
Предисловие к русскому переводу

Предлагаемая читателю книга содержит полезный материал по вопросам теории и практики создания систем управления.

Конечно же, в первую очередь это учебник для студентов, причем он построен таким образом, что позволяет рассматривать те или иные вопросы на разных уровнях сложности. Это также и прекрасное пособие для преподавателя, предоставляющее возможность идти от первоначального знакомства с проблемой к ее дальнейшему углубленному изучению.

В отличие от многих отечественных учебников здесь, как правило, не «разжевываются» те или иные вопросы, а формулируется проблема и даются пути ее решения. Поэтому прочтение этой книги еще не гарантирует успешной сдачи экзамена по соответствующему курсу, а требует осмысления представленного здесь материала. Таким образом, она стимулирует студента творчески подойти к рассмотренным вопросам, задуматься над ними, чего так порой не хватает в наших отечественных курсах.

Положительным моментом книги является то, что она написана людьми, которые являются не только преподавателями, но и практиками. Поэтому многие проблемы здесь не носят академический характер, а почерпнуты из практической деятельности по созданию систем управления разнообразного назначения.

Интересны некоторые методические нововведения авторов. Так, например, параллельное рассмотрение непрерывных и дискретных систем, кажущееся на первый взгляд непривычным, по-видимому, имеет смысл, учитывая аргументацию авторов, что подавляющее большинство современных систем управления — цифровые системы.

Материал сопровождается большим числом примеров, которые необходимо решить, чтобы быть уверенным, что материал соответствующей главы достаточным образом усвоен. Примеры тщательно подобраны и

дают преподавателю широкое поле деятельности для формирования на их основе других примеров различной сложности, которые можно предложить студентам.

Однако, на наш взгляд, некоторые вопросы можно было бы осветить более строго. В частности, скорее интуитивные нежели строгие рассуждения об устойчивости систем, связанные с рассмотрением нахождения полюсов передаточной функции на комплексной плоскости, было бы неплохо в первых же главах заменить определением устойчивости по Ляпунову (которое в конце концов авторы вынуждены ввести в последующих главах), откуда непосредственно бы вытекало как следствие влияние расположения полюсов на устойчивость (да и разночтений с границей устойчивости — куда ее относить — к области устойчивых или неустойчивых систем, тогда бы не было).

Текст перевода скорректирован с учетом замеченных опечаток, приведенных на Web-сайте книги. В русском переводе устранены также некоторые замеченные нами незначительные опечатки оригинального текста (конечно же, при этом добавлены другие неточности, будем надеяться, несущественные).

Книга написана доступным ясным языком, что немаловажно для учебника. О качестве же перевода судить читателю. Во всяком случае, мы надеемся, что знакомство с этой книгой будет приятно для читателя.

С благодарностью за поддержку и
понимание посвящается Росслин,
Элис, Мариви

Благодарности

Авторы хотят выразить благодарность большому числу коллег и друзей, которые работали с нами в области управления на протяжении ряда лет. Эта книга фактически является синтезом идей, которые они помогли нам сформулировать. Все три автора работали какое-то время вместе в Научном центре промышленных систем управления Университета Ньюкасла, Австралия. Это было плодотворное время для многочисленных дискуссий о принципах управления. Финансирование этого центра Австралийским Правительством по программе поддержки государственных центров заслуживает благодарности. Финансовая и другая поддержка обеспечивалась также Техническим Университетом Федерико Санта Марии, позволившая, помимо прочего, первому автору несколько раз посетить Чили в течение написания этой книги. Многие из студентов и коллег читали черновики книги в течение пяти лет. Авторы несут полную ответственность за научные положения, отраженные в книге (и все оставшиеся ошибки). Тем не менее, они желают особенно поблагодарить за полезные советы Томаса Бринсмида, Артура Конлей, Сэма Крисафулли, Хозе де Дона, Ари Фойера, Джейма Глария, Уильяма Хита, Кацуо Комацу, Дэвида Мейна, Тристана Переса, Марию Серон, Густаво Вергара, Люпинь Вонг и Стива Веллера. Книга была подготовлена и напечатана многими людьми, включая авторов; однако на заключительных стадиях создания книги значительную помощь оказала Джейн Дисней. Тим Уайли и Адриан Бастиани любезно создали технические рисунки, приведенные в тексте. Авторы также хотят поблагодарить сотрудников Prentice-Hall, особенно Эрика Франка, за их советы, руководство и поддержку в течение создания книги. Авторы также благодарны за очень ценные и первоначально анонимные отзывы, полученные от следующих рецензентов первого варианта: Кемина

Зоу (Государственный университет штата Луизиана), Рика Джонсона (Корнельский университет), Дж. Б. Пирсона (Университет Райса), Чаки Абдалла (Университет Нью-Мексико), Стивена Чина (Католический Университет Америки), Энди Грэйса (The Mathworks, Inc.), Джима Фройденберга (Университет Мичигана), Билла Перкинса (Университет штата Иллинойс в Урбана-Шампейн) и Хассана Халила (Мичиганский Государственный университет). Мы полагаем, что окончательная рукопись в должной мере отражает их очень полезные и проницательные предложения.

Условные обозначения

$E \triangleq$	равно по определению
t	непрерывное время
$f(t)$	непрерывный сигнал
k	дискретное время
$\{f[k]\}$	дискретная последовательность
Δ	период квантования
$f(k\Delta)$	квантованный вариант $f(t)$
δ	дельта-оператор
q	оператор сдвига вперед
$\delta_K(k)$	дельта-импульс Кронекера
$\delta(t), \delta_D(t)$	дельта-импульс Дирака
$\varepsilon\{\dots\}$	ожидаемое значение ...
Γ_c	матрица управляемости в пространстве состояний
Γ_o	матрица наблюдаемости в пространстве состояний
$\Lambda\{\dots\}$	множество собственных значений матрицы
$\mu(t - t_o)$	единичная ступенька (непрерывное время) в момент $t = t_o$
$\mu[k - k_o]$	единичная ступенька (дискретное время) в момент $k = k_o$
$f^S(t)$	дискретная версия $f(t)$ с использованием импульса Дирака
$F[\dots]$	преобразование Фурье
$L[\dots]$	преобразование Лапласа
$D[\dots]$	дельта-преобразование
$Z[\dots]$	Z -преобразование
$\mathcal{F}^{-1}[\dots]$	обратное преобразование Фурье
$\mathcal{L}^{-1}[\dots]$	обратное преобразование Лапласа
$\mathcal{D}^{-1}[\dots]$	обратное дельта-преобразование

$\mathcal{Z}^{-1}[\dots]$	обратное Z -преобразование
s	комплексная переменная преобразования Лапласа
ω	угловая частота
γ	комплексная переменная дельта-преобразования
z	комплексная переменная Z -преобразования
$F(j\omega)$	преобразование Фурье от $f(t)$
$F(s)$	преобразование Лапласа от $f(t)$
$F_\delta(\gamma)$	дельта-преобразование от $\{f[k]\}$
$F_q(z)$	Z -преобразование от $\{f[k]\}$
$f_1(t) * f_2(t)$	свертка $f_1(t)$ и $f_2(t)$ во временной области
$F_1(s) * F_2(s)$	свертка $F_1(s)$ и $F_2(s)$ в комплексной области
$\Re\{\dots\}$	вещественная часть
$\Im\{\dots\}$	мнимая часть
$\mathbf{C}^{m \times n}$	множество всех матриц размерности $\mathbf{m} \times \mathbf{n}$ с комплексными компонентами
\mathcal{H}_2	Гильбертово пространство квадратично интегрируемых функций вдоль мнимой оси и аналитических в правой полуплоскости
\mathcal{L}_1	Гильбертово пространство абсолютно интегрируемых функций вдоль мнимой оси
\mathcal{L}_2	Гильбертово пространство квадратично интегрируемых функций вдоль мнимой оси
\mathcal{H}_∞	Гильбертово пространство ограниченных функций вдоль мнимой оси и аналитических в правой полуплоскости
\mathcal{RH}_∞	Гильбертово пространство рациональных ограниченных функций вдоль мнимой оси и аналитических в правой полуплоскости
\mathcal{L}_∞	Гильбертово пространство ограниченных функций вдоль мнимой оси
\mathbb{N}	множество всех натуральных чисел
\mathbb{R}^+	множество вещественных чисел, больших нуля
\mathbb{R}^-	множество вещественных чисел, меньших нуля
$\mathbb{R}^{m \times n}$	множество всех матриц размерности $\mathbf{m} \times \mathbf{n}$ с вещественными компонентами
\mathcal{S}	множество всех вещественных рациональных функций с (ограниченными) полюсами строго внутри левой полуплоскости
\mathbb{Z}	множество всех целых чисел
$[a_{ik}]$	матрица, у которой элемент в i -й строке и k -м столбце обозначен через a_{ik}
$[\mathbf{A}]_{ik}$	элемент в i -й строке и k -м столбце матрицы \mathbf{A}

$[\mathbf{A}]_{i^*}$	i -я строка матрицы \mathbf{A}
$[\mathbf{A}]_{*k}$	k -й столбец матрицы \mathbf{A}
$(\dots)^*$	комплексно-сопряженная величина
$G_{h0}(s)$	передаточная функция экстраполятора нулевого порядка
$G_{h1}(s)$	передаточная функция экстраполятора первого порядка
$\mathbf{H}\langle \dots \rangle$	обозначение оператора преобразования
$\mathbf{H}_1 \otimes \mathbf{H}_2 \langle \dots \rangle$	составной оператор, т. е. $\mathbf{H}_1 \langle \mathbf{H}_2 \langle \dots \rangle \rangle$
\mathbf{I}_k	единичная матрица в $\mathbb{R}^{k \times k}$
$\text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$	диагональная матрица с элементами a_i
$\det(\mathbf{A})$	определитель матрицы \mathbf{A}
$\arg_Q F$	аргумент Q функции F
$\min F$	минимальное значение функции F
$\text{Adj } \mathbf{A}$	присоединенная матрица матрицы \mathbf{A}
$\text{rank } \mathbf{A}$	ранг матрицы \mathbf{A}
s -плоскость	плоскость комплексного параметра s
SISO-система	система с одним входом и одним выходом (Single-Input Single-Output)
MIMO-система	система со многими входами и многими выходами (Multi-Input Multi-Output)
АОМ	аддитивная ошибка моделирования
ЛКР	линейный квадратичный регулятор
ЛМДО	левое матричное дробное описание
ЛПП	левая полуплоскость
МДО	матричное дробное описание
МОМ	мультипликативная ошибка моделирования
МОУ	массив относительных усилений
МПУ	модельное прогнозирующее управление
ПВМ	принцип внутренней модели
ПМДО	правое матричное дробное описание
ППП	правая полуплоскость

Предисловие

Введение в проектирование систем управления

Проектирование систем управления играет важную роль в современных технологических системах. Выгоды от совершенствования систем управления в промышленности могут быть огромны. Они включают улучшение качества изделия, уменьшение потребления энергии, минимизацию материальных затрат, повышение уровней безопасности и сокращение загрязнения окружающей среды. Трудность однако здесь состоит в том, что ряд наиболее передовых идей имеет сложный математический аппарат. Возможно, математическая теория систем — одно из наиболее существенных достижений науки двадцатого века, но ее практическая ценность определяется выгодами, которые она может приносить. По этой причине мы сделали в книге сильный акцент на практическую сторону, в конечном счете, несколько нарушив баланс между теорией и практикой.

Участие авторов в ряде промышленных проектов систем управления было одной из побудительных причин написать эту книгу. Из типичных технических задач мы исследовали динамику жидкостей и тепловых процессов, негативные воздействия неустойчивости частоты сканирования программируемых контроллеров, занимались вопросами интеграции систем и протоколов обмена в сети, идентификацией объектов управления и разрабатывали безопасные схемы исследования опытных вариантов систем управления для потенциально опасных объектов. Короче говоря, мы испытали ежедневные волнения, разочарования, препятствия, неудачи и успехи в разработке продвинутых систем управления, чтобы внести свой вклад в практические результаты коммерческой компании. Это — не простая задача. Успех здесь зависит от широкого диапазона мультидисциплинарных навыков, однако это полезная и захватывающая работа для тех, кто ей занимается.

Одна из главных целей данной книги — поделиться этими чувствами с нашими читателями. Мы надеемся оказать влияние на развитие навы-

ков и отношение к проблеме читателей, в первую очередь студентов, что вооружит их в решении реальных задач. Таким образом, книга предназначена внести вклад в продолжающуюся реформу учебного плана специальности «Проектирование систем управления». Эта тема продолжает серьезно привлекать международное общественное мнение, поскольку педагоги стремятся отразить привлекательность и важность разработки систем управления. Действительно, все выпуски Журнала по системам управления IEEE были посвящены этой теме.

Преобразование учебного плана, однако не может быть обеспечено одними книгами. Это делается людьми: студентами, преподавателями, исследователями, практиками, публицистами и рецензентами, а также требованиями рынка. Кроме того, для эффективности и жизнеспособности этих усилий нужно, чтобы общество разработчиков систем управления сообщало о своих достижениях через новые книги, лаборатории, модели и глобальные вычислительные сети. Следовательно, требуются различные дополняющие друг друга подходы. В этом смысле авторы полагают, что книга будет, в некотором роде, полезна, если она привлечет интерес студентов к захватывающей дисциплине разработки систем управления.

Мы подчеркиваем, что это — не книга с *практическими рекомендациями*. Напротив, мы даем всестороннее, но все же сжатое, представление строгой разработки систем управления. Мы используем, как и требуется, математику в качестве средства *моделирования* процессов для *анализа* их свойств под действием обратных связей, для *синтеза* регуляторов с требуемыми свойствами и достижения *цели* с учетом внутренних компромиссов и ограничений, присущих задаче.

В частности мы полагаем, что успех при проектировании систем управления зависит от двух ключевых моментов: а) всестороннего понимания самого процесса, полученного при изучении физических, химических и других явлений, и б) знания фундаментальных концепций сигналов, систем и обратной связи. Первый момент обычно занимает более половины усилий. Это — неизбежный компонент полного цикла проектирования; однако непрактично описывать все детали процессов, для которых можно было бы применять системы управления, потому что они охватывают и химические объекты, и электромеханические системы, и роботы, и энергетические генераторы и т. д. Таким образом, мы концентрируемся на фундаментальных аспектах проектирования систем управления, являющихся общими для любых приложений и отсылаем читателей дополнить свои знания процессами в собственных конкретных задачах. Таким образом, книга преимущественно нацелена на второй компонент разработки систем управления. Конечно же, мы

приведем в соответствующем контексте примеры использования излагаемых методов применительно к некоторым реальным системам.

Центральная тема этой книги — непрерывные системы управления, однако мы также рассмотрим подробно и цифровое управление, потому что большинство современных систем управления обычно используют те или иные средства вычислительной техники. Этот подход естественно привел к книге большего объема, чем первоначально предполагалось, однако преимуществом является более полное рассмотрение проблемы в одном произведении. Естественно, остались специальные темы, которые не охвачены книгой; однако мы полагаем, что обеспечили достаточную основу для того, чтобы читатель мог безболезненно перейти к изучению соответствующей дополнительной литературы.

Цели

Таким образом, при написании этой книги мы выбрали в качестве основных целей следующие:

- обеспечение возможности работы с серьезным материалом, выбранным по своему усмотрению;
- концентрация основного внимания на проектировании, включая методы учета фундаментальных компромиссов и ограничений;
- обеспечение дополнительной поддержки с помощью мощной интерактивной глобальной вычислительной сети и
- демонстрация достоверности материала на основе рассмотрения многочисленных промышленных примеров.

Действительно, материал в книге иллюстрирован многочисленными промышленными системами, к которым авторы имели прямую причастность. Большинство этих систем было выполнено в сотрудничестве с промышленностью в *Объединенном центре динамики и управления* (Centre for Integrated Dynamics and Control — CIDAC) (специальный исследовательский центр Британского Содружества) в Университете Ньюкасла.

Проекты, которые мы выбрали для описания, следующие:

- слежение за спутником;
- управление уровнем pH;
- управление непрерывным литьем;
- управление сахарным отжимным прессом;
- управление колонной дистилляции;
- управление синтезом аммиака;

- оценка массы цинкового покрытия на непрерывных линиях гальванизации;
- управление толщиной полосы прокатного стана с помощью BISRA-измерителя¹;
- компенсация эксцентриситета валков прокатного стана;
- эффект затягивания на реверсивном прокатном стане;
- управление поверхностью полосы прокатного стана;
- управление вибрацией.

Проектирование — сложный процесс, который требует принятия решений и использования итераций. Задача проектирования обычно не полностью определена, иногда неточно указана и часто не имеет решения. Ключевой момент в проектировании — понимание тех факторов, которые ограничивают достижение решения. Это естественно приводит к выводу о создании системы управления с учетом этих основных ограничений. К этой точке зрения мы постоянно возвращаемся в течение всей книги.

Наша цель не состоит в том, чтобы дать исчерпывающие математические исследования, а в том, чтобы дать читателю такой материал, который он может сразу же применить на практике. Мы предполагаем, что читателю доступны современные вычислительные средства, включая пакет программирования MATLAB-SIMULINK. Это позволяет нам сосредоточиться в первую очередь на фундаментальных идеях, а не на прикладных. Каждая глава включает относящиеся к теме примеры и задачи для читателя.

Краткий обзор книги

Книга разделена на восемь частей. Ниже дается резюме каждой из частей.

Часть I: Элементы

Эта часть охватывает основные непрерывные сигналы и системы. Ее можно использовать для вводного курса по этой теме. С другой стороны, этот материал можно рассматривать как исходный для дальнейшего серьезного изучения систем управления.

¹ BISRA (British Iron and Steel Research Association) — Британская исследовательская ассоциация железа и стали, в которой разработан данный метод.

Часть II: Основы SISO-систем управления

Эта часть посвящена системам управления *с одним входом и одним выходом* (SISO-системам — Single-Input Single-Output), включая классическое *пропорционально-интегрально-дифференцирующее* (ПИД) регулирование. Эта часть вместе с первой частью охватывает содержание многих существующих учебных планов основных курсов теории управления.

Часть III: Проектирование SISO-систем управления

Эта часть охватывает проблемы проектирования систем управления с одним входом и одним выходом. Мы считаем многие из этих идей очень важными в практических задачах управления. В частности, мы полагаем, что глава, в которой говорится об ограничениях, должна быть по возможности во всех вводных курсах. Аналогично и упреждение, и каскадные структуры, о которых говорится в этой части, очень часто используются на практике.

Часть IV: Цифровое управление

Эта часть охватывает материал, необходимый для понимания цифрового управления. Мы здесь отходим от традиционных подходов к этой теме, рассматривая проблемы поведения системы между моментами квантования.

Часть V: Продвинутое SISO-управление

Эта часть могла бы стать основой углубленного (после начального) курса по системам управления. Она посвящена основным понятиям, которые затем используются в данной книге для систем со *многими входами и многими выходами* (MIMO-систем — Multi-Input Multi-Output).

Часть VI: Основы MIMO-управления

Эта часть содержит основы для начального курса по системам управления со многими входами и многими выходами. В частности она содержит основы теории MIMO-систем управления. Здесь также показано, как можно использовать методы SISO-систем управления для некоторых задач MIMO-проектирования.

Часть VII: Проектирование МИМО-систем управления

Эта часть описывает идеи и средства, которые могут использоваться при проектировании промышленных МИМО-систем. В частности, она включает *теорию линейного квадратичного оптимального управления* и *оптимальную фильтрацию*. Эти две темы особенно важны в приложениях. Мы также включаем главу по модельному прогнозирующему управлению, поскольку считаем этот материал важным из-за широкого использования его идей в промышленных приложениях.

Часть VIII: Продвинутое МИМО-управление

Эта заключительная часть книги могла бы быть использована для индивидуального изучения. Она предназначена для проверки усвоения читателем материала книги, исследуя углубленные вопросы. С другой стороны преподаватели могли бы использовать эту часть, чтобы углубить материал частей VI и VII во многих продвинутых курсах по МИМО-системам управления.

Использование этой книги

Это — всесторонняя книга по проектированию систем управления, которую можно рекомендовать для многих различных курсов. Если она используется для начального курса по системам управления, то неиспользованный материал может быть в дальнейшем с успехом применен в практической деятельности или для написания обзоров. Если же она используется для продвинутого курса, то ранний материал дает превосходную основу для построения такого курса.

Книгу можно использовать для многих различных вариантов курса. Здесь можно выделить следующие варианты.

1. Сигналы и системы

Его можно было бы преподавать на основе части I книги.

2. Основы теории систем управления

Его можно преподавать на основе второй части книги совместно с некоторыми материалами из части I (в зависимости от уровня подготовки студентов по сигналам и системам) и некоторыми материалами из части III. В частности, глава по ограничениям проекта (гл. 8) требует только элементарного знания преобразования Лапласа и дает студентам пони-

мание тех проблем, которые ограничивают достижимость цели. Это — чрезвычайно важный компонент всех задач проектирования реальных систем управления. Очень важна практически также и гл. 11, в которой говорится об ограничениях. Наконец, идеи упреждения и каскадных структур, которые рассмотрены в гл. 10, являются существенными в задачах проектирования реальных систем управления.

3. Цифровое управление

Этому можно учить на основе части IV. Действительно, мы чувствуем, что наш подход в большей степени направлен на приложения, чем многие из традиционных подходов, в связи с рассмотрением поведения систем между моментами квантования. В различных курсах, читавшихся авторами этой книги, материал по цифровому управлению обычно включался в курс основ теории систем управления. Это возможно потому, что студенты хорошо подготовлены с помощью курса сигналов и систем, предшествующего курсу систем управления.

4. Продвинутый курс по системам управления

Продвинутый курс по системам управления обычно включает введение в проектирование на основе пространства состояний, наблюдателей и обратной связи по переменным состояниям. Этот материал можно преподавать на основе частей V–VII книги. Часть V относительно проста и служит мостиком от SISO-систем (которым главным образом посвящены части I–IV) к ММО-системам (которые в основном описаны в частях VI–VIII).

Мы считаем гл. 22, посвященную оптимальному управлению и фильтрации, очень важной и включили в нее много учебных проектов реальных систем. Важна также и гл. 23, посвященная модельному прогнозирующему управлению, поскольку эта техника широко используется в промышленных системах управления.

Двое авторов (Гудвин и Сальгадо) преподавали в Австралии и Южной Америке начальный и продвинутый курсы упомянутого выше типа, используя черновой вариант этой книги.

Web-сайт

Мы создали для поддержки книги комплексный Web-сайт. Он содержит следующую информацию.

- Все приложения (так что этот материал можно читать одновременно с текстом книги).
- Полная поддержка пакета MATLAB (он может быть загружен и использован для воспроизведения всех примеров книги).
- Интерактивные Java-лаборатории (они иллюстрируют материал книги, но могут также использоваться для функционального взаимодействия).
- Избранные решения задач. (Они позволяют студентам разобраться, как могут быть решены некоторые ключевые задачи. Конечно, преподавателям, которые воспользуются книгой, по их просьбе могут быть высланы копии полного сборника решений, который охватывает весь набор задач книги.)
- Обсуждение в реальном времени (где могут быть подняты и обсуждены темы проектирования систем управления, представляющие общий интерес).
- Секция опечаток (используется, чтобы сообщить подробности о любых ошибках, найденных в книге).
- Расширенные электронные слайды (приблизительно 2500 слайдов доступны для использования с книгой).

Нам представляется использование этого материала следующим образом:

Для преподавателя

Мы полагаем, что поддержка MATLAB и электронные слайды должны быть особенно полезны для преподавателя. Например, было бы возможно преподавать курс, полностью используя имеющиеся ресурсы. Мы также выяснили, что студенты любят использовать интерактивные лаборатории. Они могут быть показаны в аудитории как часть лекции или даны студентам для улучшения понимания ими материала.

Для студента

Мы считаем, что электронные слайды хорошо и просто поясняют содержание книги, обходя при этом все ненужные технические трудности. Даже если ваш преподаватель не использует эти слайды в своих демонстрациях, мы полагаем, что они — превосходное средство для целей изучения. Если вы распечатаете и опишете их, то запоминание материала должно стать легче. Студенты также должны получить удовольствие от Java-апплетов. Если вы знаете, как с помощью апплетов выполнить

исследования, это приблизит вас к пониманию предмета. К Web-сайту можно обращаться по любому из следующих адресов:

<http://www.prenhall.com/goodwin>

<http://csd.newcastle.edu.au/control/>

Кроме этого, для связи см. индивидуальные страницы авторов.

Обратите также внимание, что Web-сайт непрерывно развивается, так что ресурсы будут со временем продолжать расти и совершенствоваться.

Ньюкасл, Австралия
Вальпараисо, Чили
Вена, Австрия

ЭЛЕМЕНТЫ

Введение

Проектирование и функционирование автоматического процесса, предназначенного для обеспечения технических характеристик, таких, например, как прибыльность, качество, безопасность и воздействие на окружающую среду, требуют тесного взаимодействия специалистов различных дисциплин. Сюда входят, например, специалисты по вычислительной технике, технологи, механики, прибористы и разработчики систем управления.

Каждая из этих дисциплин рассматривает процесс и управление им со своей точки зрения, так что каждый специалист выбирает свои категории или элементы, в терминах которых он думает относительно автоматической системы. Специалист по вычислительной технике, например, думает в терминах аппаратных средств компьютера, инфраструктуры сети, операционной системы и прикладного программного обеспечения. Инженер-механик подчеркнул бы механические компоненты, из которых собран процесс; инженер-приборист думал бы в терминах исполнительных механизмов, датчиков и их электрооборудования.

Инженер по системам управления в свою очередь думает об элементах системы управления в таких абстрактных терминах, как сигналы, системы и динамические реакции. Эти элементы могут быть далее заданы их физической реализацией, математической моделью, или их свойствами (см. табл. 1).

Эта книга отражает точку зрения инженера по системам управления, одну из точек зрения в процессе автоматизации; однако читатель должен иметь в виду и другие точки зрения, поскольку только в этом случае формируется целостное представление предмета.

Первая часть книги — первая стадия нашего путешествия в разработку систем управления. Она содержит введение в основные характеристики непрерывных сигналов и систем и описывает ведущую роль обратной

Таблица 1

Системы и сигналы в терминах контура управления

	Физические примеры	Примеры математических моделей	Примеры свойств
Сигналы	уставка, управля- ющий сигнал, возмущения, измеренные величины, ...	непрерывная функция, дискретная последователь- ность, случайный процесс, ...	аналитические, случайные, синусоидальные процессы, стандартные отклонения, ...
Системы	процесс, регулятор, датчики, исполнительные механизмы, ...	дифференциаль- ные уравнения, разностные уравнения, передаточные функции, модели пространства состояний, ...	непрерывные, дискретные, линейные, нелинейные, ...

связи в проектировании системы управления. Все это — основные блоки, на которых строится все здание систем управления.

Причины создания систем управления

1.1. Введение

Эта глава предназначена для обоснования необходимости изучения вопросов разработки систем управления. В частности, она охватывает:

- краткий обзор возможностей управления,
- исторические периоды в развитии теории управления,
- виды проблем в системах управления,
- введение в системотехнику и
- экономический анализ.

1.2. Причины разработки систем управления

Управление с применением обратной связи имеет длинную историю, которая началась с давнего желания людей использовать предметы и силы природы в своих целях. Первые примеры систем управления включают системы регулирования часов и механизмы направления ветряных мельниц навстречу ветру.

Ключевой шаг вперед в развитии систем управления произошел в период промышленной революции. К тому времени получили широкое развитие машины, которые существенно увеличивали способность превращать сырье в изделия на благо обществу. Связанные с этим машины, особенно паровые, использующие большие потоки энергии, привели к пониманию, что этой энергией нужно управлять, чтобы системы работали благополучно и эффективно. Главным достижением этого времени был центробежный регулятор Уатта. Это устройство регулировало скорость парового двигателя, ограничивая поток пара; см. рис. 1.1. Такие устройства работают по сей день.

Мировые войны также привели к прогрессу в разработке систем управления, некоторые из которых были связаны с системами ведения

многих компаний это оказалось не только доходным, но и жизненно необходимым.

К концу двадцатого столетия использование систем управления стало вездесущим (но в значительной степени незаметным) элементом современного общества. Фактически каждая система, с которой мы имеем дело, подкреплена сложными системами управления. Среди примеров можно упомянуть и простые домашние устройства (регулирование температуры в кондиционерах, термостаты в нагревателях воды и т. д.) и более сложные системы типа автомобиля (которые имеют сотни контуров управления) и крупномасштабные системы (типа химических заводов, самолетов и производственных процессов). Например, рис. 1.2 показывает схему Келлог-процесса на аммиачном заводе. В мире имеется приблизительно 400 таких заводов. Такой сложный химический завод, наподобие показанного на рис. 1.2, обычно имеет много сотен контуров управления. На самом деле для простоты мы не показали на рис. 1.2 многие вспомогательные объекты, которые также имеют существенное число контуров управления.

Многие из этих промышленных регуляторов используют технологию *режущей кромки*. Например, в случае прокатного стана (см. рис. 1.3), система управления развивает усилия порядка 2000 тонн, скорости до 120 км/ч и (в алюминиевой промышленности) допустимые отклонения порядка 5 микрон (1/500-я от толщины человеческого волоса!). Все это достигнуто с помощью точных аппаратных средств ЭВМ, современного вычислительного аппарата и сложных алгоритмов управления.

За пределами *промышленных* примеров механизмы регулирования с помощью обратной связи являются центральными в жизнедеятельности биологических систем, сетей связи, национальных экономик и даже в отношениях между людьми. Действительно, если внимательно подумать, управление в той или иной форме может быть найдено в каждом аспекте жизни.

В этом контексте проектирование систем управления связано с разработкой, созданием и использованием этих систем. Как мы увидим позже, это — одна из наиболее перспективных и интересных областей современного проектирования. На самом деле, чтобы успешно разработать систему управления, требуется объединить много дисциплин, включая моделирование (чтобы учесть лежащую в основе физику и химию процесса), технологию датчиков (чтобы измерить состояние системы), исполнительные механизмы (чтобы выполнить корректирующие действия в системе), линии связи (чтобы передавать данные), средства вычисления (чтобы выполнить сложную задачу преобразования измеренных данных в соответствующие действия исполнительного механизма) и

интерфейс (чтобы обеспечить непрерывное *взаимодействие* различных компонентов в системе управления).

Таким образом, разработка систем управления — захватывающий мультидисциплинарный предмет с чрезвычайно большим диапазоном практических применений. Интерес к системам управления вряд ли уменьшится в обозримом будущем. Напротив, он станет, вероятно, еще большим из-за увеличивающейся глобализации рынков и экологических проблем.

1.2.1. Проблемы рыночной глобализации

Рыночная глобализация становится всеобъемлющей и это означает, что для того, чтобы остаться в бизнесе, производственные отрасли промышленности должны обращать большее внимание на проблемы качества и эффективности. Действительно, в нынешнем обществе немногие из компаний могут себе позволить быть на вторых ролях. В свою очередь, это сосредотачивает внимание на развитии усовершенствованных систем управления, чтобы процессы протекали наилучшим образом. В частности, улучшенное управление — ключ для совершенствования технологии, обеспечивающей:

- улучшенное качество изделия,
- минимизацию потерь,
- защиту окружающей среды,
- увеличение производительности для установленных мощностей,
- увеличение продукции,
- отсрочку дорогостоящей модернизации объекта управления и
- более высокие запасы безопасности.

Все эти проблемы присущи управлению сложным объектом типа, показанного на рис. 1.2.

1.2.2. Экологические проблемы

Все компании и правительства все более и более понимают, что, получая свои выгоды, не следует забывать о конечности природных ресурсов и сохранении нашей хрупкой окружающей среды. Опять-таки, разработка систем управления — основа в достижении этих целей. Можно упомянуть один широко известный пример, когда изменения в законодательстве относительно выбросов от автомобилей в Калифорнии потребовали от изготовителей автомобилей существенных изменений в технологии, включая усовершенствованную стратегию контроля двигателей внутреннего сгорания.

[...]