

В. Ю. ШИШМАРЁВ

АВТОМАТИКА

УЧЕБНИК

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования, обучающихся по группе специальностей
1800 «Электротехника»*

4-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 681.5 (075.32)

ББК 32.965я723

Ш657

Рецензенты:

профессор кафедры «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» МАИ (ГТУ), д-р техн. наук *В. М. Костюков*;
зав. учебно-информационной службой ГОУ СПО «МПК», преподаватель спецдисциплин по специальностям 1806 и 2101, преподаватель высшей квалификационной категории, канд. техн. наук *С. А. Петрова*

Шишмарёв В. Ю.

Ш657 Автоматика : учебник для студ. сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — 4-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 288 с.

ISBN 978-5-4468-0409-2

Рассмотрены основные понятия, цели и принципы управления. Приведены классификация и характеристики элементов автоматики: датчиков, усилителей, исполнительных устройств. Большое внимание уделено типовым звеньям САУ, способам их соединения, а также анализу устойчивости и качества САУ. Рассмотрены цифровые САУ и системы телемеханики.

Для студентов средних профессиональных учебных заведений. Может быть полезен специалистам, занимающимся решением практических задач автоматизации.

УДК 681.5 (075.32)

ББК 32.965я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Шишмарёв В. Ю., 2005

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005

ISBN 978-5-4468-0409-2

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время важным направлением научно-технического прогресса является комплексная автоматизация, включающая в себя: переход от автоматизации станков, агрегатов, установок к автоматизации работы линий, участков, цехов и заводов в целом; создание автоматизированных систем управления предприятием (АСУП) и целыми отраслями (ОАСУ); расширение применения промышленных роботов и гибких автоматизированных производственных систем.

Для современной техники характерны значительное усложнение задач управления и рост объемов обрабатываемой и передаваемой информации, определяющие принципиальный качественный скачок автоматизации — широкое применение средств вычислительной техники.

Основной задачей данного учебника является ознакомление учащихся с основными методами построения систем автоматического управления и средствами, необходимыми для их реализации.

При написании учебника автор использовал многолетний опыт преподавания автоматики в МАТИ — РГТУ им. К. Э. Циолковского, а также практический опыт по созданию и внедрению в производство конкретных промышленных систем автоматики.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматика — это область науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления, действующих без непосредственного участия человека.

Первые автоматы, т. е. машины, работающие без участия человека, были созданы еще греческим ученым Героном Александрийским, жившим в I в. н. э. Существуют описания около 100 автоматов, известных в те древние времена, которые использовались, как правило, в развлекательных и религиозных целях.

Первые автоматические устройства промышленного назначения были разработаны в связи с появлением паровых машин. В 1765 г. русским механиком И. И. Ползуновым был изобретен первый в мире промышленный регулятор, автоматически поддерживающий требуемый уровень воды в котле паровой машины. Предложенный им принцип регулирования по отклонению является одним из основных принципов построения различных автоматических систем.

Во второй половине XIX в. появились автоматические устройства, основанные на использовании электрической энергии. Одним из первых таких автоматов был электромагнитный регулятор скорости вращения паровой машины, разработанный русским ученым К. И. Константиновым.

Теоретические основы проектирования автоматических регуляторов были разработаны русским ученым И. А. Вышнеградским и английским ученым Дж. К. Максвеллом. Для создания и развития математического аппарата, используемого в исследовании автоматических систем, много сделали выдающиеся русские ученые А. М. Ляпунов, П. Л. Чебышев, Н. Е. Жуковский.

Первоначально работы по созданию автоматических систем в механике, электротехнике, теплотехнике и других научных отраслях велись независимо друг от друга. В начале 1940-х гг. автоматика стала формироваться как самостоятельная научная дисциплина, изучающая методы анализа и синтеза систем автоматического управления в технике независимо от их физической природы.

В настоящее время автоматические системы широко применяются во всех областях деятельности человека — в промышленности, на транспорте, в устройствах связи, при научных исследованиях и др.

Во многих отраслях техники и технологиях возможность автоматизации управления определяет дальнейшее их развитие. Так,

без автоматизации невозможно построение энергетических систем (в частности, атомных), современных химических и металлургических производств, пилотируемых, беспилотных и космических летательных аппаратов и др.

С экономической точки зрения автоматизация является одним из перспективных направлений развития всех отраслей науки и техники, так как она способствует повышению производительности труда, снижению материальных, энергетических и людских затрат, а следовательно, повышению эффективности любого производства.

В различных технологических и производственных процессах величины, характеризующие эти процессы, должны удовлетворять определенным условиям. Так, например, в энергосистемах должны поддерживаться на определенном уровне значения напряжения и частоты. В авиации, ракетной технике и космонавтике необходимо обеспечивать движение летательных аппаратов на заданной высоте, по заданному направлению (курсу) или траектории в пространстве. В производстве требуется обеспечивать работу отдельных станков, участков и цехов в автоматическом или автоматизированном режиме.

Создание условий, обеспечивающих требуемое протекание любого процесса, называется *управлением*.

Машина, аппарат, агрегат, комплекс машин или система, в которых протекает процесс, подлежащий управлению, называются *объектами управления*.

В данном учебнике рассматриваются основные принципы и методы построения автоматических и автоматизированных систем, приводятся основные способы повышения их устойчивости и качества, а также представлены типовые элементы, применяемые при построении автоматических систем: датчики, усилители, исполнительные элементы, устройства сравнения, логические элементы, образующие комплекс технических средств автоматики.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЦЕЛИ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Основные понятия и определения

Еще в древности говорили, что прежде чем спорить, дискутировать, надо договориться о понятиях, т.е. о том, что понимать под тем или иным словом, определением.

Рассмотрим основные определения, принятые в управлении.

Теория автоматического управления (ТАУ) — это совокупность методов и специального математического аппарата, позволяющая спроектировать работоспособную промышленную систему автоматического управления (САУ), отвечающую заданным требованиям по качеству ее работы.

Система автоматического управления — это совокупность технических средств для управления регулируемым параметром, в которой вычислительные и логические операции осуществляются с помощью специальных технических устройств: автоматического регулятора, программируемого контроллера или управляющей вычислительной машины (УВМ).

Основной частью (узлом, элементом) САУ является объект управления.

Объект управления — это техническая установка или технологическая цепь установок, физико-химические процессы в которых управляются (регулируются) с помощью специальных технических средств.

Технологические параметры — это физико-химические величины, характеризующие состояние технологического процесса в объекте управления (например, температура, давление, скорость вращения и др.).

Регулируемый параметр — это технологический параметр, значением которого управляют с помощью специальных технических средств. Число регулируемых параметров, как правило, значительно меньше общего числа технологических параметров.

Система ручного регулирования (СРР) — это совокупность технических средств для управления регулируемым параметром, в которой вычислительные и логические операции осуществляются человеком-оператором. Принято считать, что такая система замкнута на человека, или в техническом смысле разомкнута.

Под **воздействиями** в ТАУ понимают факторы, изменяющие течение технологического процесса в объекте управления. Различают возмущающие и управляющие воздействия.

Возмущающие воздействия носят случайный, трудно предсказуемый характер. Например, изменение температуры наружного воздуха, колебания напряжения в электросети и др. *Управляющие* воздействия на объект управления организуются техническим устройством (в САУ) или человеком-оператором (в СРР) в целях компенсации влияния возмущающих воздействий.

Под **сигналами** в ТАУ понимают совокупность потоков энергии или вещества, поступающих в объект управления или выходящих из него, возмущающие и управляющие воздействия, а также регулируемые параметры.

По направлению различают *входные* и *выходные* сигналы объекта управления. Так, возмущающие и управляющие воздействия будут входными сигналами для объекта управления; регулируемый же параметр в ТАУ всегда принимают за выходной сигнал объекта управления, даже если он физически никуда за пределы объекта не выходит (например, температуру в топке котла, уровень вещества в бункере, напряжение на обмотках электродвигателя и др.).

1.2. Примеры систем автоматического управления

При реализации технологических процессов параметры, их характеризующие, должны изменяться по определенным законам (или быть постоянными). Необходимость изменения параметров в соответствии с заданным законом возникает в различных отраслях техники. На схемах (рис. 1.1) функциональные элементы САУ обозначают прямоугольником с надписью, а сигналы, поступающие на эти элементы, — стрелками.

Параметры физических процессов, определяющие сигналы, содержат информацию. Например, с помощью электрических сигналов в телефонной связи передаются звуки, а на телевидении — изображение. Параметры, содержащие информацию, называются *информационными*. Например, сигналом является электрическое напряжение, информационным параметром — амплитуда этого сигнала.

Аналоговый называется сигнал, информационные параметры которого могут принимать любые значения в заданном числовом интервале $a \dots b$ (рис. 1.2).

Дискретным называется сигнал, информационные параметры которого принимают только дискретные значения.

Для примера рассмотрим конкретный технологический процесс — регулирование температуры в электропечи для закаливания металла. Для реализации этого процесса электропечь снабжа-



Рис. 1.1. Функциональный элемент САУ

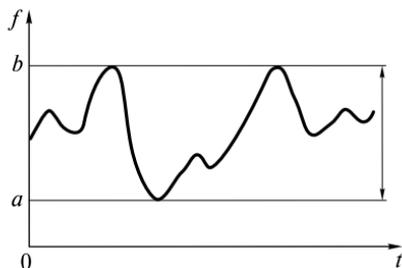


Рис. 1.2. Аналоговый сигнал $f(t)$

ется управляющим (или регулирующим) органом, с помощью которого можно управлять процессом закаливания — изменять температуру в соответствии с заданным законом.

Создание условий, обеспечивающих требуемое протекание процесса закаливания, т. е. поддержание необходимого режима, называется управлением. Управление может быть ручным или автоматическим. При ручном управлении воздействие на управляющий орган осуществляет человек, наблюдающий за ходом процесса.

Функциональной схемой называется символическое изображение всех функциональных элементов технологического процесса и связей между ними, отражающее последовательность процессов в системе.

Представим с помощью функциональной схемы технологический процесс закаливания металла в электропечи (рис. 1.3).

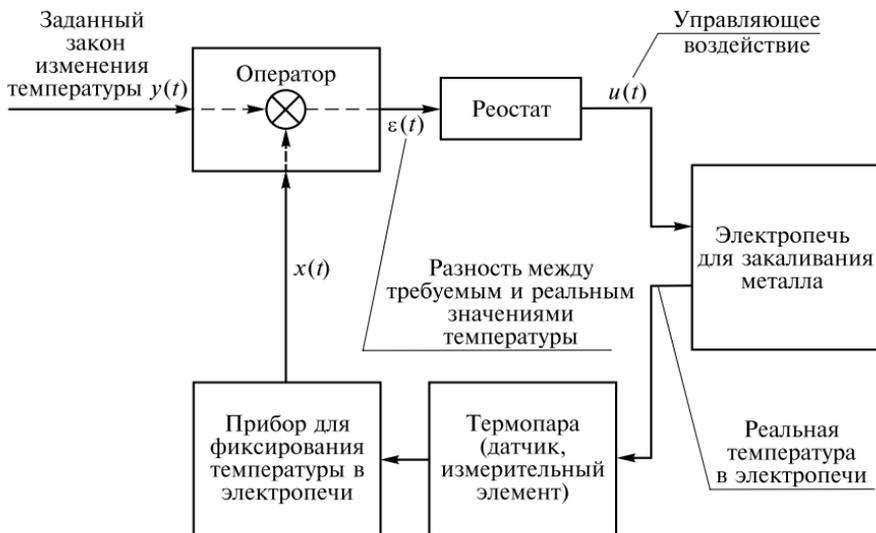


Рис. 1.3. Функциональная схема технологического процесса закаливания металла в электропечи с участием оператора

Данная система предназначена для поддержания необходимого режима, т.е. изменения температуры $y(t)$ в электропечи по заданному закону. Для обеспечения требуемого процесса электропечь снабжается двумя элементами: термопарой, с выхода которой получают электрическое напряжение $x(t)$, пропорциональное температуре в электропечи, и реостатом, с помощью которого меняется сопротивление в цепи ее нагрева. При увеличении сопротивления ток в цепи нагрева уменьшается, а следовательно, уменьшается и температура в электропечи. При уменьшении сопротивления ток возрастает, и температура увеличивается.

Наблюдая за показаниями прибора, на котором фиксируется реальная температура в электропечи, и в зависимости от того, в какую сторону она отклонилась от заданного значения, оператор соответственно перемещает движок реостата. При этом отклонение реальной температуры в электропечи от заданной не должно превышать допустимого значения $\varepsilon(t)$. В системе имеет место так называемая обратная связь (ОС). Важнейшим звеном рассмотренного технологического процесса является *оператор*, следовательно, эта система является *ручной*.

При автоматическом управлении процессом воздействие на управляемый орган (реостат) осуществляет специальное управляющее устройство. Рассмотрим схему реализации приведенного технологического процесса без участия человека, в которой перемещение движка реостата в зависимости от наблюдаемого отклонения температуры осуществляется с помощью двигателя (привода). Поскольку с выхода термопары получают сигнал очень небольшой мощности (недостаточной для питания даже небольшого приводного двигателя), в схему вводят промежуточное звено — усилитель мощности. Схема реализации процесса закаливания металла в электропечи без участия человека представлена на рис. 1.4. Здесь сигнал $y(t)$ (заданной температуры в печи) называют *управляющим*, сигнал $x(t)$ (реальной температуры) — *управляемой переменной*, а систему, реализующую процесс закаливания, — системой автоматического управления.



Рис. 1.4. Функциональная схема автоматической системы, реализующей процесс закаливания металла в электропечи

Система автоматического управления представляет собой совокупность объекта управления (ОУ) и управляющего устройства, включающего в себя усилитель, реостат, измерительное устройство (датчик) и элемент сравнения. Объектом управления в данном случае является электропечь, а управляемой выходной переменной — температура. Под управляющим подразумевается устройство, обеспечивающее процесс управления, т.е. целенаправленное действие, приводящее к желаемому изменению управляемой переменной (температуры закаливания).

Для улучшения качества управления (например, уменьшения ошибки $\epsilon(t)$, степени колебательности и т.д.) в систему вводят дополнительный очень важный элемент — регулятор. Тогда схема САУ, представленная на рис. 1.4, будет иметь вид, показанный на рис. 1.5.

При создании и функционировании САУ параметры элементов 4...8 остаются неизменными, поэтому часть системы, включающая в себя эти элементы носит название *неизменяемой*. На практике неизменяемую часть часто называют объектом управления, а к управляющему устройству относят лишь регулятор. Именно его параметры изменяются в процессе проектирования САУ.

Рассмотрим еще несколько примеров конкретных автоматических систем.

В энергетике используется много САУ, предназначенных для регулирования уровня жидкости, например автоматические регуляторы уровня в парогенераторах, конденсаторах, компенсаторах давления, барабанах-сепараторах и др.

Большинство из перечисленных САУ построены по схеме, показанной на рис. 1.6.

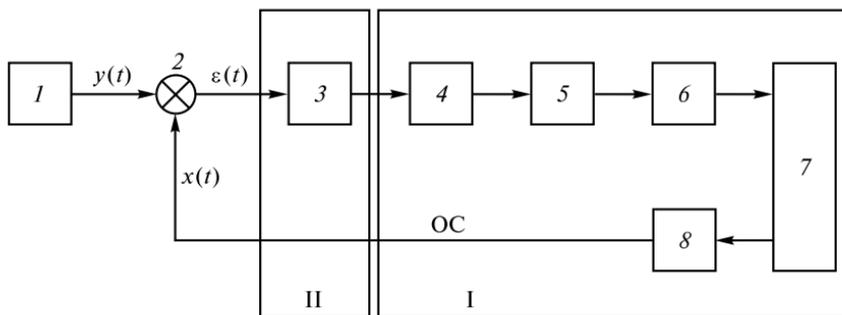


Рис. 1.5. Измененная функциональная схема системы автоматического управления процессом закаливания металла:

1 — задающее устройство; 2 — сравнивающее устройство; 3 — регулятор; 4 — усилитель мощности; 5 — привод (двигатель); 6 — реостат; 7 — электропечь; 8 — измерительное устройство (датчик); I — неизменяемая часть САУ; II — регулятор (изменяемая часть САУ)

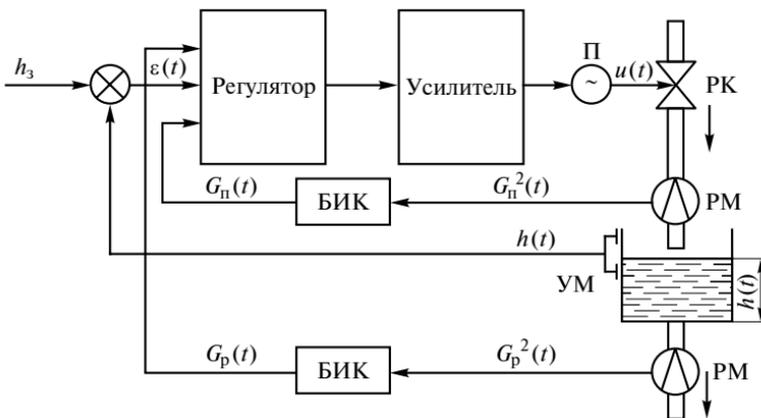


Рис. 1.6. Принципиальная схема системы автоматического регулирования уровня жидкости

Уровень жидкости $h(t)$ зависит от разности двух величин — ее притока $G_{\text{п}}$ и расхода $G_{\text{р}}$. Если $G_{\text{п}} > G_{\text{р}}$, уровень растет, и, наоборот, при $G_{\text{п}} < G_{\text{р}}$ уровень уменьшается.

Приток $G_{\text{п}}$ можно изменять посредством регулирующего клапана (РК), который управляется электроприводом (П).

Сигнал, соответствующий действительному уровню $h(t)$, измеряется уровнемером (УМ) и сравнивается с заданным уровнем h_3 .

В зависимости от значения и знака сигнала рассогласования $\epsilon(t)$ регулятор посредством электропривода увеличивает (при $\epsilon > 0$) или уменьшает (при $\epsilon < 0$) приток жидкости $G_{\text{п}}$, поддерживая равенство между $G_{\text{п}}$ и $G_{\text{р}}$ при заданном уровне h_3 .

Изменение расхода $G_{\text{р}}$ нарушает баланс в схеме, т.е. $G_{\text{р}}$ является возмущающим сигналом.

Для повышения точности регулирования наряду с сигналом $\epsilon(t)$ используется сигнал $G_{\text{п}}$, который обеспечивает местную обратную связь, или так называемое комбинированное регулирование.

Выходной сигнал некоторых расходомеров (РМ) пропорционален квадрату расхода жидкости, поэтому цепи измерения их расходов содержат блоки извлечения корня (БИК).

Воспользовавшись стандартными обозначениями можно записать: $y(t) = h_3$ — сигнал на входе системы (заданное воздействие); $x(t) = h(t)$ — сигнал на выходе системы (уровень жидкости); $n(t) = G_{\text{р}}(t)$ — сигнал возмущения (расхода жидкости).

Функциональная схема САУ уровнем жидкости может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1.7.

Мы рассмотрели замкнутые системы, в которых имеет место обратная связь, т.е. сравнение входного сигнала (эталона) с выходным (реальным значением регулируемой величины). Кроме того, существуют автоматические системы разомкнутого типа и

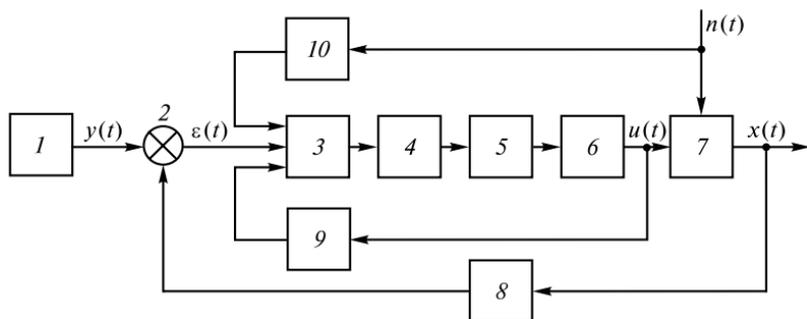


Рис. 1.7. Функциональная схема САУ уровнем жидкости:

1 — задающее устройство; 2 — сравнивающее устройство; 3 — регулятор; 4 — усилитель мощности; 5 — привод; 6 — регулирующий орган (клапан); 7 — объект управления; 8 — уровнеметр; 9, 10 — линейные расходомеры

комбинированные системы. В разомкнутых системах для выработки управляющего воздействия $u(t)$ (сигнала с выхода регулятора) используется только информация о цели управления $y(t)$, а действительное значение выходной управляемой переменной $x(t)$ не контролируется.

В качестве примера рассмотрим разомкнутую систему автоматического управления числом оборотов электродвигателя постоянного тока, функциональная схема которой представлена на рис. 1.8.

При ручном разомкнутом управлении нужное число оборотов двигателя, пропорциональное напряжению на входе усилителя, задается оператором путем перемещения движка потенциометра 1. С выхода потенциометра сигнал поступает на усилитель 2, вызывая изменение тока в якоре электродвигателя и соответственно его угловой скорости, которая измеряется тахогенератором 4 со стрелочным прибором, но не используется для замыкания системы.

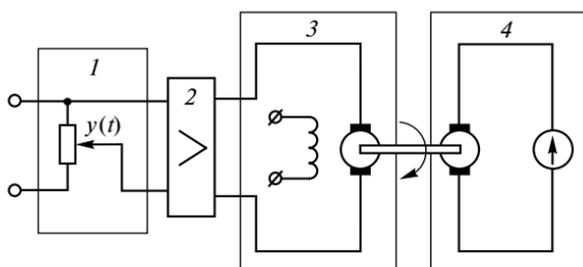


Рис. 1.8. Функциональная схема разомкнутой САУ числом оборотов электродвигателя:

1 — потенциометр; 2 — усилитель; 3 — электродвигатель; 4 — тахогенератор со стрелочным прибором

Вследствие старения, износа, неточности исполнения элементов и колебаний температуры градуировка системы (в которой каждому положению движка потенциометра должно соответствовать заданное число оборотов двигателя в установившемся режиме) нарушается, поэтому системы, работающие по разомкнутому циклу, часто не могут обеспечить высокое качество работы (высокую точность). Данную систему можно автоматизировать, при этом схема будет функционировать по замкнутому циклу, т. е. по принципу обратной связи и, следовательно, качество ее работы повысится. Функциональная схема такой замкнутой системы представлена на рис. 1.9.

В системе с замкнутым циклом в отличие от разомкнутой системы имеет место сравнение реального числа оборотов двигателя с требуемым. Сигнал рассогласования (ошибки) $\varepsilon(t)$ поступает на регулятор 2 и усилитель 3, т. е. управляет системой. Выбор структуры и параметров регулятора 2 должен обеспечить высокую точность работы системы. Замкнутая система не требует точной градуировки: ее точность сохраняется и при «ухудшении» параметров от эталонных из-за старения элементов или по другим причинам.

Поясним и уточним некоторые проблемы автоматического управления, используя рассмотренные конкретные САУ.

В соответствии с определением кибернетики как науки об управлении, передаче и переработке информации САУ являются кибернетическими системами, т. е. для САУ характерны понятия, составляющие основу кибернетики: управление, информация, система. Элементы САУ связаны между собой информационными каналами и линиями управления.

Отметим важное свойство САУ: они обладают свойствами и выполняют функции, которые существенно отличаются от свойств и функций их отдельных элементов.

Отличительной чертой рассмотренных САУ является поступление на их входы так называемой *обратной информации*, необходи-

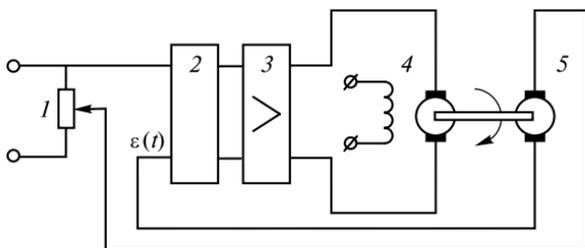


Рис. 1.9. Функциональная схема замкнутой САУ числом оборотов электродвигателя:

1 — потенциометр; 2 — регулятор; 3 — усилитель; 4 — электродвигатель; 5 — тахогенератор

мой для контроля (т. е. наличие обратной связи). Так как ОС замыкает канал управления, такое управление называют замкнутым.

При управлении с ОС значение управляющей переменной постоянно сопоставляется с ее заданным (эталонным) значением. Цель управления — сделать эти величины близкими, несмотря на различные помехи.

Контур управления — это система, состоящая из объекта управления и регулятора (управляющей системы, с помощью которой добиваются нужного качества управления).

К основным функциям контура управления относятся: измерение, сравнение и реагирование (выработка команды управления $u(t)$ объектом), которые должны по возможности выполняться оптимально. В этом случае контур управления, несмотря на различные помехи, будет постоянно поддерживать управляемую переменную близкой к ее заданному значению.

1.3. Цели и принципы управления

Уже на основе рассмотренных примеров можно сформулировать задачу управления: изменять протекающие в объекте управления процессы посредством соответствующих команд для достижения поставленной цели.

В основе ТАУ, рассматривающей общие принципы проектирования систем автоматического управления, лежат математические модели, отражающие связь элементов САУ друг с другом и внешней средой.

Теперь можно расширить определение САУ: системой автоматического управления называется система, представляющая собой совокупность объекта управления и управляющего устройства, обеспечивающего процесс управления, т. е. целенаправленное воздействие, приводящее к желаемому изменению управляемых переменных.

Фундаментальными принципами управления, содержание которых становится ясным из рассмотренных примеров, являются:

- принцип разомкнутого управления;
- принцип компенсации — управления по возмущению (если возмущающие воздействия в системе велики, для повышения точности разомкнутой системы на основе измерения возмущений в алгоритм управления вводятся коррективы, компенсирующие влияние этих возмущений);
- принцип обратной связи.

Далее мы будем рассматривать системы, работающие по принципу обратной связи.

Для САУ этого класса характерны:

- наличие обратной связи;

- преобразование слабых управляющих сигналов на входе, идущих от измерительного устройства, в достаточно мощные воздействия на объект (ток в цепи нагрева);
- наличие ошибки $\epsilon(t)$, являющейся движущим сигналом для системы, работающей на уменьшение этой ошибки;
- замкнутость системы через обратную связь, реализуемую с помощью измерительного устройства — термопары. Измерительный (чувствительный) элемент в этом случае служит не просто для регистрации температуры, а для формирования сигнала рассогласования $\epsilon(t)$, являющегося входным для усилителя, сигнал с которого затем подается на вход системы.

Использование принципа ОС позволяет дать еще одно определение САУ с акцентом на особом значении этого принципа: САУ — это система, стремящаяся сохранить в допустимых пределах рассогласование (ошибку) $\epsilon(t)$ между требуемыми $y(t)$ и действительными $x(t)$ значениями управляемых переменных с помощью их сравнения на основе принципа ОС и использования получаемых при этом сигналов для управления.

1.4. Типовая функциональная схема САУ

Приведенные примеры позволяют представить типовую функциональную схему САУ (рис. 1.10). Рассмотрим назначение каждого из элементов этой схемы.

Задающее устройство 1 преобразует воздействие $y_3(t)$ в сигнал $y(t)$, а сравнивающее устройство 2 в результате сравнения сигнала $y(t)$ и регулируемой величины $x(t)$ (предполагается, что элементы 10 и 11 не искажают сигнал $x(t)$) вырабатывает сигнал ошибки $\epsilon(t)$. Сравнивающее устройство также называют датчиком ошибки, отклонения, рассогласования.

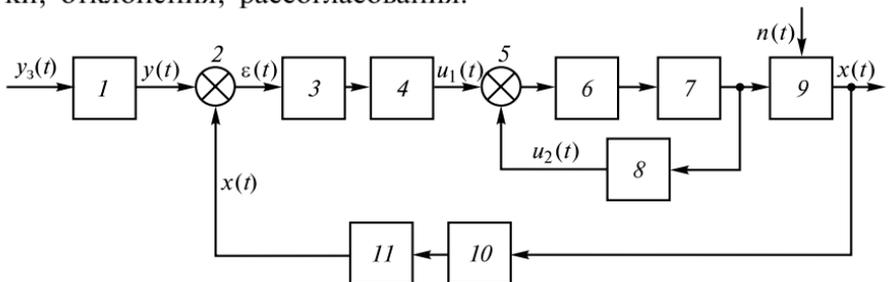


Рис. 1.10. Типовая функциональная схема САУ:

1 — задающее устройство; 2, 5 — сравнивающие устройства; 3 — преобразующее устройство; 4, 8 — корректирующие устройства (регуляторы); 6 — усилительное устройство; 7 — исполнительное устройство; 9 — объект управления; 10 — чувствительный (измерительный) элемент; 11 — элемент главной обратной связи; $n(t)$ — помеха

Преобразующее устройство 3 служит для преобразования одной физической величины в другую, более удобную для использования в процессе управления (во многих системах преобразующее устройство отсутствует).

Регуляторы 4, 8 служат для обеспечения заданных динамических свойств замкнутой системы. С их помощью обеспечивается высокая точность ее работы в установившемся режиме, а также демпфируются сильные колебательные процессы (например, летательных аппаратов). Более того, введение в систему регулятора позволяет устранить незатухающие или возрастающие колебания управляемой величины. Иногда регуляторы вырабатывают управляющие сигналы (команды) в зависимости от возмущающих воздействий, что существенно повышает качество работы систем, увеличивая их точность.

Из приведенной схемы САУ видно, что в хорошо спроектированной системе ошибка $\epsilon(t)$ очень мала, в то время как на управляемый объект должны поступать воздействия с мощностью, достаточной для питания двигателя. В связи с этим важным элементом САУ является усилительное устройство 6, предназначенное для усиления мощности сигнала ошибки $\epsilon(t)$, т.е. управления энергией, поступающей от постороннего источника. На практике широко используются электронные, магнитные, гидравлические и пневматические усилители.

Следующим важным элементом САУ является исполнительное устройство 7, предназначенное для воздействия на управляющий орган. Исполнительные устройства могут быть пневматические, гидравлические и электрические, которые подразделяются, в свою очередь, на электромоторные и электромагнитные.

Пневматические исполнительные устройства имеют сравнительно малые габариты и массу, но требуют большого расхода сжатого газа. Гидравлические исполнительные устройства способны преодолевать большие нагрузки и практически безынерционны. Их недостаток — большая масса. Электрические исполнительные устройства достаточно универсальны и отличаются удобством подведения к ним энергии. Вместе с тем их использование требует наличия достаточно мощного источника тока. В некоторых САУ исполнительный механизм как таковой отсутствует, и воздействие на объект осуществляется изменением состояния управляющей величины (тока, напряжения) без помощи механических устройств.

Чувствительный (измерительный) элемент — датчик 10 необходим в САУ для преобразования управляемых переменных в сигналы управления (например, угла в напряжение).

Элемент, который подвергается управлению, является объектом управления. При проектировании объектом управления считают всю неизменяемую часть САУ (т.е. все элементы, кроме регулятора). Это могут быть электрическая печь для закаливания

металла, самолет, ракета, космический аппарат, двигатель, ядерный реактор, станок для обработки металла и т.д. В связи с большим разнообразием объектов управления разными могут быть и управляемые переменные: напряжение, число оборотов, угловое положение, курс, мощность и т.д.

Из анализа рис. 1.10 можно сделать вывод о том, что САУ представляет собой замкнутую систему, обладающую свойством однонаправленности и реагирующую на сигнал ошибки $\epsilon(t)$.

Определим сигналы, представленные на рис. 1.10.

Сигнал $y(t)$ является преобразованным задающим воздействием (т.е. входным сигналом).

Сигнал $x(t)$ — управляемая переменная (т.е. выходная величина системы, реакция).

Сигнал $\epsilon(t)$ — сигнал ошибки (рассогласования).

Сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ — команды управления.

Дадим несколько определений.

Система, в которой сигнал $y(t)$ — известная функция (детерминированный сигнал) на всем промежутке управления, называется *системой программного управления*.

Система, в которой задающее воздействие $y(t) = \text{const}$, называется *системой стабилизации*.

Система, в которой задающее воздействие $y(t)$ — случайная функция, называется *следающей системой*.

Таким образом, одномерные системы могут быть системами программного управления, системами стабилизации и следающими системами.

Кроме того, на практике используются:

- системы с поиском экстремума показателя качества;
- системы оптимального управления;
- адаптивные системы.

1.5. Математические модели САУ

На первом этапе расчета и проектирования систем автоматического управления ограничиваются их качественным описанием на основе анализа функциональных схем. Такое описание называют содержательным, или неформальным. *Неформальным* описанием называется вся имеющаяся совокупность сведений о САУ, достаточная для построения фактического алгоритма ее работы. Неформальное описание содержит информацию, достаточную для построения функциональной схемы САУ, служащей основой для разработки ее *формального* (математического) описания.

Недостаток содержательного (неформального) описания САУ состоит в том, что в этом случае не оперируют количественными характеристиками и, таким образом, наука, в основе которой

лежит неформальное описание, не является точной наукой. Для исследования же и проектирования САУ необходимо оперировать количественными характеристиками, определяющими качество ее работы. В связи с этим центральным понятием в ТАУ является математическая модель или оператор системы.

Под математической моделью САУ понимают количественную формализацию абстрактных представлений об изучаемой системе. *Математическая модель* — это формальное описание системы с помощью математических средств: дифференциальных, интегральных, разностных, алгебраических уравнений, а также неравенств, множеств и т. д.

Используя понятие системного оператора, можно на единой основе рассмотреть понятие математической модели САУ.

Пусть U и X — множества входных и выходных сигналов САУ. Если каждому элементу $y \in U$ ставится в соответствие определенный элемент $x \in X$, то говорят, что задан системный оператор A .

Посредством системного оператора A задается связь между входом и выходом САУ:

$$Ax = y; \quad x = A^{-1}y = By.$$

Операторное уравнение (или уравнение с оператором A) $Ax = y$ следует считать математической моделью САУ, поскольку оно устанавливает количественную связь между ее входным $y(t)$ и выходным $x(t)$ сигналами.

Принципиально важным является ответ на вопрос: как построить оператор системы A ?

В подавляющем большинстве случаев операторные уравнения систем принадлежат к классу дифференциальных уравнений или эквивалентных им интегральных уравнений. Для получения дифференциального уравнения системы в целом обычно описывают отдельные ее элементы, т. е. составляют дифференциальные уравнения для каждого входящего в систему элемента. Например, для САУ, приведенной на рис. 1.4, составляют дифференциальные уравнения усилителя, привода, реостата, электрической печи, термопары и элемента сравнения.

Совокупность уравнений всех элементов и дает уравнение системы в целом.

Уравнение системы определяет ее математическую модель, которая к тому же для одной и той же системы в зависимости от цели исследования может быть разной.

Полезно при решении одной и той же задачи управления на разных этапах строить разные математические модели, т. е. начать исследование можно с простой модели, а затем ее постепенно усложнять с тем, чтобы учесть дополнительные физические явления и связи, которые на начальном этапе не учитывались (как несуществующие).

Задать оператор системы — это значит задать правило определения ее выходного сигнала по входному сигналу.

1.6. Классификация САУ

Системы автоматического управления можно классифицировать по различным признакам.

Классификация САУ по классам дифференциальных уравнений, которыми они описываются, приведена на рис. 1.11.

Линейными называют системы, описываемые линейными операторными уравнениями (например, линейными дифференциальными уравнениями или системами этих уравнений); в противном случае система входит в класс *нелинейных*.

Линейные и нелинейные *дискретные* системы описываются соответственно линейными и нелинейными разностными уравнениями или системами разностных уравнений.

Линейные и нелинейные *стационарные* системы описываются дифференциальными уравнениями или системами уравнений с постоянными коэффициентами.

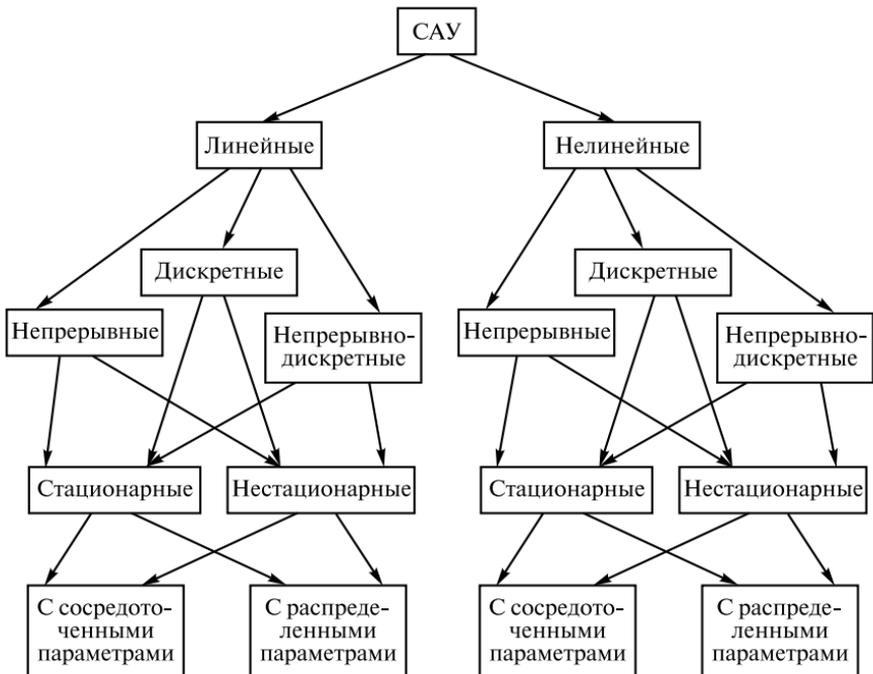


Рис. 1.11. Углубленная классификация САУ по классам дифференциальных уравнений

Линейные и нелинейные *нестационарные* системы описываются дифференциальными уравнениями или системами уравнений с переменными коэффициентами.

Сосредоточенные системы, или системы с сосредоточенными параметрами, описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Распределенные системы, или системы с распределенными параметрами, описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

По принципу действия различают:

САУ по отклонению — принцип И. И. Ползунова (первая система управления уровнем воды в баке паровой машины была создана им в 1765 г.);

САУ по возмущению — принцип Ж. Понселе (первая система управления по нагрузке на валу паровой машины была предложена им в 1830 г.);

комбинированные САУ, объединяющие принципы И. И. Ползунова и Ж. Понселе.

Рассмотрим структурные схемы этих типов САУ.

Структурная схема САУ по отклонению представлена на рис. 1.12. Легко заметить, что эта схема аналогична схеме типовой промышленной САУ.

Решая конкретную задачу управления работой паровой машины, Иван Иванович Ползунов и не предполагал, что его схемное решение будет использоваться через 200 лет в 80...90 % промышленных САУ.

Достоинством САУ по отклонению является то, что она компенсирует влияние любого возмущающего воздействия, которое вызвало отклонение значения ее выходного сигнала ($\pm\Delta X_{\text{вых}}$), изменением через цепь отрицательной обратной связи значения входного сигнала ($\pm\Delta X_{\text{вх}}$) с помощью сигнала μ , поступающего с регулятора.

Недостаток САУ по отклонению состоит в том, что отклонение выходного сигнала (например, вследствие нарушения технологического режима) должно сначала появиться, и только после



Рис. 1.12. Структурная схема САУ по отклонению

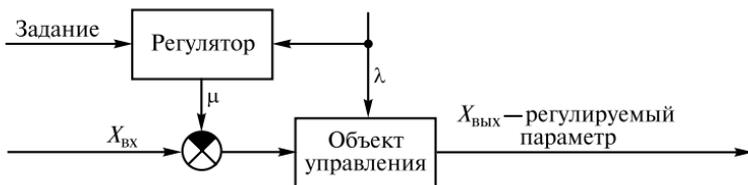


Рис. 1.13. Структурная схема САУ по возмущению

этого регулятор должен не только компенсировать возмущающее воздействие, но и свести к нулю отклонение от заданного значения регулируемого параметра $X_{\text{вых}}$. При использовании высокочувствительного датчика это отклонение может быть минимальным, но в принципе оно будет иметь место.

Структурная схема системы автоматического управления по возмущению представлена на рис. 1.13.

Иногда возмущающее воздействие (например, изменение температуры наружного воздуха) можно измерить, т.е. если λ единственное возмущающее воздействие на объект (например, сигнал поверхностного теплообменника, установленного на открытой площадке), его измеряют и подают на регулятор для сравнения с заданным значением и выработки управляющего сигнала μ , изменяющего значение входного сигнала.

При таком принципе управления изменение возмущающего воздействия компенсируется регулятором до того, как оно нарушит технологический режим работы объекта, что является главным достоинством этого типа САУ. Однако существенный недостаток таких систем — это неспособность компенсировать влияние других возмущающих воздействий на объект, которых в современных сложных установках бывает несколько и которые иногда невозможно измерить. Поэтому в промышленности САУ по возмущению используются редко.

Следует обратить внимание на то, что в САУ по возмущению выходной сигнал объекта или системы жестко (через цепь элементов) не связан с входным сигналом. Следовательно, САУ по возмущению является разомкнутой, т.е. системой без обратной связи по выходному сигналу.

Комбинированные САУ (рис. 1.14) лишены многих недостатков предыдущих рассмотренных схем.

Оператор-технолог обычно знает откуда ждать наибольшее возмущающее воздействие и, если его можно измерить, для компенсации устанавливается регулятор 1. Для компенсации влияния остальных возмущающих воздействий в цепь отрицательной обратной связи подключается регулятор 2. Таким образом, в комбинированных САУ используются и принцип И. И. Ползунова, и принцип Ж. Понселе.



Рис. 1.14. Структурная схема комбинированной САУ

По закону изменения во времени выходного сигнала задатчика различают САУ автоматической стабилизации, программные и следящие.

Отличительным признаком САУ автоматической стабилизации является постоянное во времени значение выходного сигнала их задатчика, т. е.

$$X_{\text{вых.зад}} = \text{const.}$$

Современные технологии — это в большинстве случаев технологии непрерывных производств, в которых заданный технологический режим не меняется сутками и месяцами. Объекты таких технологий, обладающих высокими технико-экономическими показателями (ТЭП), обычно управляются САУ автоматической стабилизации.

Отличительный признак программных САУ — это изменение выходного сигнала задатчика по заранее известной функции времени, т. е. по программе

$$X_{\text{вых.зад}} = f(\tau).$$

Программные САУ используются для управления периодическими процессами (металлообработкой, термообработкой изделий и др.). При этом способ задания программы может быть самый различный: от применения механического вращающегося кулачка до программы, записанной в микропроцессор.

В следящих САУ выходной сигнал задатчика заранее неизвестен, т. е. он может быть случайной величиной:

$$X_{\text{вых.зад}} = \text{var.}$$

Такая ситуация возникает, когда следящая система является вторичной и отслеживает параметр, значение которого заранее неизвестно. Например, при необходимости подачи воздуха в оп-

ределенном соотношении с расходом газа в топку котла. В этом случае расход газа меняется случайным образом под влиянием возмущающих воздействий, но система управления расходом воздуха должна выдерживать определенное их соотношение, т. е. должна следить за изменением расхода газа, который является для нее заданием.

По закону изменения во времени выходного сигнала регулятора различают САУ дискретные (двух-, трехпозиционные) и непрерывные (аналоговые).

Выходной сигнал регулятора в двухпозиционных САУ может принимать два резко отличающихся друг от друга значения: 0 — 1; включено — отключено; замкнут — разомкнут.

Примером двухпозиционной системы является бытовой холодильник с термореле.

На рис. 1.15 приведен временной график работы такой САУ. При отключенном циркуляционном насосе хладагента температура в камере холодильника постепенно повышается и, достигнув определенного значения ($+6^{\circ}\text{C}$), замыкает термореле, через контакт которого затем включается насос. При циркуляции хладагента температура в холодильнике снижается до $+2^{\circ}\text{C}$, термореле размыкает контакт цепи насоса, и цикл повторяется.

Двухпозиционные САУ надежны, дешевы, но точность регулирования параметра в них мала.

Реже применяются трехпозиционные САУ, в которых выходной сигнал регулятора может принимать три значения: -1 ; 0 ; $+1$ или больше — норма — меньше. Качество работы трехпозиционных САУ выше, но надежность ниже.

В аналоговых САУ выходной сигнал регулятора непрерывно изменяется во времени, иногда по сложному закону в определенном диапазоне. В Государственной системе приборов (ГСП) эти диапазоны стандартизированы.

Диапазон выходных сигналов пневматических регуляторов составляет $0,02 \dots 0,1$ МПа.

Электрические регуляторы имеют несколько стандартных диапазонов: $0 \dots 5$, $0 \dots 20$, $4 \dots 20$ мА; $0 \dots 10$ В и др.

В дальнейшем мы будем рассматривать методику исследования и математический аппарат, используемый при разработке САУ непрерывного действия, действующих по принципу И. И. Ползунова, так как таких систем в промышленности большинство.

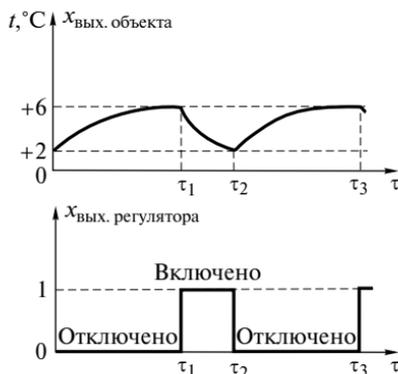


Рис. 1.15. Временной график работы двухпозиционной САУ

Контрольные вопросы

1. Что такое объект управления и чем отличаются его технологические и регулируемые параметры?
2. Чем отличается система автоматического управления от системы ручного регулирования?
3. Что такое возмущающие воздействия, входные и выходные сигналы САУ?
4. Поясните общую функциональную схему технологического процесса.
5. Поясните функциональную схему закаливания металла в электропечи.
6. Поясните схему и назначение основных элементов САУ процессом закаливания металла.
7. Поясните схему и назначение элементов системы автоматического регулирования уровня жидкости.
8. Поясните схему и назначение основных устройств замкнутой САУ уровнем жидкости.
9. В чем состоит различие разомкнутой и замкнутой САУ числом оборотов электродвигателя? Поясните назначение элементов этих САУ.
10. Поясните типовую функциональную схему САУ и назначение всех ее элементов.
11. Как классифицируются САУ по классам дифференциальных уравнений?
12. Как классифицируются САУ по принципу действия? Приведите примеры таких САУ.