произвести выходной сигнал (но помните, что это не единственный способ, который определяет выходы!). В математике такое воздействие часто называют оператором. Удобным сокращением для этого (когда мы не хотим рисовать картинку) является запись:

$$y = P(u); \text{ или даже проще: } y = Pu.$$

Это выражение следует интерпретировать следующим образом: сигнал  $y$  является выходом системы, представленной буквой  $P$ , действующей на входной сигнал, представленный буквой  $u$ <sup>8</sup>. Соглашение состоит в том, что-

<sup>8</sup> Как легко заметить, при таком представлении входные сигналы (факторы, параметры) аналогичны понятиям *независимой переменной*, а выходные сигналы – *функции* (зависимой переменной) в обычной математике. В некоторых случаях выходной сигнал называют еще *целевой функцией*. – Прим. перев.

бы использовать строчные буквы для сигналов и прописные буквы для операторов.

Например, у нас осадки над сушей и океаном ( $p, p_o$ ) есть следствие воздействия атмосферы  $A$ , действующей на испарение  $e$  и транспирацию<sup>9</sup>  $x$  с использованием поступающего солнечного тепла  $s$ . Точно так же транспирация и сток  $r$  зависят от площади суши<sup>10</sup>  $L$ , подвергающейся воздействию осадков. Испарение является следствием воздействия океана на осадки над океаном и на сток с суши. Включая поступающее солнечное тепло, которое влияет на все резервуары, мы имеем шесть сигналов  $e, p, p_o, r, x$  и  $s$ , ограниченных тремя системами  $A, L$  и  $O$ <sup>11</sup>. *Все сигналы являются функциями времени; например, количество осадков меняется от минуты к минуте. Чтобы подчеркнуть эту зависимость, иногда мы будем писать  $u(t)$ .* Чтобы быть точным, нам нужно быть осторожным с определением сигналов и объяснять механизмы действия операторов.

Следует проявлять некоторую осторожность при использовании этой нотации, так как системы могут производить выходные данные независимо от входов, и чаще всего имеется много разных выходов для одного и того же входа, в зависимости от внутреннего состояния системы. В туалете, например, внешние входы суммировались, в кругообороте воды только солнечное тепло идентифицируется как входная величина. Есть еще много сигналов, которые мы не включили в блок-схемы. Принятие решения о том, какие факторы являются релевантными при построении блок-схемы, зависит от назначения блок-схемы и требуемого уровня детализации.

## 1.3. ЕЩЕ О БЛОК-СХЕМАХ

Сигналы представляют информацию. В теории систем нам нравится представлять сигналы и системы на схемах, как на рис. 1.3. Сигналы представлены направленными стрелками. Системы каким-либо образом преобразовывают сигналы, и на блок-схемах они (в основном) представлены прямоугольниками.

### 1.3.1. Запись музыки

При записи музыки через микрофон (см. рис. 2.2 далее) все источники слышимого звука (волна давления, упруго деформирующая воздух) в окружающей среде будут присутствовать в сигнале, который фактически записывается через микрофон, включая посторонние шумы. Таким образом, имеется неизбежная разница между интересующим сигналом (музыкой) и фактической записью, представляющей сигнал после микрофона<sup>12</sup>. Чтобы зафиксировать эти

<sup>9</sup> *Транспирация* – процесс движения воды через растение и ее испарение через листья, стебли и цветки. Около 99–99,5 % влаги, поступающей в растение через корневую систему, испаряется через механизм транспирации. – *Прим. перев.*

<sup>10</sup> В оригинале *land mass* (масса суши), но осадки, разумеется, воздействуют на площадь, а не на массу. – *Прим. перев.*

<sup>11</sup> Используя это соглашение, блок-схему рис. 1.3 можно записать следующим образом:  $(p, p_o) = A(e, x, s)$ ,  $(r, x) = L(p, s)$ , и  $e = O(p_o, r, s)$ . – *Прим. авт.*

<sup>12</sup> Кроме того, микрофон не будет записывать абсолютно все звуки, так как для регистрации звука требуется некое минимальное количество энергии. – *Прим. авт.*

различия, для обозначения различных сигналов используются разные термины. Музыка будет называться собственно *сигналом*, другие звуки и артефакты, вносимые микрофоном, называются *помехи* или просто *шум*. Очень простое математическое представление (модель) для измеряемого сигнала состоит в том, чтобы рассматривать его как сумму музыкального сигнала и шума, как показано на рис. 1.4.

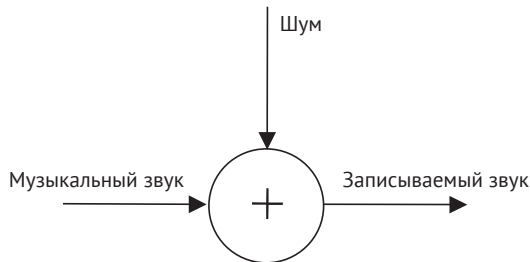


Рис. 1.4. Музыка, испорченная шумом

Сигналы представлены направленными стрелками. Системы (или их модели) преобразуют сигналы некоторым образом и представлены прямоугольниками. Когда преобразование всего лишь простая сумма или произведение сигналов, мы используем круг, в котором символ  $+$  или  $\times$  находится в центре. Стрелки, идущие вместе с сигналом, указывают на поток информации на картинке. Стрелки делают понятие входа и выхода для конкретного блока интуитивно понятным: вход – это сигнал, на который система воздействует, чтобы произвести выходной сигнал. В приведенной ситуации поток информации вполне ясен: и звук музыки, и шум – входы, тогда как записываемый звук является выходом.

Другой, более полный способ анализа записи – рассмотреть целиком процесс записи как систему, где музыка вместе с другими шумами является входом, а измеренный сигнал – выходом.

На рис. 1.5 в блоке с меткой «Исполнение» сигнал преобразуется из дискретного (цифрового, нотного)  $D$  представления в аналоговое  $A$ . Эта операция обозначается как цифроаналоговое (D/A) преобразование. Здесь это выполняется комплексно музыкантом или оркестром. Блок с надписью «Рекордер» выполняет обратный процесс: аналоговый электрический сигнал и выходной сигнал микрофона преобразуются в цифровой сигнал для записи на диск. Это аналого-цифровой (A/D) преобразователь.

Входы являются свободными переменными в том смысле, что они не ограничены системой, к которой они относятся. Ноты выбираются произвольно, и окружающий шум может быть очень разным. Система записи не ограничивает ни музыку, ни шум, и то и другое является для нее входом. Выходные сигналы определяются входным сигналом и системой. Как только музыка и шум заданы, микрофон генерирует определенный электрический выходной сигнал. В этом выходном сигнале нет никакой свободы выбора.

Конечно, вход одного блока может быть выходом другого. Поэтому, когда мы говорим, что вход является независимой переменной, необходимо четко понимать, что независимость тут рассматривается относительно конкретной системы.

Например, подсистема суммирования на рис. 1.5 не ограничивает шум и музыкальный сигнал, оба являются входами в подсистему суммирования. Звук музыки определяется как выход цифроаналогового блока, который принимает нотный лист в качестве входных данных и производит музыку в качестве выходных данных. Точно так же электрическая мощность микрофонного сигнала подается на аналого-цифровой преобразователь, который записывает цифровой сигнал на диск. Аналого-цифровой преобразователь не должен каким-либо образом ограничивать выходные электрические параметры микрофона.

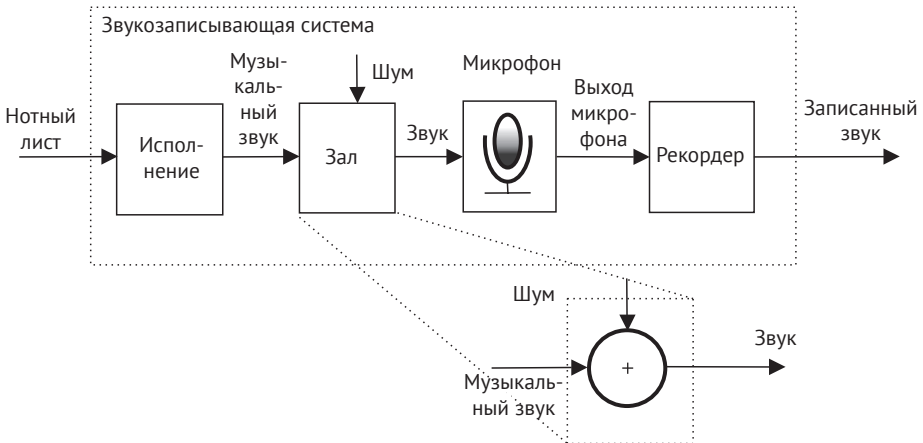


Рис. 1.5. При записи с помощью микрофона музыка искажается шумом

Блок-схема на рис. 1.5 раскрывает иерархию систем в зависимости от интересующих нас сигналов. Если нас не волнует шумность звука или электрический уровень сигнала микрофона, у нас есть система, которая приводит исходные ноты и окружающий шум к записываемому звуку. Иерархия систем, увеличение и уменьшение масштаба изображения, которое отображается на блок-схеме, является одним из тех свойств блок-схем, которые делает их удобным инструментом для размышлений и обсуждения системных идей. Конечно, можно увеличить масштаб еще больше, и, например, мы могли бы распаковать, что содержит внутри система «Микрофон».

### 1.3.2. Соединенные резервуары для воды

Рассмотрим два бака для воды, расположенные так, как показано на рис. 1.6а. Чистое поступление воды в первый бак (разница между входным потоком  $f_i$  и выходным потоком  $f_o$ ) будет определять уровень воды в баке  $h_1$ , измеренный от центра выпускного отверстия. Именно этот уровень определяет расход из бака: чем выше уровень, тем поток  $f_o$  будет больше.

Точно так же уровень воды во втором баке определяется разницей между его притоком (который является оттоком  $f_o$  из бака 1) и его оттоком. Уровень воды  $h_2$  во втором баке определяет отток из бака  $f$ .

Блок-схема, представляющая эту ситуацию, изображена на рис. 1.6б. Обратите внимание на обратную связь на блок-схеме. Понятно, что второй бак

не влияет на первый, но его поведение зависит от первого бака. Это пример каскадной системы, которая отражается на блок-схеме тем, что соответствующие блок-схемы подсистем (бак 1 и бак 2) включены последовательно: выход первой подсистемы определяет вход второй подсистемы.

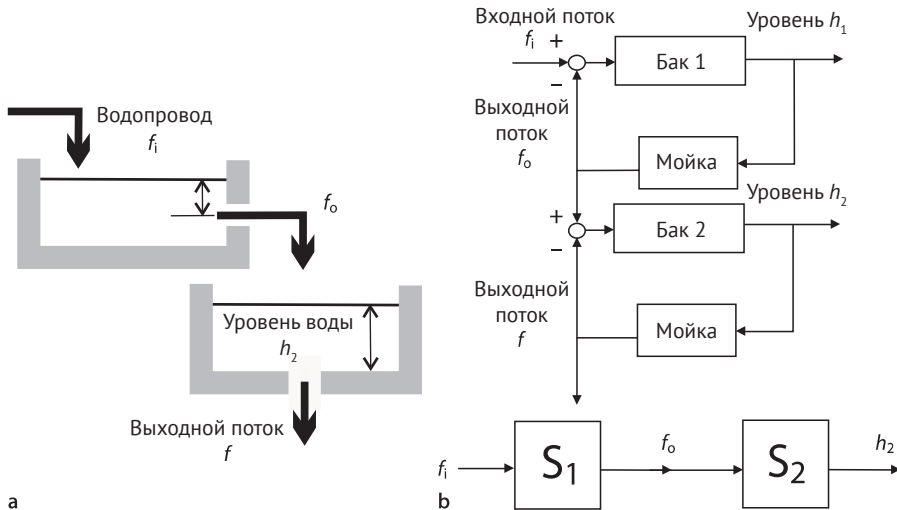


Рис. 1.6. Два бака: а – физическая схема, б – блок-схема

### 1.3.3. Выводы

Как правило, блок-схемы состоят:

- из поименованных блоков, представляющих (под)системы, которые воздействуют на сигналы-входы и производят сигналы-выходы;
- направленных линий, представляющих направление потока информации; они помечены названиями сигналов.

При рисовании блок-схем некоторые специальные, часто встречающиеся блоки, выполняющие простые операции, могут представляться не только прямоугольниками.

Некоторые примеры:

- *блок суммирования* (сумматор), обычно представленный кружком со знаком плюс внутри. Выходной сигнал такого блока представляет собой сумму всех входных сигналов. Стрелки входа в блок суммирования часто несут метку + или –; если метка + (или когда нет метки вовсе), то для формирования выходного сигнала входной сигнал прибавляется, если метка –, то сигнал вычитается;
- *блок умножения*, также называемый перемножителем, обычно представленный кружком со знаком умножения внутри. Перемножитель – это блок, выходным сигналом которого является произведение его входных сигналов. Стрелки входа в перемножитель могут быть помечены + или – для указания, используется ли при умножении сигнал с положительным или отрицательным знаком;



- блок усиления (усилитель), обычно представленный треугольником. Блок усиления принимает входной сигнал и умножает его на константу, называемую коэффициентом усиления усилителя.

Любая другая операция, включающая один или несколько входов и обеспечивающая один или несколько выходов, обычно описывается внутри прямоугольного блока. Если выход получается как результат воздействия двух входов,  $u_1$  и  $u_2$ , посредством операции, представленной как  $G$ , обозначение будет  $y = G(u_1, u_2)$ .

Мы можем выделить следующие специальные классы сигналов:

- внешние входные сигналы (факторы), стрелка на блок-схеме, входящая в рассматриваемую блок-схему;
- внешний выходной сигнал, показанный стрелкой от блок-схемы, и не заканчивающийся в рассматриваемой блок-схеме;
- внутренний сигнал, стрелка, концы которой связаны с подсистемами внутри блок-схемы.

Говорят, что внешние сигналы связаны с окружающей средой или исходят из нее. Внутренние сигналы – это те сигналы, причина (происхождение) и следствие (воздействие) которых связаны с (под)системами в самой блок-схеме.

Сигналы могут подключаться к более чем одному блоку. Когда это происходит, мы видим, что направленная линия, представляющая сигнал, раздваивается.

Сигнал может быть как внутренним, так и внешним (выходным) сигналом.

Другие примеры блок-схем приведены на рис. 1.7.

На рис. 1.7а показаны три блока, соединенных последовательно слева направо. Блок  $K$  с внешним входом  $u$  и с выходом, включенным в сумматор, который также имеет внешний вход  $d$ , выход из сумматора ведет к блоку  $G$  с внешним выходным сигналом  $y$ . Выход  $y$  раздваивается, передавая одну и ту же информацию на два разных элемента в окружающей среде, не показанных на рисунке. В форме уравнения мы можем написать, что  $y = G(d + Ku)$  или, говоря словами,  $y$  является выходом блока  $G$ , воздействующего на входной сигнал  $Ku + d$ .

На рис. 1.7b имеется три внешних входных сигнала  $r$ ,  $d$  и  $n$  и восемь подсистем, пять из них – блоки, обозначенные как  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $K$ ,  $G$ ,  $H$ , плюс три блока суммирования. Сигналы  $r$  и  $u$  раздваиваются. Выходной сигнал  $y$  является как внутренним, так и внешним сигналом. Чтобы написать соотношения, выраженные в виде этой блок-схемы в формате уравнения, мы рассматриваем точки суммирования слева направо:  $u_f = K(F_2r - Hy)$ ,  $y = G(u_f + u_b, d) + n$ , где  $u_b = F_1r$ ; или словами  $u_f$  – выход блока  $K$ , действующий на сигнал  $F_2r - Hy$ ,  $y$  – сумма внешнего сигнала  $n$  и выхода блока  $G$ , воздействуют на объединенный сигнал  $(u_f + u_b, d)$ .



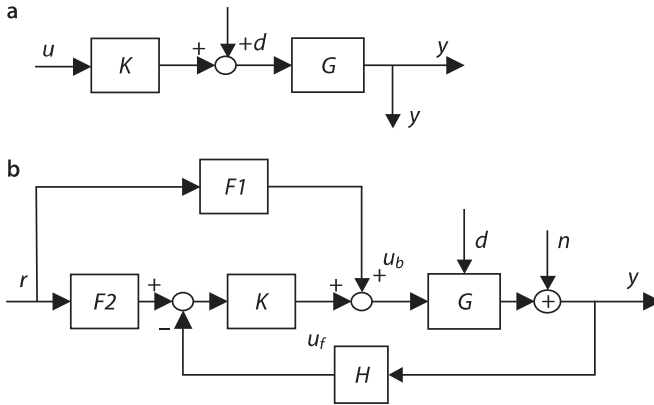


Рис. 1.7. Примеры блок-схем: а – разомкнутый контур; б – замкнутый контур

## 1.4. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ И ДИНАМИКА

Обратная связь и причинность неразрывно связаны, и поэтому время играет важную роль в понимании того, что обратная связь действительно работает. Наши примеры ранее могли создать впечатление, что обратная связь проста и всегда имеет положительный эффект, но это, конечно, не так.

### 1.4.1. Обратная связь в душе

В качестве примера рассмотрим, как мы изо всех сил пытаемся найти правильную температуру воды в душе с ручным смесителем. Лучшая стратегия заключается в тщательном выборе положения смесителя и ожидании, пока вода достигает относительно стабильной температуры перед повторной регулировкой кранов. Попытки быстрой корректировки неизменно приводят к значительным колебаниям температуры воды и дискомфорту от душа.

В чем проблема? Проблема в задержке движения. Наша коррекция положения кранов смесителя зависит от текущей температуры воды. Однако температура на нашей коже сильно отличается от температуры воды в смесительном кране из-за времени, необходимого для прохождения воды от смесителя до нашего тела. Действительно, при типичных условиях потока в душевых колонках время в пути от смесителя намного больше, чем время, которое требуется нам, чтобы отреагировать на неприятную температуру воды. Если мы быстро откроем кран с горячей водой, когда вода ощущается как слишком холодная, мы почувствуем горячую воду после небольшой задержки. Реагируя, мы быстро закрываем кран, только чтобы получить спустя некоторое время немного ледяной воды и т. д. Быстрая обратная связь создает неприятные колебания температуры. Решение заключается в замедленном отклике и постепенной регулировке смесительного крана.

Кстати, смеситель с термостатом не имеет этой проблемы, поскольку он измеряет температуру воды там, где (и когда) горячие и холодные потоки смешались.

Проблема становится еще более интересной, когда несколько душевых подключается к одному и тому же источнику горячей воды, – как будут взаимодействовать динамические свойства распределительной сети и потребителей. При реализации обратной связи мы должны уважать динамику взаимодействующих между собой систем.

### 1.4.2. Акустическая обратная связь

Хорошо известное явление акустической обратной связи (см. рис. 1.8) также можно объяснить задержкой в сочетании с обратной связью. Микрофон, расположенный перед динамиком, будет вызывать неприятный громкий свистящий звук<sup>13</sup>, высота которого связана с расстоянием от микрофона до динамика<sup>14</sup> и степенью усиления в контуре звуковой обратной связи.

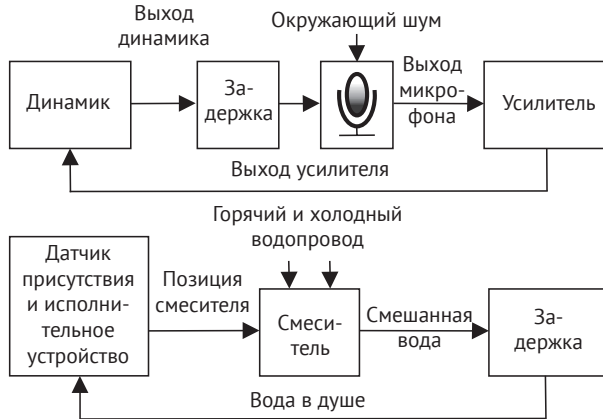
### 1.4.3. Контроль уровня воды в паровом котле

Аналогичная проблема возникает, когда мы пытаемся автоматически поддерживать уровень воды в паровом котле, используя что-то вроде поплавкового механизма для смыва унитаза. В котле по мере образования пара уровень воды поднимется из-за расширения, но, что еще более важно, он поднимется из-за образования пузырьков водяного пара внутри объема воды. Вспомните, что происходит, когда мы помещаем кастрюлю с молоком на плиту. Как только оно начинает кипеть, уровень жидкости быстро увеличивается, хотя количество молока в кастрюле не изменилось. По мере испарения воды общее количество воды в паровом котле начнет падать. Когда измеренный уровень воды оказывается слишком низок, механизм обратной связи добавит новую, более холодную воду. Эта холодная вода снижает температуру, тем самым уменьшая количество водяного пара и, следовательно, общий уровень воды. Это может привести к снижению измеренного уровня воды, несмотря на добавленную воду. Прямо противоположный эффект тому, что было задумано! Простая обратная связь, основанная только на уровне воды, не поможет обеспечить правильную реакцию; необходимо найти более сложное решение обратной связи.

В большинстве случаев обратная связь требует очень вдумчивого подхода. Устранение обратной связи, конечно, не ответ. В общем случае обратная связь требует для гарантии успешного результата систематического проектирования.

<sup>13</sup> Это явление также называют «микрофонным эффектом». – *Прим. перев.*

<sup>14</sup> Расстояние определяет как задержку (равную расстоянию, деленному на скорость звука), так и потерю мощности звука между динамиком и микрофоном. – *Прим. авт.*



**Рис. 1.8.** Контур обратной связи создает проблемы: неприятности, вызванные задержкой распространения

Рассмотрим популяцию кроликов, которые пользуются неограниченным запасом пищи при отсутствии настоящих хищников. В этих утопических условиях уровень рождаемости (процент новых особей в общей численности популяции) будет больше, чем уровень смертности (процент умерших особей). Как следствие, эта популяция кроликов будет продолжать расти.

Этот случай иллюстрирует контур *положительной* обратной связи, которая всегда ведет к неограниченному ускорению роста (некрасивая перспектива).

Предположим теперь, что запасы пищи постоянны, а уровень рождаемости пропорционален количеству пищи, доступной каждой особи. В этом случае при увеличении популяции количество пищи на одно животное уменьшается, а вместе с ним и рождаемость. В некоторый момент времени рождаемость сравняется со смертностью. В этот момент будет достигнуто равновесие, и общая численность особей останется неизменной.

В этом случае действует *отрицательная* обратная связь: увеличение численности (поскольку рождаемость больше, чем смертность) приводит к уменьшению доступности пищи и, следовательно, к снижению рождаемости. Точно так же уменьшение численности приведет к увеличению рождаемости. Мы говорим, что равновесие (рождаемость равна смертности) стабильно, так как небольшое отклонение от равновесия приводит к ответной реакции в восстановлении равновесия.

Обычно считается, что отрицательная обратная связь связана с устойчивым равновесием, а положительная обратная связь – с нестабильностью. Хотя в общем случае это слишком упрощенная точка зрения.

### 1.4.5. Производство и роботы

Промышленная революция и связанное с ней массовое производство товаров стали возможными благодаря паровой машине. Безопасная работа последней обусловлена простым устройством обратной связи – регулятором скорости вращения. К сожалению, регулятор не всегда работал хорошо. В некоторых ситуациях возникали большие колебания скорости, что очень вредило производственному процессу, который паровая машина приводила в действие. Ока-

залось, что это было связано с тем, как двигатель взаимодействовал с производственной линией. Простого решения не было. Эта проблема привела к первому математическому исследованию обратной связи в середине XIX века. Большое экономическое значение проблемы привлекало внимания таких гигантов мира науки и техники, как Максвелл (более подробное рассмотрение см. в главе 8).

С первых дней промышленной революции механизация производства стала основным фактором развития обратной связи. Сегодня производство широко использует роботов – сложные машины, которые выполняют повторяющиеся задачи в универсальной производственной ячейке. Новые вызовы для разработки устройств с обратной связью появляются в координации действий многих роботов. Сложность движения робота в трехмерном пространстве в сочетании с непрерывными перемещениями для повышения производительности и с необходимостью высокой точности размеров конечного продукта заставляет даже самых тяжелых стальных роботов вибрировать, как гибкие конструкции. Сочетание силы, скорости, точности и гибкости в сложных движениях вызывает необходимость сложных компромиссов, требующих нетривиальной конструкции обратной связи. Мы восхищаемся тем, как хорошо справляются с этим современные конструкции.

### 1.4.6. Разработка и синтез обратной связи

Приведенные примеры уже могут дать намек на то, что, хотя системы могут естественным образом содержать обратную связь, ее не так просто правильно реализовать.

Действительно, обратную связь необходимо планировать, и она должна служить определенной цели или задаче, обратная связь ради обратной связи – бессмыслица. Информация, на которую реагирует обратная связь, должна быть доступна – помните, что обратная связь реагирует на информацию о том, что ее цель не достигнута. Обычно это требует наличия специальных датчиков, которые позволяют измерить, достигнута ли цель обратной связи. Информация от датчиков должны быть правильно интерпретирована, и должно быть ясно, как воздействовать на систему с обратной связью для достижения желаемой цели. Это требует средства преобразования информации обратной связи в действие через механизмы или подсистемы, называемые исполнительными устройствами. Следующие аспекты требуют разработки:

- какова цель обратной связи, какую цель необходимо реализовать? Правильно ли это сформулировано? Например, грузовик не может ездить как гоночный болид Формулы-1, как и автомобиль Формулы-1 не может использоваться для перевозки нескольких тонн грузов. Цели должны соответствовать имеющимся ресурсам;
- можно ли проверить цель? Какие датчики следует использовать? Нет никакого смысла в цели, которую никто не может измерить или проверить;
- как информация датчика может быть преобразована в действие? Если информация доступна, этого должно быть достаточно, чтобы иметь возможность принять решение о следующем действии;
- как действовать в системе? Какие исполнительные устройства необходимы? Достаточно ли их способности (мощности, энергии, силе...) для адекватного реагирования? Знать, что делать, хорошо, но можно ли это сделать?

Все эти и многие другие вопросы мы рассмотрим в дальнейшем.

## 1.5. СИСТЕМЫ, ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННАЯ СВЯЗЬ, СТАЦИОНАРНОСТЬ И ЛИНЕЙНОСТЬ

Прежде чем пытаться синтезировать обратные связи, стоит понять поведение системы, провести некоторый анализ динамики систем, в частности контуров обратной связи.

Системный анализ рассматривает сигналы, которые связаны с интересующей системой. Сигналы и системы всегда идут рука об руку: сигналы поступают от систем измерения, и системы анализируются посредством сигналов, которые они производят (см. рис. 1.9). Нас могут интересовать сами сигналы и какую информацию они несут, причем нам может быть все равно, как эти сигналы производятся внутри системы (рис. 1.9а). Например, если кто-то интересуется приливами, многое можно сделать, не задаваясь вопросом, что представляет собой система, порождающая прилив. Можно просто изучить движение во времени, понять максимальное-минимальное значение, частоту, высоту, приливную силу и т. д. Можно было бы даже использовать приливный источник энергии и разработать приливную станцию, не привязывая прилив к положению Земли относительно Луны и Солнца.

Если нас в основном интересуют собственно системы, производящие сигналы, нам нужно посмотреть на их структуру и на то, как они взаимодействуют внутри (рис. 1.9б).

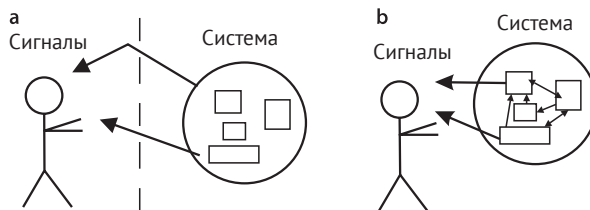


Рис. 1.9. Сигналы и системы

Например, для создания ирригационной системы важнее всего инфраструктура, компоненты, их взаимосвязь, их размеры, максимальные усилия, которые они должны выдерживать, но не обязательно знать точное динамическое поведение воды в каналах. В общем-то, как сигнальные, так и системные аспекты следует рассматривать вместе.

### Поведение

Мы используем термин *поведение*<sup>15</sup> для совокупности всех возможных сигналов, которые можно наблюдать на выходе системы или связанных с ней. Не все сигналы должны быть измерены, и входы (сигналы, которые воздействуют на систему), и выходы (сигналы, которые направлены вовне) не всегда измеримы.

Не все сигналы в процессе обязательно используются на блок-схеме или в описании системы. Например, мы можем довольствоваться механическим

<sup>15</sup> Этот термин был введен бельгийским математиком Яном К. Виллемсом, мыслителем и вдохновляющим учителем. – Прим. авт.

описанием прилива, используя водные потоки и уровни воды, в том числе влияние гравитационной силы, но мы можем полностью игнорировать соленость, pH, температуру и цвет воды. Мы определяем границу блок-схемы, а также что такое вход, а что выход (следовательно, система рассматривается как часть окружающей среды).

В нашем обсуждении обратной связи в душе температура воды в нем явно является выходом системы. Ее легко измерить или наблюдать, и она, очевидно, зависит от температуры горячего и холодного водоснабжения, а также от положения смесительного клапана. Температура горячего водоснабжения является входом, так как понятно, что сам душ не влияет на температуру подаваемой воды. Температура воды сразу после смесителя является выходом, но мы обычно не можем наблюдать эту температуру. Точно так же температура воды в горячем и холодном водопроводах являются сигналами, но измерить их непросто. Поведение нашего душа может быть описано просто набором всех положений смесителя в сочетании с соответствующими значениями температуры душа.

До сих пор в этом примере с душем мы фокусировались только на температуре воды, более полное описание также должно учитывать расход воды. Для этого мы должны брать в расчет и давление. Например, можно включить в рассмотрение давление воды для горячего и холодного водоснабжения, а также напор в смесительной камере. Эти сигналы также могут быть включены в поведение душа, и мы могли бы сказать, что они поступают из окружающей среды.

Мы могли бы попытаться описать систему через ее *поведение*. Это мучительно сложно, поскольку обычно поведение содержит бесконечно много сигналов и требует наблюдений в течение сколь угодно больших промежутков времени<sup>16</sup>. Только представьте, что нужно, чтобы наблюдать хотя бы все возможные сигналы (помните, что это функции времени!), связанные с душем, не говоря уж о попытке описать поведение экосистемы. Хотя мы не можем наблюдать всю совокупность поведения, тем не менее доступные нам частичные наблюдения также крайне полезны. Как их следствие, мы с радостью выдвинем гипотезы и предоставим описания общего поведения на основе частичных наблюдений – это ведь и есть научный метод.

Несмотря на невозможность охватить всю картину в целом, поведение является важным инструментом для понимания таких свойств системы, как *причинно-следственная связь, стационарность и линейность*. Они обеспечивают нам хорошую возможность заложить аксиоматический фундамент теории систем.

### Причинно-следственная связь

Система является причинно-следственной, когда для любого сигнала будущее не может повлиять на его прошлое. Поскольку в наших дискуссиях сигналы являются функциями времени, причинно-следственная связь является естественным свойством. Действительно, немислимо, чтобы текущая температура в душе могла зависеть от будущего положения водопроводных кранов.

На самом деле наш душ – это причинно-следственная система.

<sup>16</sup> Есть заметное исключение – класс систем, называемых автоматами. По своей сути цифровые компьютеры – это автоматы, для которых существует лишь конечное число состояний, и поэтому поведение описать возможно. – *Прим. авт.*

## Стационарность

Система называется стационарной, если для любой пары входных/выходных сигналов, относящихся к ее поведению, сдвинутая во времени версия этих сигналов также относится к поведению. В случае с нашим душем это примерно означает, что ощущения от воды не зависят от того, в какой день недели вы принимали душ (мы говорим о положении водопроводных кранов и температуре воды).

## Линейность

Система или поведение являются линейными, если линейная комбинация сигналов в поведении также сказывается в поведении. Более подробно линейная комбинация двух входных сигналов связывается с выходным сигналом, который получается с помощью такой же линейной комбинации выходных сигналов, связанных с конкретными рассматриваемыми входными сигналами. Линейная комбинация сигналов состоит из операций, которые включают масштабирование (например, умножение на константу) и сложение сигналов.

Очевидно, что душевая система не является линейной. Действительно, мы не можем даже помыслить о линейной комбинации сигналов, поскольку положения вентиляей, очевидно, ограничены и находятся где-то между полностью закрытыми и полностью открытыми. Таким образом, о произвольном масштабировании позиций вентиляей не может быть и речи. Более того, для большинства смесителей характеристики кранов, как известно, являются нелинейными, и эффект от не полностью открытого крана очень сильно зависит от того, какой объем потока уже проходит через отверстие. Тем не менее при любом заданном положении кранов и соответствующей температуре душа небольшие изменения в положении кранов приведут к небольшим изменениям температуры в душе. Эти небольшие изменения, как правило, следуют линейной зависимости.

Эти наблюдения справедливы в целом. Большинство систем действительно нелинейны, но при незначительных изменениях в поведении какого-либо конкретного сигнала линейность будет сохраняться.

Несмотря на то что большинство систем нелинейны, большая часть теории систем управления тем не менее связана с линейными системами. Действительно, большая часть проектирования и синтеза выполняется с использованием линейных систем. Линейность обеспечивает эффективные вычисления, и даже к нелинейным системам обычно подходят с вычислительной точки зрения как к набору из множества линейных систем. Линейность – чрезвычайно упрощающее свойство, оно значительно упрощает анализ и синтез систем с обратной связью. Поэтому неизменно то свойство, с которого нужно начинать. Более того, как станет яснее далее, часто обратная связь дает гарантию, что линейность сохраняется в качестве хорошего приближения.

## Состояние системы

Совершенно особый класс сигналов – так называемое *состояние* системы. Состояние – это совокупность сигналов, так что знание текущего значения этого состояния в сочетании с настоящим и будущим входных сигналов дает нам достаточно информации, чтобы иметь возможность определить, каким будет



будущее состояние. Другими словами, состояние суммирует соответствующее прошлое.

Например, в примере с туалетом уровень воды в бачке является сигналом состояния. Действительно, имея эту информацию и будущие положения клапанов, мы можем предсказать будущую эволюцию уровня воды.

Состояние часто является труднодоступным или непосредственно недоступным для измерения. Однако это наиболее удобное средство для моделирования и анализа системы. Действительно, любое моделирование или вычисление поведения системы требует построения состояния, поскольку это построение означает наличие достаточной информации для обеспечения возможности моделирования.

Полное знание состояния системы – это особенное, на самом деле редкое событие, и, поскольку оно содержит всю информацию, которую нам необходимо знать о системе (помимо настоящих и будущих входных сигналов) для прогнозирования будущего, оно предоставляет нам огромные возможности для построения системы управления и обратной связи.

В системах, описывающих физический мир, понятие состояния наиболее легко ассоциируется с системными резервуарами энергии или материалов. Более абстрактно, даже если у нас нет физической концепции энергии, с которой можно было бы соотнести историю реакции системы, она может функционировать как состояние.

Эти концепции будут более подробно рассмотрены в главе 5.

## 1.6. Модели

В общем, получение поведения системы путем сбора всех возможных пар входных/выходных сигналов, совместимых с системой, является невыполнимой задачей. Мы должны найти более компактный способ, что-то, что было бы более доходчиво. В настоящее время мы обычно пытаемся описать поведение и, следовательно, систему с помощью компьютерной программы. В принципе, алгоритм может выражать правило, позволяющее нам решить, относится ли тот или иной сигнал к поведению, или нет. Даже это тяжело, и модели часто лишь дают рецепт для описания поведения, которое предположительно представляет собой интересующее физическое поведение. Задача получения такого рецепта или правила (алгоритма) называется *моделированием*.

Обсуждение получения уравнения или модели для системы помогает сосредоточиться на процессе перехода от данных к модели, который, по сути, лежит в основе моделирования. Это проявление научного подхода: собираются данные, а модель – это не что иное, как гипотеза, согласующаяся с этими данными. Недостижимый набор всех возможных данных, которые могут быть получены из системы, – это ее поведение. Наши наблюдения по необходимости являются выборкой из поведения. В этой довольно простой и очень общей теоретико-множественной структуре основные идеи о моделировании, иерархии моделей и систем проявляются достаточно ясно. Мы не будем рассматривать эти нюансы подробно, но это помогает держать в фокусе ряд концепций.

Полученные алгоритмы обычно называются моделями. Модель является более или менее совершенной, в зависимости от количества входных/выход-



ных сигналов, которые она способна исключить, обеспечивая при этом лучшее описание поведения. Часто нам приходится довольствоваться приблизительными моделями, моделями, которые не включают все возможные сигналы и не исключают все те, что должны были быть исключены, или которые описывают поведение лишь некоторым приблизительным образом, скажем, с точностью до погрешности измерения.

Модели не обязательно должны быть представлены в виде компьютерных программ. Программы – это всего лишь современная удобная технология для недвусмысленной интерпретации. Например, знаменитая модель Кеплера<sup>17</sup> для описания поведения планет в нашей Солнечной системе состоит из трех предложений<sup>18</sup>.

1. Орбита планеты представляет собой эллипс, в фокусе которого находится Солнце.
2. Отрезок прямой, соединяющий планету с Солнцем, охватывает равные площади за равное время.
3. Квадрат периода обращения вокруг орбиты пропорционален кубу длины малой оси эллипса.

Эта мощная модель, какой бы неточной она ни была, позже позволила Ньютону<sup>19</sup> сформулировать законы гравитации. С точки зрения теории управления это довольно неинтересная модель, поскольку мы абсолютно ничего не можем с этим поделать: у нее нет входных данных. Конечно, она воплощает в себе важные знания, если вы хотите запустить какой-то объект в нашу солнечную систему или понять ход прилива.

В качестве другого примера модели Ньютон сформулировал свои законы движения твердых тел, используя три утверждения. Из законов движения Ньютона мы можем вывести законы Кеплера, и, следовательно, законы Ньютона формируют более мощную модель движения планет.

Вот в законах движения Ньютона с точки зрения теории управления как раз нет абсолютно ничего скучного.

### 1.6.1. Моделирование

Наиболее распространенным способом работы с сигналами и системами является представление их с помощью моделей, и наши модели неизменно подвержены влиянию наших интересов и цели, которую мы преследуем при их создании. С последнего всегда стоит начинать – без четко сформулированной цели любое упражнение по моделированию обречено на провал (потому что вы не можете сказать, удалось вам оно или нет).

Моделирование требует учета таких аспектов, как:

- для чего предназначена эта модель? На какие вопросы нужны ответы?
- какие физические принципы здесь действуют?

<sup>17</sup> Иоганн Кеплер (1571–1630) – немецкий математик и астроном. Учился в Тюбингенском университете и читал лекции в университете Граца (Австрия). – *Прим. авт.*

<sup>18</sup> Этот пример взят из работы Я. К. Виллемса (J. C. Willems, 1997). – *Прим. авт.*

<sup>19</sup> Исаак Ньютон (1643–1727) – английский физик и математик, один из величайших умов всех времен. – *Прим. авт.*

- существует ли уже компьютерный алгоритм, который необходимо проверить? Что может быть в нем оспорено?
- есть ли предварительная модель, которая нуждается в доработке? Существует ли очень сложная модель, которую необходимо упростить?
- существует ли концептуальная блок-схема? Какие переменные имеют значение? Какие из них менее важны?
- можно ли оспорить блок-схему?
- какие эксперименты необходимы для выявления недостающей информации? Какие эксперименты осуществимы?
- какие сигналы необходимы? Чего мы можем ожидать (дальность действия, повторяемость, стационарность, случайные факторы)?

Как только интересующие сигналы идентифицированы, требует внимания процесс их измерения, и его назначение связано с конечной целью получения модели. В частности, следует принимать во внимание следующие вопросы:

- что следует измерять? Возможно ли прямое измерение или интересующий сигнал должен быть выведен на основе измерений? Насколько надежен этот вывод?
- насколько точно следует измерять различные сигналы?
- какие датчики требуются? Определите дальность действия, точность и скорость срабатывания датчиков. Требуется ли избыточность?
- насколько воспроизводимы результаты измерений? Учтены ли все соответствующие аспекты?
- зависимы ли измерения? Есть ли в них избыточность? Можно ли откалибровать процесс измерения независимо от задачи моделирования?

Несмотря на то что моделирование так же старо, как наше желание понять мир и управлять им, оно по-прежнему остается настолько же искусством, насколько наукой, и опыт играет важную роль.

Возможно, удивительно, а возможно, и нет, что многие сигналы (даже из совершенно разных физических областей) и поведение многих систем описываются одними и теми же или очень похожими (компьютерными) моделями. Конечно, физическая реальность, переменные, параметры, единицы измерения и шкалы могут быть разными, но суть поведения заключается не в этом. Тот факт, что существует аналогия между различными системами, предоставляет прекрасную возможность для абстрагирования и позволяет нам создать объединяющую основу для анализа и синтеза систем.

### 1.6.2. Объединение систем

Системы обычно состоят из подсистем, взаимосвязанных друг с другом (обратите внимание на блок-схемы!). Чтобы построить новую систему, мы можем соединить подсистемы таким образом, чтобы некоторые выходы одной подсистемы становились входами для другой, в более общем плане объединение систем просто означает совместное использование сигналов. Очень простое соединение двух систем заключается в том, чтобы выходные данные одной системы были входными данными для другой. Это называется каскадным или последовательным соединением. Куда интереснее создавать контуры обратной связи. В случае обратной связи некоторые выходные данные, полученные

от подсистемы, будут влиять (через контур обратной связи) на некоторые из ее входов и, следовательно, на выходные данные.

Интуитивно ясно, что объединение подсистем приводит к их новому поведению, которое зависит от коллективного поведения. По необходимости межсоединения накладывают ограничения на некоторые сигналы там, где раньше таких ограничений не было. Входные данные представляют собой независимые сигналы с точки зрения системы, для которой они являются входными данными, но в силу взаимосвязи некоторые из них теперь оказываются выходами из другой части системы или совместно используемыми и, следовательно, больше не являются независимыми в целостной системе. Таким образом, мы можем сказать, что набор сигналов, которые поддерживаются контуром обратной связи, менее богат, чем без обратной связи. Действительно, успешная обратная связь устраняет нежелательные сигналы и подчеркивает предпочтительное поведение. В отличие от такого упрощения, с точки зрения анализа обратная связь обычно усложняет ситуацию, но это не оправдание для того, чтобы ее не использовать. Без обратной связи больше сигналов остаются независимыми, следовательно, их легче понять. Конечно, обратная связь также приводит к более интересному, а иногда и неожиданному поведению, и именно в этом заключается ценность обратной связи.

## 1.7. БАЗОВЫЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ

Базовый контур управления состоит из датчиков для измерения того, что имеет значение, способности интерпретировать данные и принимать решение о действии, которое затем реализуется с помощью некоторого исполнительного механизма. Это очень похоже на то, как люди или животные управляют задачами, которые они намеревались выполнить: чувствуют, интерпретируют, действуют. Рассмотрим в качестве примера относительно простую контрольную задачу, которую вы выполняете прямо сейчас, а именно чтение этого текста:

- инициация этого действия, т. е. наличие намерения, выделение времени и принятие решения прочитать этот текст, уже были выполнены;
- мыслительные процессы позволяют вам читать текст, видеть слова и помещать их в контекст;
- память активируется для сохранения некоторой информации, но, что более важно, для того, чтобы вспомнить другую информацию из вашего опыта, вызванную новой информацией, которую вы приобретаете;
- окрашенный эмоциями интеллект позволяет вам интерпретировать прочитанное на основе ваших предыдущих знаний, систематизировать новую информацию и сохранять ее для дальнейшего использования;
- мотивация побуждает вас продолжать чтение, концентрироваться (блокируя другие сенсорные сигналы) и проявлять настойчивость (ну, мы на это надеемся) и последнее по порядку, но не по значению;
- ваши глаза, пальцы и поза скоординированы таким образом, чтобы вы могли читать с нужной скоростью.

Неудивительно, что спроектированные системы управления, по крайней мере концептуально, во многом повторяют структуру и организацию подобных действий. Действительно, частью изучения темы управления является

движимое чистым любопытством стремление лучше понять чудеса человеческого управления и коммуникации. В 1940-х годах Норберт Винер<sup>20</sup> предложил красивое, но уже не популярное слово для обозначения этой области: кибернетика<sup>21</sup>. Мечта о создании полностью автономных механизмов все еще остается мечтой. Тем не менее в некоторых областях развитие теории управления сыграло важную роль в обеспечении автономности выполнения задач с невероятной точностью, надежностью и повторяемостью.

Вот из чего состоит базовая система (подсистема) управления (см. рис. 1.10):

- *датчики и системы сбора данных (DAS)*. Датчики реагируют на физические раздражители (тепло, свет, звук, давление, магнетизм, движение и т. д.) и записывают или передают отклик. Обычно они включают в себя преобразователи, которые преобразуют воспринимаемый сигнал в другую разновидность сигнала, в настоящее время часто в цифровой формат;
- *цифровые сигнальные процессоры (DSP)* выполняют масштабирование, фильтрацию, сглаживание или любую другую функцию предварительной обработки. Они могут быть автономным компонентом в цепочке связи между системой сбора данных и управляющим компьютером (контроллером) или быть внедрены в него или в систему сбора как составная часть;
- *контроллер* – специализированный микропроцессор или компьютер общего назначения с памятью для хранения процедур, алгоритмов, а также данных, оснащенный каналами связи для управления и/или повторного программирования, а также для приема информации от DAS и отправки информации исполнительным устройством. Контроллер вычисляет управляющие воздействия и контролирует их выполнение. Алгоритмы либо применяются напрямую, либо основаны на знании модели процесса (объекта управления), сигналов, а также целей текущей задачи управления;
- *исполнительное устройство*, которое получает команды от управляющего компьютера и преобразует их, как правило, с использованием дополнительных источников питания, во входные данные, управляющие процессом.

Мозгом подсистемы управления является управляющий компьютер, но координация с датчиками и исполнительными устройствами, основанная на глубоком понимании контролируемого процесса, имеет основополагающее значение для того, чтобы управляемая система работала должным образом.

<sup>20</sup> Норберт Винер (1894-1964) — американский математик и инженер. Окончил университет по специальности «математика» в возрасте 14 лет. В возрасте 18 лет защитил докторскую диссертацию в Гарвардском университете. Стал профессором Массачусетского технологического института и заложил основы большей части современной теории обработки сигналов и управления. Его называют отцом кибернетики. — *Прим. авт.*

<sup>21</sup> Кибернетика — от греческого слова κυβερνητική («кибернетике»), означающем «искусство управления» (отсюда же слова *губернатор* и *гувернер*). Наука о процессах связи и управления в машинах, живых организмах и обществе, которая особенно занимается сравнительным изучением систем автоматического управления (таких как нервная система и мозг, а также системы механически-электрической связи). — *Прим. авт.*

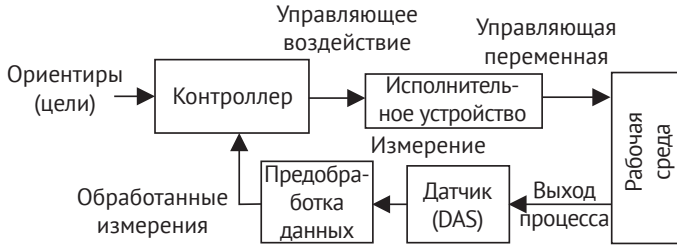


Рис. 1.10. Компоненты базового контура управления

Системы управления сильно различаются по сложности. В простейших из них управляющий компьютер – это не что иное, как соединение между датчиком и исполнительным устройством, как поплавков в механизме смыва унитаза. В других средах, таких как управление мировой экономикой, именно человек в контуре принимает решение о том, каким будет следующее действие. В настоящее время довольно часто датчики, исполнительные устройства и управляющие компьютеры расположены не поблизости, а взаимодействуют через коммуникационную сеть или подсистему связи точно так же, как в контуре управления человеком, датчики, мышцы и мозг подключены через нервную систему.

В некоторых случаях контроль может осуществляться на основе знаний о процессе и требуемых целях, без использования информации о его фактическом развитии. В этом случае управление осуществляется в разомкнутом контуре, следовательно, без обратной связи.

## 1.8. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Синтез контрольной задачи всегда начинается с цели управления. Является ли автоматизация желательной, необходимой, выгодной, незаменимой? Какая цель должна быть достигнута? Каковы альтернативы?

Например, мы хотим, чтобы торможение в автомобиле для повышения безопасности и уменьшения травматизма на дорогах осуществлялось с помощью компьютера.

Тормоз, конечно, является важным устройством безопасности в автомобиле, поэтому надежность будет иметь первостепенное значение. У нас накоплен большой опыт в опознавании и приведении в действие тормоза, поэтому мы можем решить использовать существующие компоненты и сосредоточиться на том, как добиться лучшего торможения, основная цель которого – обеспечить максимальное замедление независимо от состояния дороги. В общем, даже когда цель ясна, необходимо решить, что воспринимать, как воспринимать, что приводить в действие и как именно. Здесь действует приятная положительная обратная связь: новые разработки в области датчиков и исполнительных устройств стимулируют развитие автоматизации, а более высокие ожидания в области автоматизации стимулируют развитие технологий датчиков и исполнительных устройств.

Современный дизайн системы управления, как правило, основан на модели контролируемого процесса, так что мы можем протестировать и оценить производительность системы без необходимости экспериментальной проверки каждого рассматриваемого варианта, что было бы непомерно дорого. Существует

нетривиальное взаимодействие между моделированием и управлением. Чем лучше модель, тем больше мы можем попытаться сделать с помощью управления. Чем лучше управление, тем меньше нам нужно знать о модели за пределами контролируемого поведения. Некоторые аспекты модели не имеют отношения к управлению, другие имеют решающее значение. В приложениях управления чрезмерное использование моделирования довольно распространено, существует склонность моделировать все, а не только решения задачи управления.

Торможение – сложный процесс, так как резиновая шина взаимодействует с другой поверхностью (не только с бетонной дорогой, но и с тонким слоем льда, заболоченной поверхностью, грязевым слоем, гравием). Должны ли мы определять тип дороги, или можем получить достаточную информацию по характеру воздействия на колесо? Насколько важно знать давление внутри шин? Как скоординированы тормоза на разных колесах? Распределение веса в автомобиле будет влиять на тормозную способность каждого колеса. Моделирование нетривиально, но в данном случае весьма важно, а метод проб и ошибок заведет нас очень далеко.

Получив приемлемую модель процесса, включающую модели датчиков, исполнительных устройств и каналов связи, и имея четко определенную цель, можно приступать к фактическому проектированию алгоритма управления. Инструменты варьируются от эвристик, основанных на опыте, до гибридных методов оптимизации. Прогресс теории управления таков, что многое из того, что может быть достигнуто, а что не может (т. е. фундаментальные пределы системных взаимодействий), в настоящее время хорошо установлено. Часто процесс проектирования будет итеративным. Решения принимаются, тестируются на основе проектных, а затем более сложных моделей, цели уточняются, процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворительный результат.

Как только процесс управления будет отлажен, его можно будет оценить и ввести в эксплуатацию в физическом мире. Созданы и протестированы прототипы (значительно выходящие за рамки нормальных условий эксплуатации), а также определены режимы отказов. На основе этих результатов конструкция либо дорабатывается, либо передается в производство для окончательной реализации.

## 1.9. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

*Теория систем* – это изучение сигналов, систем и их моделей: как их описывать, анализировать и классифицировать. В основе конструирования систем управления лежит способность создавать новые системы с новым поведением путем простого соединения систем. Как системы зависят друг от друга, как они взаимодействуют? С инженерной точки зрения наиболее важным является то, как синтезировать или проектировать новые сигналы и системы с желаемыми свойствами, как использовать системы и сигналы в качестве кирпичей и строительного раствора.

Большая часть этого исследования проводится на высоком уровне абстракции, с использованием математики, в основе которой лежат вычисления. Цель состоит в изучении внутренних свойств сигналов, систем или моделей, а не их конкретной физической реализации.

Большой объем работ по общему изучению теории систем посвящен процессу извлечения из наблюдений модели, описывающей эти наблюдения, так на-



зываемому преобразованию данных в модель, или моделированию. В теории систем нас на самом деле не интересуют детали реализации процесса перехода от данных к модели; например, как собираются или хранятся данные, будь то в мозге, в компьютере или с помощью ручки и бумаги. Скорее, нас интересуют внутренние, т. е. независимые от представления проблемы, касающиеся данных, систем, в которых они используются, производных от них и поддерживаемых ими моделей. Должны быть изучены такие объекты, как взаимосвязи между данными, между моделями или между свойствами данных и свойствами модели, между назначением модели и требуемыми данными.

Это исследование сигналов, систем и моделей на самом деле не ново. С самого зарождения цивилизации мы были заинтересованы в объяснении того, что мы наблюдаем, т. е. в выявлении полезных взаимосвязей между наблюдениями, что является не чем иным, как построением (различных) моделей (в нашем сознании) для наблюдаемого мира. В этом суть научного процесса. Способность объяснять, по-видимому, не только наделяет нас авторитетом и странным чувством достижения, как будто мы сами создали окружающий нас мир, но, что более важно, наши объяснения используются для изменения того, как мы взаимодействуем с другими людьми и действительно изменяем наше физическое окружение. Что, возможно, действительно новое и характерное для теории систем, так это то, что мы изучаем сигналы и системы гораздо более абстрактно, не обращаясь к их физической реализации, а скорее через их общие свойства и структуры, выявляемые с помощью математического анализа.

Значительные достижения были достигнуты благодаря системам управления сложными крупномасштабными химическими процессами и крупномасштабными инженерными сетями в исполнительных устройствах, в телекоммуникациях, в автопилотах, в полетах на Луну и Марс. В последнее время теория и практика управления развиваются благодаря потенциалу интернета и беспроводных сетей датчиков и исполнительных устройств для использования в домашней автоматизации, контроле человеческого тела и интеллектуальных транспортных системах или интеллектуальной инфраструктуре.

Целые книги с самых разных точек зрения по эконометрике, статистике, психологии, инженерные работы написаны на те темы, которые мы затронули. В конце концов, сигналы имеют фундаментальное значение для изучения окружающего мира. Более того, моделирование присуще человеческому существованию: *cogito ergo sum*<sup>22</sup> – это один из главных столпов научного процесса, фундаментальный для всей науки и техники.

## 1.10. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ЧТЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теория систем и управления – относительно молодая дисциплина, которая берет свое начало в кибернетике, введенной Норбертом Винером (Wiener, 1948, 1961<sup>23</sup>) сразу после Второй мировой войны. Теория систем имеет не-

<sup>22</sup> «Мыслю, следовательно, существую» – знаменитое выражение Рене Декарта, французского философа и математика (1596–1650). – *Прим. авт.*

<sup>23</sup> Названия рекомендуемых в тексте источников приводятся полностью в списке рекомендуемой литературы в конце книги. – *Прим. перев.*

которые общие аспекты с теорией динамических систем, разделом математики, который в некотором смысле ведет свое происхождение от термодинамики. Различие между теорией систем и теорией динамических систем заключается в том, что в первом случае мы всегда имеем дело с входами и выходами – так называемыми открытыми системами, – тогда как в теории динамических систем входные данные не играют важной роли. Входные и выходные данные критически важны при рассмотрении систем в качестве строительных блоков для построения более крупных систем посредством соединения друг с другом.

Понятие системы, возможно, впервые было введено в обиход в контексте термодинамики. Этим термином определенно злоупотребляют, поскольку он используется в большинстве наук. Происхождение систематического теоретического изучения систем в смысле управления ими обычно приписывают изучению электрических сетей или электрических систем. Именно в электрических системах, как в энергетике, так и в телекоммуникациях, инженерные системы впервые достигли такого уровня сложности, который потребовал более абстрактного подхода к системному синтезу (см., например, Anderson, Vongpanitlerd, 2006; Belevitch, 1968).

Разработка систем управления всегда была основана на технологиях. На заре промышленной революции непонятное поведение регулятора паровой машины Уатта послужило первым стимулом для системного анализа. В конце XIX – начале XX века появление энергетических и телекоммуникационных сетей обеспечило достаточную мотивацию. В XX веке авионика и, в частности, космическая гонка стимулировали значительное развитие. Сегодня в этой области активно используются беспроводные датчики и исполнительные устройства с сетевым управлением, а также достижения новой промышленной революции в области биоинженерии. Историю этой области, по крайней мере до 1955 года, можно найти в работах Беннетта (Bennett, 1979, 1993).

Курс по сигналам и системам в настоящее время является обязательным компонентом большинства учебных программ по электротехнике, а также (под аналогичными названиями) во многих других инженерных дисциплинах, таких как аэроавиатика, механика, химия или телекоммуникации. Во Всемирной паутине можно найти наглядные примеры и многочисленные версии учебных программ с открытым исходным кодом.

Учебников много, например Haykin, Van Veen (2002) и Oppenheim и др. (1982). Большинство из них требует практических знаний элементарной линейной алгебры и математического анализа. Более современный подход, возможно, несколько более доступный для широкого круга читателей, можно найти у Ли и Варайи (Lee, Varaiya, 2003).

Идеи обобщить теорию систем таким образом, чтобы она органично сочеталась с биологией, физикой, термодинамикой и т. д., были выдвинуты von Bertalanffy (1980).

Развитие теории систем, начинающееся с поведения системы, является относительно недавним достижением и связано с именем Яна К. Виллемса. Изложение этих идей см., например, в работе Polderman, Willems (1998). Так называемый поведенческий подход элегантен и обеспечивает доступную и современную аксиоматическую основу для изучения систем.



Существует очень активное исследовательское сообщество в области систем и управления. Общество систем управления (CSS) института инженеров электротехники и электроники (IEEE) с 1954 года является центром внимания сообщества систем управления. Международная федерация автоматического управления (IFAC) ([www.ifaccontrol.org](http://www.ifaccontrol.org)), посвященная теории систем и ее приложениям в самом широком смысле этого слова, существует с 1957 года. IFAC проводит множество симпозиумов в каждом регионе и всемирный конгресс каждые три года (последний привлек более 2000 исследователей). Математическая теория сетей и систем (MTNS) – конференция, проводимая раз в два года, которая ставит в центр внимания математические аспекты теории систем в сетевом окружении.

Существует ряд крупных транснациональных компаний, которые делают управление и автоматизацию своим основным бизнесом и услугой. Такие компании, как IBM, Honeywell, Rockwell Automation, Omron и Siemens, являются основными игроками. Программные платформы, такие как коммерческие Matlab<sup>TM</sup> <sup>24</sup> и LabVIEW<sup>TM</sup> <sup>25</sup>, а также SciLab<sup>26</sup> с открытым исходным кодом, поддерживают преподавание, исследования и инженерные разработки в области управления, автоматизации и системной инженерии в более широком смысле.

---

<sup>24</sup> Программное обеспечение от компании MathWorks (<http://www.mathworks.com>). – Прим. авт.

<sup>25</sup> Программное обеспечение, доступное в National Instruments (<http://www.ni.com/labview>). – Прим. авт.

<sup>26</sup> <http://www.scilab.org>. – Прим. авт.