МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К. И. Сатпаева

Ш. К. Кошимбаев, С. С. Жусупбеков

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рекомендовано Научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Алматы 2016

УДК 681-5(075.8)
ББК 32.965я73
К 76

Рецензенты:
Биттеев Ш. Б., д-р техн. наук, проф. КазАТК им. М.Тынышпаева
Топоров В. И., д-р техн. наук, проф., ген. Директор ТОО «Систематехника»
Бекбаев А. Б., проф., зав. каф. КазНИТУ им.К.И.Сатпаева

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2016 г.

Кошимбаев Ш. К., Жусупбеков С. С.

К76 Автоматизация типовых технологических процессов: Учеб. пособие для вузов / Кошимбаев Ш. К., Жусупбеков С. С. – Алматы: КазНИТУ, 2016. – 276 с.

ISBN 978-601-228-930-5

Рассмотрены теоретические вопросы сбора и переработки технологической информации, принципы построения типовых АСУТП, этапы анализа сложных систем, применения вычислительной техники как основы управления системами. В учебном пособии значительное место уделено техническим средствам автоматизации, интерфейсу между техническим процессом и системой, а также рассмотрены вопросы проектирования функциональных схем систем измерения и автоматизации некоторых типовых технологических процессов. Изложены методы определения динамических характеристик объекта управления и синтеза систем автоматического регулирования, а также рассмотрены вопросы цифрового управления.

Учебное пособие соответствует ГОСО подготовки бакалавров по специальности 5В070200 «Автоматизация и управление» и может быть полезна магистрантам и докторантам по данной специальности.

ISBN 978-601-228-930-5

© Кошимбаев Ш. К., Жусупбеков С. С., 2016
© КазНИТУ, 2016

ВВЕДЕНИЕ

В современном промышленном производстве особое значение приобретает развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Внедрение автоматизированных систем управления в различные сферы хозяйственной деятельности, и в первую очередь в проектирование, управление оборудованием и технологическими процессами, способствует ускорению научно-технического процесса. Для решения этих задач необходимо осуществить подготовку квалифицированных специалистов, способных создавать и обслуживать современное промышленное производство, базирующееся на вычислительной технике, гибких автоматизированных системах и робототехнических комплексах.

Специалист в области автоматизации промышленных установок, занимающийся разработкой, монтажом и наладкой современных систем управления промышленным оборудованием, по характеру своей деятельности сталкивается как с теоретическими, так и с практическими задачами автоматизации. Решить эти задачи рационального использования автоматизированных систем различного назначения без глубокого знания теории и практики автоматического управления, микроэлектроники, теории электропривода, технологических процессов, вычислительной техники, экономики невозможно.

Для решения задач проектирования и эксплуатации АСУ ТП специалисту требуются знания принципов построения математических моделей технологических процессов и оборудования, элементов теории сбора и переработки технологической информации, формирования сигналов управления для передачи их исполнительным органом – приводом различных типов, обеспечивающим функционирование систем в соотвествии с поставленными задачами, а также практические знания функциональных и структурных принципов построения АСУ ТП. Специалисту необхо-

димы также знания в области вычислительной и микропроцессорной техники. Все это нашло отражение в программе курса «Автоматизация типовых технологических процессов».

В соответствии с программой в учебном пособии рассмотрены теоретические вопросы сбора и переработки технологической информации, принципы построения типовых АСУ ТП, применение вычислительной техники как основы управления системами. Учебное пособие может быть использовано как при изучении курса, так и при выполнении курсовых и дипломных проектов.

1. СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И АСУ ТП. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМЫ

1.1. Классификация и структура современных технологических объектов управления. Виды объектов технологии

Развитие современного производства идет по пути создания высокоэффективных промышленных установок, обеспечивающих интенсификацию технологических процессов и систем управления ими. При этом постепенно был осуществлен переход от ручного управления технологическими процессами к автоматизированным и далее – к полностью автоматическим. Все это привело к выделению в науке об управлении самостоятельного раздела, перед которым ставятся задачи разработки методов и систем автоматизации технологческих процессов. К 1974 г. эти системы получили название «Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП)», и появились первые ГОСТ, регламентирующие терминологию, основные положения, а в дальнейшем – весь процесс создания, введения в эксплуатацию и собственно эксплуатацию таких систем.

Автоматизированной системой управления (АСУ) называется *человеко-машинная система*, обеспечивающая автоматизированный сбор и переработку информации, необходимой для оптимизации управления в различных сферах человеческой деятельности. АСУ технологического процесса (АСУ ТП) – это автоматизированная система управления для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятым критерием качества управления. Определенный таким образом термин «АСУ ТП» является основополагающим при формулировании всех последующих задач автоматизации технологических процессов. ГОСТ устанавливает также определение технологического объекта управления как совокупности технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим инструкциям или регламентам технологического процесса производства.

1.2. Классификация и структура технологических объектов управления

Множество разнообразных технологических объектов управления, отличающихся физической природой, видом перерабатываемого сырья и энергии, технологическим оборудованием, затрудняет рассмотрение всех видов технологии. Однако в системе промышленного производства можно выделить два существенно отличных класса технологических процессов: добычу исходного сырья и переработку сырья или полуфабриката в готовый продукт. В последнем случае готовым продуктом может быть и полуфабрикат, служащий исходным материалом для дальнейшей переработки. В свою очередь каждый из этих классов технологических процессов имеет специфические стороны. Так, первый может быть разделен на добычу твердых, жидких или газообразных продуктов. Во втором – переработка сырья или полуфабриката – выделяются отрасли с технологией изменения агрегатного состояния или химического состава вещества и процессы, технология которых направлена на изменение формы исходной заготовки или исходного материала.

Транспортировка сырья, полуфабрикатов и готовой продукции может рассматриваться в качестве самостоятельного класса. Здесь можно выделить технологические и межпроизводственные или межотраслевые транспортные средства.

На рис. 1.1 показана классификация промышленного производства по указанному выше признаку. Каждый класс имеет два четко выраженных подкласса. В подклассе добычи твердого сырья выделены три самостоятельные отраслевые технологии: подземных и открытых разработок и воднотранспортная (драги, земснаряды и др.); подкласс добычи жидкого или газообразного сырья представлен технологиями бурения и откачки.

Подкласс получения продукции, связанной с процессами изменения агрегатного или физико-химического состояния материала, присущ таким отраслям, как энергетика, химическая промышленность, металлургия и др.). В этих процессах используются различные виды энергии (тепловая, электрическая, химическая, атомная). Энергоноситель поступает к технологическому агрегату в виде пара, газа, компонентов исходных материалов

(например, кокс в доменном и агломерационном производстве). Управляемыми параметрами здесь являются поток материала и его состав, а также поток энергоносителя и его состав.

В данном случае технологическими объектами управления являются транспортные, дозирующие и массоизмерительные устройства, подготавливающие технологический процесс изменения агрегатного и физико-химического состояний исходных процессов определяет их взаимную связь с транспортировкой и дозированием, что позволяет рассматривает весь технологический комплекс как единый технологический объект управления.

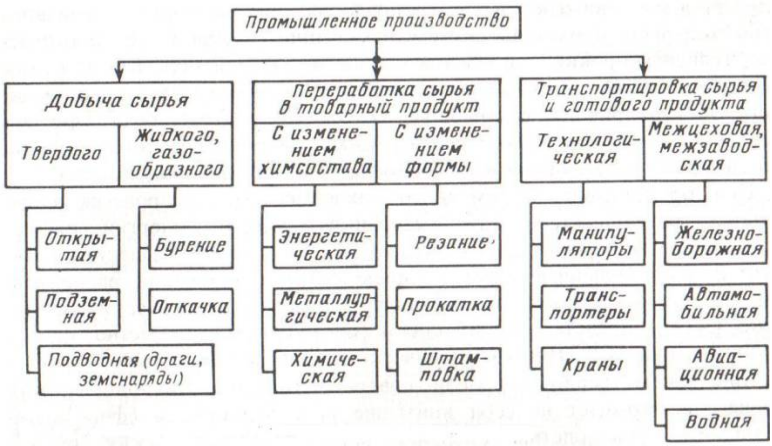


Рис. 1.1. Классификация промышленного производства

Подкласс производства продукции, связанный с изменением формы исходного сырья или полуфабриката, включает любые процессы поточного или индивидуального производства. К ним могут относиться прокатка, штамповка, волочение, формовка, обработка резанием и т. д. Здесь используется только один вид энергии – механическая, источником которой в подавляющем большинстве случаев служит автоматизированный электропривод. Управляемым параметром является поток энергии.

Объединение ряда производственных механизмов в общий технологический комплекс осуществляется с помощью транспортных средств и механизмов изменения ориентации изделия.

Наиболее характерной машиной в таком производстве становится управляемый манипулятор – промышленный робот.

Технологическая транспортировка объединяет устройства перемещения сырья, полуфабрикатов и готовой продукции в соответствии с расположением технологического оборудования и требованиями технологического процесса.

При организации современного технологического процесса выделяются три подсистемы преобразования: вещества, энергии, информации. Среди перечисленных подсистем невозможно выделить главную и второстепенные. Они в своем функционировании равноправны, так как образуют автоматизированный технологический комплекс (АТК), представляющий собой совокупность совместно функционирующих АСУ ТП и технологического объекта управления.

При рассмотрении вопросов совершенствования технологических процессов обращает на себя внимание роль человека в сфере материального производства. Создание новых технологических процессов, разработка новых производительных механизмов, появление новых управляемых источников энергии приводит к тому, что роль человека практически сводится к переработке информации и выдаче управляющих воздействий. Этот процесс складывается из следующих этапов: а) накопления и хранения априорной информации (процесс обучения и знакомства с конкретным технологическим объектом); б) приема исходной информации, содержащей конкретное оперативное задание по управлению объектом, получаемое непосредственно перед работой; в) сбора текущей информации о соответствии хода технологического процесса установленному заданию и перегрузках оборудования; г) преобразования трех видов информации (априорной, исходной и текущей) в целях принятия на управление объектом; д) воздействия на органы управления объектом эффекторами (рукой, ногой, голосом и т. п.) для реализации принятых решений.

С развитием материального производства низкая информационная производительность человека-оператора становится тормозом технического процесса. Человек не успевает воспринимать через органы чувств возросшее количество показаний индикационных приборов, необходимых для принятия соответствующего

правильного решения. Он не состоянии запомнить все правила управления технологическим оборудованием и рекомендации по ведению процесса. В ряде случаев, даже приняв правильное решение, оператор не успевает передать команду управляемому объекту. Попытка решить задачу путем увеличения числа операторов выдвигает проблему согласованности их действий.

Речь, естественно, идет не об ограниченности интеллектуальных и творческих возможностей человека, а о том, что нерационально и неэффективно использовать человека для переработки большого объема информации при ее шаблонной повторяемости в каждом цикле технологической операции и что управление человеком-оператором быстро-протекающими процессами невозможно.

Таким образом, только механизация переработки информации с помощью АСУ ТП снимает это препятствие на пути технического прогресса в области материального производства.

1.3. Понятие системы. Системный подход к управлению системами

Производственные процессы и управляющие ими системы состоят из многочисленных и разнообразных элементов, сложным образом взаимодействующих друг с другом. Эти элементы связаны между собой так, чтобы обеспечить обмен материей, энергией и информацией для получения определенного конечного результата.

Термин *"система"* имеет много значений, однако в интересующем нас контексте под системой понимается любой объект, который рассматривается, с одной стороны, как единое целое, а с другой – как совокупность связанных между собой определенным образом составляющих. Это понятие можно охарактеризовать следующим образом. Понятие системы позволяет проще интерпретировать назначение любой сложной структуры, состоящей из взаимодействующих друг с другом частей.

Описывая систему, ее можно по-разному разбить на составные части. Каждая из частей в свою очередь может быть разбита на более мелкие составляющие. Важно выбрать правильный уровень детализации.

Обычно нет необходимости знать внутренние механизмы

элемента для того, чтобы предвидеть поведение системы в целом. Достаточно знать соотношение вход/выход – принцип *"черного ящика"*.

Слово *«система»* – толковый словарь Ожегова среди прочих дает следующую интерпретацию: «Нечто целое, представляющее собой единство закономерно расположенных и находящихся во взаимосвязи частей».

Цель системы – получить результат, качественно или количественно превосходящий механическую (простую) сумму результатов работы отдельных ее компонентов. Объединение в систему добавляет *"нечто большее"*, что и объясняет ее назначение, – принцип *"синергизма"*. Это *"нечто большее"* определяется не наличием тех или иных компонентов системы, а скорее есть результат их взаимодействия.

На практике встречаются системы самых различных типов, например электрические, химические, механические или биологические. Компьютер – это система, основными функциональными элементами которой являются процессор, память и периферийные устройства. Взятые порознь, эти части не допускают никакого осмысленного применения. Если их объединить и добавить программное обеспечение, то получится система, которую можно использовать для решения многих задач. Человеческий организм представляет собой пример чрезвычайно сложной системы, состоящей из органов, каждый из которых имеет свое назначение. Он способен выполнять основную задачу – поддерживать собственную жизнь – именно потому, что все органы работают вместе.

Для описания систем и их элементов можно применять разнообразные математические методы. Как подчеркнуто в большинстве учебников, эти методы можно использовать, только когда все элементы системы и окружающая ее среда описываются количественными соотношениями. Математический подход – это не единственный способ описания систем. Очевидное преимущество математических методов в том, что они основаны на формальных доказательствах, и поэтому, как правило, им следует отдавать предпочтение перед другими методами.

Важнейшей характеристикой системы является ее динамика, знание которой позволяет предсказать поведение системы и выбрать правильное управляющее воздействие в соответствии с поставленной целью. Динамика системы представляет собой сложный вопрос из-за того, что приходится учитывать многочисленные взаимодействия между различными частями. Часто кажется, что эволюция системы идет *"не в том"* направлении или по крайней мере не соответствует *"интуитивным"* ожиданиям. Любой водитель инстинктивно представляет себе динамику автомобиля. При движении вверх или вниз по склону он увеличивает или уменьшает давление на педаль газа для того, чтобы сохранить скорость. Нормальное поведение автомобиля хорошо известно и прогнозируемо, однако на мокрой или обледенелой дороге он может стать неуправляемым. Аналогичные проблемы возникают ежедневно и в управлении техническими процессами.

В крупных технических задачах одной из важнейших проблем является структурирование системы. В процессе эксплуатации взаимодействуют множество людей, происходит постепенная замена оборудования и добавление новых функций. Сложную систему необходимо рассматривать как с общих позиций, так и с позиций всех ее компонентов.

Возникающие проблемы обычно нельзя разрешить только на одном уровне – их надо рассматривать под соответствующим углом зрения и на соответствующем уровне. Это не означает, что требуется знать все детали каждой конкретной ситуации, а скорее предполагает возможность при необходимости получить любые подробности. Решение, выработанное на несоответствующем уровне, чаще всего вообще не является решением и может даже ухудшить ситуацию. Нет смысла искать ошибки в программе, которая не выполняет предусмотренную печать, если выключен принтер. Каждый инженер имеет собственный набор анекдотов по этому поводу.

Границы между компетенцией инженеров-электронщиков, программистов, прикладных специалистов и пользователей в настоящее время постоянно размываются. Нельзя рассматривать сложную систему только с одной точки зрения, а решения принимать, опираясь на знания специалистов лишь из одной области.

Чтобы понять или создать сложную систему, состоящую из множества взаимодействующих частей, необходим специальный подход. Далее будут даны некоторые рекомендации для успешного анализа и проектирования автоматизированных систем.

1.4. Системный подход к управлению сложными системами

Типичными примерами сложных систем могут служить крупные производительные и энергетические комплексы с автоматизированным управлением, некоторые экономические системы, вычислительные комплексы, предназначенные для обработки информации и планирования и т. д.

Отличительными чертами сложных систем являются:

1) наличие большого числа элементов;

2) сложный характер связей между отдельными элементами;

3) сложность функций, выполняемых системой;

4) наличие управления, как правило, сложно организованного;

5) необходимость учета взаимодействия с окружающей средой и взаимодействия случайных факторов.

Отметим, что решение вопроса, считать ли некоторую систему сложной или нет, находится в руках исследователя и зависит от задач, которые перед ним стоят. Очевидно, например, что любую реальную систему можно рассматривать как систему, стоящую из большого числа элементов, что все они между собой и с внешней средой связаны различным образом, подвержены влиянию случайных воздействий и т. д., но не менее очевидно, что во многих случаях мы эти факторы (или некоторые их них) не учитываем (что иногда происходит из-за ограниченности наших возможностей). Из всего многообразия проблем теории сложных систем рассмотрим лишь две – именно те, которые возникают в каждом процессе принятия решений:

1) математическое описание изучаемой системы, т. е. ее математическое моделирование;

2) наилучшее, в некотором заранее определенном смысле, управление системой.

Все процессы, осуществляемые на производстве, могут быть представлены в виде управляемых кибернетических систем.

Кибернетика изучает различные по своей природе объекты с одной определенной стороны – с точки зрения установления общих закономерностей управления.

Характерные черты кибернетического метода исследования:

1. Широкое применение аналогий между разными объектами.

2. Широкое применение математического моделирования, устанавливающего общие качественные и количественные закономерности процессов, происходящих в различных объектах.

Исследуя общие закономерности управления в живых организмах и в объектах, созданных человеком, кибернетика выработала ряд общих понятий, среди которых можно выделить в первую очередь понятие системы. (Другие понятия – это информация, хранение и переработка информации, управление системами).

Таким образом, под понятием *«система»* понимается совокупность взаимосвязанных элементов.

Каждая система состоит из ряда составляющих частей, называемых *подсистемами*. Например, организм человека состоит из подсистем: кровообращения, нервной системы и т. д.

Предприятие состоит из различных цехов, служб, а каждый цех в свою очередь состоит из производственных участков.

Система – это греческое *«целое»*, составленное из частей.

Система является единым целым, относительно изолированным от окружающей среды.

Так, например, совокупность элементов, образующих машину, существует в известной мере самостоятельно. В этом случае можно говорить об этой системе как независимой от других систем.

В то же время любая система оказывает влияние на нее и в свою очередь подвергается воздействию со стороны системы. Та часть системы, которая воспринимает воздействие окружающей

среды, называется *входом*, а часть, которой данная система воздействует на другие системы, *выходом*.



Рис. 1.2. Схема взаимосвязи входа и выхода системы

В одной системе может быть один или несколько входов и выходов. Например, регулятор Уатта паровой машины имеет один вход и один выход. На входе происходит изменение давления в котле, на выходе – открывание и закрывание клапана. Человек имеет множество входов и выходов в виде нервных клеток, воспринимающих воздействия и реагирующих на них.

Важнейшим элементом любой системы является процесс, преобразующий вход в выход. Например, сталеплавильный процесс преобразует чугун и железный лом в стальные слитки, а процесс прокатного производства – стальные слитки в готовый прокат.

Способность преобразовывать данный вход в данный выход называют свойством процесса.

В качестве примера рассмотрим связи между процессом, входом и выходом в прокатном цехе, представленном на рис. 1.3.

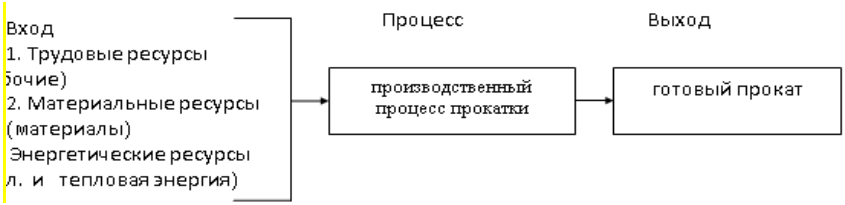


Рис. 1.3. Схема преобразования данного входа в данный выход

Производственный процесс может быть разделен на несколько стадий. Каждая из этих стадий процесса образует подсистему со своими входами и выходами. В свою очередь подсистемы могут быть разработаны на более мелкие подсистемы, которые технологически связаны с подсистемой верхнего уровня.

Подсистемы, входящие в состав данной системы, связаны между собой при помощи входов и выходов.

Простейшим является последовательная связь подсистем (рис. 1.4).

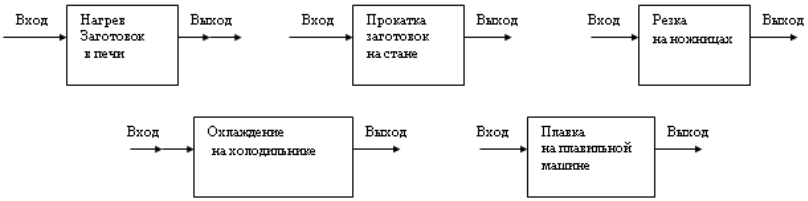


Рис. 1.4. Пример схемы последовательной связи подсистем в сортопрокатном цехе

При другой форме выходы нескольких подсистем соединяются с выходами одной системы. Примером такой формы является связь между операциями нагрева слитков в нагревательных колодцах и процессом прокатки слитков на обжимном стане (рис. 1.5).

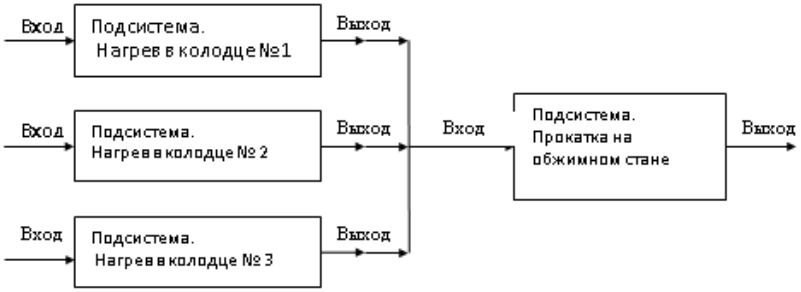


Рис. 1.5. Схема связи выхода нескольких подсистем с выходом одной подсистемы в обжимном цехе

Система может быть во многих различных состояниях. Так, машина является системой, а движение ее механизмов для осуществления различных операций определяет состояние этой системы.

Одни состояния системы сменяются другими. Так, например, если производить нагрев слитков, то будет происходить последовательная смена их температурных состояний.

Для каждой системы существуют определенные границы возможных изменений ее состояний. При переходе за эти границы данная система превращается в другую систему. В пределах же этих границ система не преобразуется в другую, а лишь меняет свое состояние.

Например, нормальная жизнедеятельность организма человека возможна лишь в определенных температурных пределах. Металл сохраняет твердость до известной температуры, выше которой он переходит в жидкое состояние.

Изменения в состояние системы вызывается множеством причин, которые имеют тенденцию выводить систему из трех границ, в пределах которых она может существовать.

Например, во время интенсивной деятельности человека в его организме накаливаются вредные вещества – углекислый газ, кислота, а также повышается температура тела.

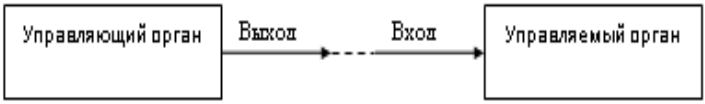
Второй пример: Во время работы машины ее детали постепенно изнашиваются, что приводит к снижению точности ее работы, к повышению вибрации и т. д.

Система может сохраниться лишь в том случае, когда она оказывается способной ликвидировать последствия разрушительных воздействий внешней среды. Процесс управления предназначен для создания именно этих реакций.

Всякая система состоит из управляющего и управляемого (исполнительного) органов.

Например, у человека управляющими органами управления являются головной мозг и центральная нервная система, а управляемыми, исполнительными органами – мышцы рук, ног, головы, туловища, при помощи которых осуществляются различные движения.

Второй пример: В машинах управляющими органами являются различные устройства, осуществляющие заданные перемещения рабочих органов.



Рассмотрим схему связи управляющего и управляемого органов:

Как видно, выходы управляющего органа соединены с входом управляемого органа.

Основной задачей управляющего органа является создание приспособительных реакций по отношению к внешним раздражительным или так называемым *возмущающим воздействиям*.

Чтобы справиться с этой задачей, управляющий орган должен получить сведения (или информацию) о тех условиях, в которых находится система, также об изменениях, протекающих в самой системе.

Например: человек, управляющий машиной, получает информацию о фактических параметрах процесса (температуре, давлении, скорости и т. д.), следя за показаниями приборов.

Второй пример: Автоматические регуляторы получают информацию обо всех изменениях в исполнительных различных органах машины.

Передача информации осуществляется посредством какого-либо материального носителя. Например, разговаривая по телефону, человек получает информацию по средствам звуковых волн. Передача же информации от органов слуха человека до мозга осуществляется с помощью нервных клеток. Любая искусственная система предназначена для удовлетворения определенных потребителей.

Например, медеплавильных цех предназначен для удовлетворения потребности электролизного цеха в анодной меди, а электролизный цех – для удовлетворения потребности прокатных цехов в слитках чистой меди.

Во всех случаях потребности потребителей удовлетворяются выходами соответствующих систем. Так, потребность металлургического предприятия в руде удовлетворяется выходами различных горнорудных предприятий. Потребители данной системы предъявляют к ее выходу определенные требования в виде показателей эффективности. Так, например, производственный процесс, выполняемый в цехах металлургического завода, оценивается четырьмя показателями:

1) Производительностью процесса;

2) Длительностью цикла осуществления заданного объема работ;

3) Количеством материальных, трудовых, энергетических и денежных ресурсов, расходуемых на единицу работы;

4) Количеством результатов работы в единицу времени.

В зависимости от требований, предъявляемых к выходу данной системы, соответствующими потребителями ее продукции, один из показателей выбирается в качестве главного или критерия эффективности. Его величина должна быть max или min.

Например, критерием эффективности медеплавильного цеха является себестоимость 1 т черновой меди, зависящая от удельного расхода материалов, трудовых, энергетических и денежных ресурсов.

При этом другие показатели работы цеха не должны выходить за определенные пределы (ограничения).

Совокупность критерия и показателей эффективности представляют собой модель выхода.

В результате возмущающих воздействий фактически выход данной системы может отклоняться от модели выхода. Возникает в связи с этим необходимость в своевременном выявлении и ликвидации нежелательных отклонений. Эту функцию управляющий орган выполняет, используя процесс обратной связи.

Схема процесса управления при помощи обратной осуществляемая плавильщиком показана на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Схема процесса управления при помощи обратной связи

Сложная производственная система на примере медного завода представлена на рис. 1.7.

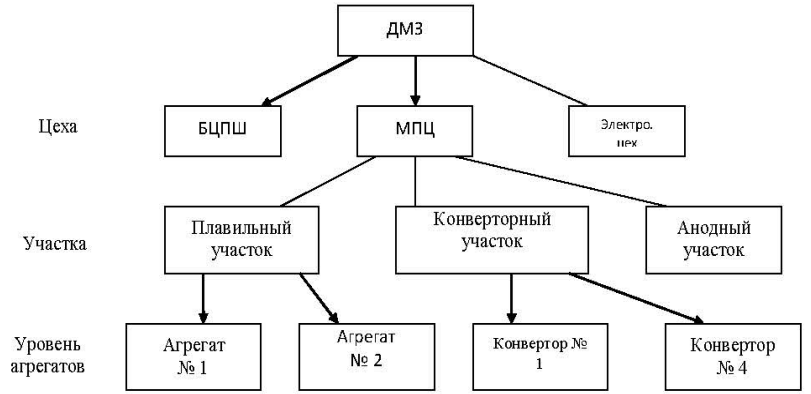


Рис. 1.7. Структура металлургического завода

Поведение отдельных элементов и систем в целом может изучаться в состоянии равновесия, когда входные и выходные величины не меняются во времени. Это состояние системы называется *статикой системы или процесса*. А зависимость между входными переменными и выходными переменными в установившемся состоянии системы называются *статическими характеристиками системы*. В общем случае связь в системе описывается уравнением (1.1), описывающем схему на рис. 1.8.

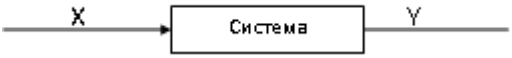


Рис. 1.8

$$X = F(Y). \qquad (1.1)$$

Входные и выходные переменные в статике связаны алгебраическими соотношениями типа

$$Y = b_0 + b_1 X. \qquad (1.2)$$

Статические характеристики бывают линейными и нелинейными (рис. 1.9).



Рис. 1.9

Системы, состояния которых во времени изменяются, называются *динамическими системами*, т. е. эти системы характеризуются изменением входных и выходных величин во времени в переходных режимах.

Переходной режим процесса – это изменение величин системы во времени в процессе перехода системы из одного состояния в другое.

Изменение величин в переходных процессах описывается дифференциальными уравнениями и называется динамикой процесса.

Виды переходных процессов представлены на рис. 1.10.

1 – Монотонно устойчивая система. Апериодический переходной процесс.

2 – Апериодический процесс с нерегулированием.

3 – Колебательный переходной процесс сходящийся.

4 – Устойчивый колебательный процесс. Система находится на границе устойчивости.

5 – Расходящийся колебательный процесс.

6 – Монотонно неустойчивая система.

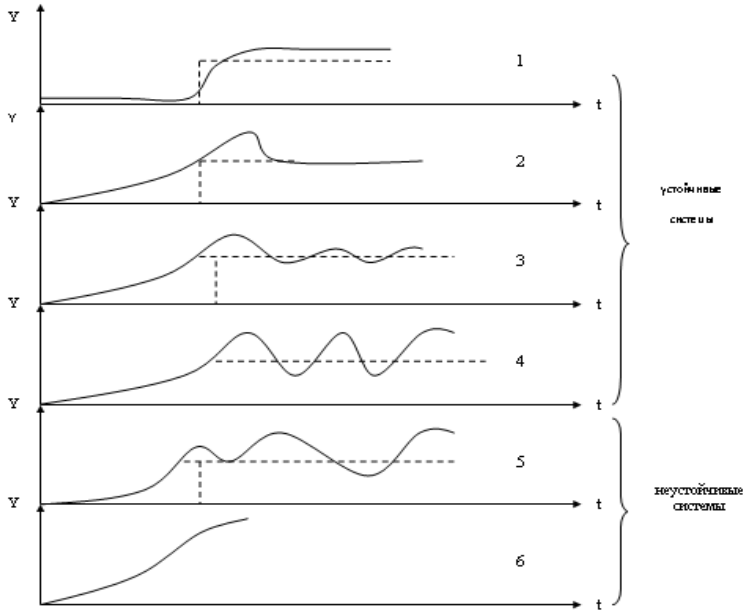


Рис. 1.10. Переходные процессы в системе

Линейность и нелинейность систем и их описаний. Система называется *линейной*, если реакция системы на сумму двух входных воздействий рана сумме реакций системы на каждое воздействие в отдельности.

$$F(ДX_1 + ДX_2) = F(ДX_1) + F(ДX_2). \qquad (1.3)$$

Если равенство (1.3) не выполняется, то система относится к классу нелинейных систем.

Примером математического описания линейных систем, т. е. зависимость выхода от входа системы является уравнение следующего вида:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \ldots a_n x_n .$$

Классификация систем

В основу классификации систем управления заложены различные принципы, к которым в основном относятся (рис. 1.11):

1) по методу управления;
2) по характеру использования информации;
3) по результатам работы в установившемся состоянии;
4) по числу управляемых величин;
5) по характеру воздействия во времени;
6) по виду математического описания.

Непрерывные и дискретные системы. Из понятия управляемость «системы» мы знаем о состоянии системы – X (x_1, $x_2 \ldots x_n$) – вектор состояния системы. Если объединить пару – время ф и состояние системы X, то эту пару называют *событием системы*, а множество всех пар (ф, X) – *пространством событий и системы*.

В системах любая переменная и время могут быть представлены непрерывным или дискретным рядом значений.

Вектор состояния системы может изменяться либо в любой момент времени из бесконечного множества моментов времени, либо в дискретные, обычно равностоящие моменты времени.

В первом случае имеем непрерывную систему, а во втором – систему с дискретным временем.

Иначе говоря, в непрерывных системах информация о работе систем и управляющее воздействия – непрерывные функции времени.

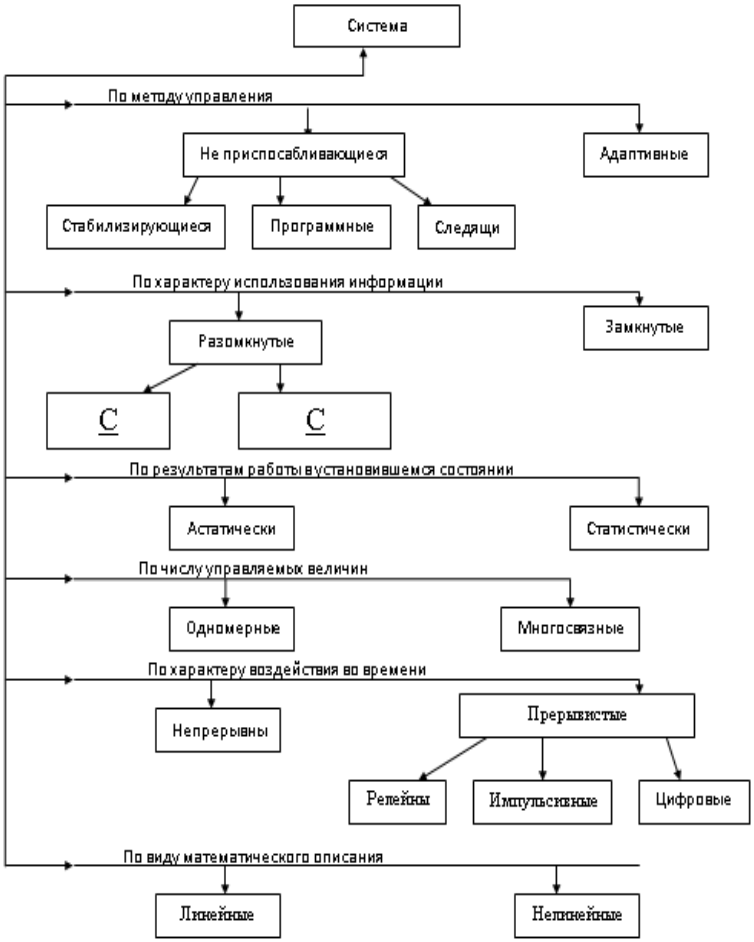


Рис. 1.11. Схема классификации систем

В каждом элементе непрерывных систем при наличии непрерывного изменения входной величины непрерывно меняется и выходная величина.

Примером непрерывной системы является прокатный стан (рис. 1.12).

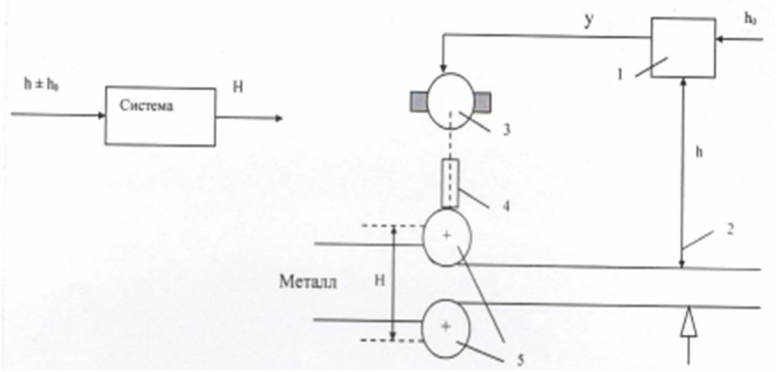


Рис. 1.12. Система регулирования толщины прокатываемого металла
1 – регулятор толщины листа; 2 – измеритель толщины; 3 – электродвигатель; 4 – нажимные винты; 5 – прокатные валки

Здесь входом системы является толщина h (или $h_0 \pm h$), а выходом системы – расстояние между прокатными валиками.

Детерминированные и стохастические системы. Система называется *детерминированной*, если в любой момент времени t можно одназначно определить ее новое состояние в момент времени t + dt (для непрерывных систем) или t + Дt (для систем с дискретным временем).

Уравнение 1.4 является примером описания детерминированной системы, приведенной на рис. 1.13.

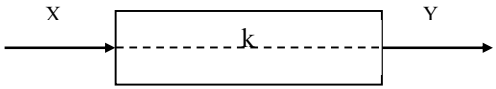


Рис. 1.13

$$\frac{dy}{dt} = kx \quad . \qquad (1.4)$$

Детерминированные системы (процессы) описываются фундаментальными законами физики, химии, (законы Ньютона, переноса вещества, энергии).

Стохастическими называются такие системы, в которых изменение определяющих величин происходит беспорядочно и часто дискретно. При этом значение выходной величины не находится в однозначной зависимости с входной величиной. Для описания стохастических систем используют статистико-вероятные методы.

Для большинства технологических систем все характернее становится замена однозначного детерминизма более свободной и многозначной стохастической, вероятной картиной связи между событиями. Это является также общей особенностью новых физических наук, таких как квантовая физика, по сравнению со старыми, такими как ньютоновская механика.

Причиной такой замены в науке об управлении является переход от изучения простых систем и единичных явлений к использованию сложных систем и массовых явлений, при котором важен уже не результат отдельного события, а общий эффект основной массы событий.

Так, если проследить за тенденцией развития теории управления, то можно установить, что на ранних стадиях развития главенствовал детерминистический подход, в соответствии с которым входные воздействия (полезные и возмущающие) задавались в виде известных функций времени.

Затем стал использоваться статистический подход. В этом случае воздействия рассматривались как корреляционные функции, спектральные плотности, дисперсионные отношения.

Контрольные вопросы:

1. Что понимается под понятием *«сложная система»*?
2. Какова структура сложной системы?
3. Понятие система, подсистема, элемент системы.
4. Понятие критерия управления.
5. Перечислите основные этапы анализа сложных систем.
6. Понятие *«состояние»* системы.
7. Приведите математическое описание линейной системы в пространстве состояния.

2. ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ. СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ

2.1. Управляемость технологического процесса

Функционирование АСУТП неразрывно связано с переработкой потока технологической информации. Поэтому специалист по автоматизации должен знать общие положения по информационному обеспечению процесса управления, общие принципы получения и преобразования технологической информации, включая переход от аналоговой к цифровой форме представления информации, способы кодирования сигналов, передачи информации и защиты ее от помех. Специалист должен уметь на основе известной структуры АСУТП, требований по точности измерения и поддержания выходных параметров системы определять объем каждой из типов информации (априорная, технологическая), рассчитывать разрядность устройств измерения, преобразования и передачи информации, выбирать наиболее целесообразный код по условиям точности, оценивать пропускную способность каналов связи.

Для реализации целенаправленного и результативно протекающего технологического процесса он должен быть управляемым. Это означает, что в процессе функционирования технологического объекта необходимо осуществлять непрерывные воздействия на исполнительные органы, чтобы при внешних возмущениях обеспечить получение необходимого единственного результата.

Другими словами, под управляемостью системы понимаем свойство системы иметь управляющие воздействия, которые позволяют перевести систему из заданного начального состояния в требуемое состояние за конечной отрезок времени.

Дадим математическую интерпретацию и поясним понятие управляемости.

Рассмотрим динамическую систему, для характеристики который используется вектор состояния X, координатами которого является совокупность переменных состояния:

$x_1, x_2, x_3, \ldots x_n$, т. е. $X = \left(x_1, x_{2,} x_3, \ldots x_n\right)$ – вектор состояния.

Аналогично $\nu = (\nu_1, \nu_2, ...\nu_n)$ – вектор управления.

В этом случае динамическая система описывается управлением состояния вида

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, x_3 ... x_n, \nu(\tau), \tau), \text{ где } i=1,2,\dots n \ . \qquad (2.1)$$

Воспользуемся понятием фазового пространства, в котором состояние объекта управления изображается точками. Для случая, когда $n > 3$, фазовое пространство не имеет наглядной графической интерпретации. Когда $n = 2$, фазовое пространство переходит в фазовую плоскость

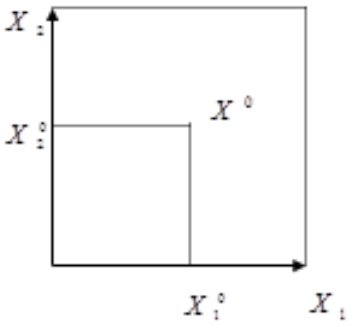


Рис. 2.1. Фазовая плоскость

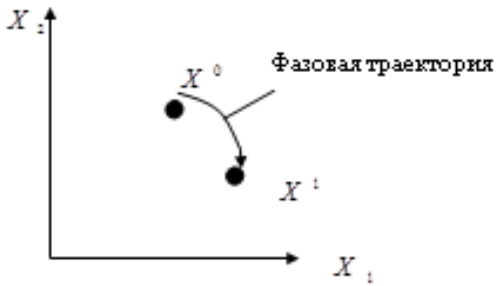


Рис. 2.2. Фазовая траектория движения динамической системы из точки X^0 в точку X_1

Любое изменение вектора ν переводит объект управления в некоторое новое состояние.

Если в фазовом пространстве $x_1, x_2, x_3, \ldots x_n$, заданы два множества Γ_1 и Γ_2, то система (1) называется *управляемой относительно Γ_1 и Γ_2*, если существует такое допустимое управление $\nu(\tau)$, которое конечный отрезок времени переводит в изображающую точку X системы (1) из множества Γ_1 во множество Γ_2.

Если объект управляемый, то следующим этапом изучения объекта является определение допустимого уровня качества управления технологическим процессом. Во многих случаях качество управления оценивается на вероятных свойствах самого объекта путем вычисления энтропии H (степень неупорядочности объекта) или подсчета энтропии объекта (при неравновероятных исходах) по выбранным признакам усредненных значений энтропии – иначе расчета математического ожидания. Чем меньше энтропия, тем выше качество управления. Обычно энтропия H изменяется от 0 до 1.

Отсюда следует, что управление объектом должно быть тем более совершенным (качественным), чем больше мы хотим снизить начальную неупорядочность его функционирования по выбранным признакам. Таким образом, количественной характеристике степени снижения неупорядочности объекта (уменьшению энтропии) можно поставить в соответствие величину, характеризирующую необходимый для этого объема управления.

Для количественной оценки необходимого объема управления введена величина, численно равная изменению энтропии и называется *информацией*:

$$J = \Delta H = H_{нач} - H_{кон} > 0 . \qquad (2.2)$$

Наиболее часто употребляемой единицей информации является двоичная единица (дв. Ед.), которая называется *бит.* Она (бит) определяет объем информации, необходимый для исключения одного из двух равновероятных исходов.

Получение информации о технологическом объекте управления осуществляется по различным каналам связей. Связь управляемого устройства (УУ) с оператором может быть прямая

(оператор – УУ) и обратная (УУ – оператор). Любая информация может быть представлена только на каком-либо материальном носителе (магнитные ленты, диски, графические изображения на чертежах т. д.) обычно в АСУТП – это сигнал в виде импульса тока или напряжения, передаваемые по проводам. Информация с одного носителя на другой переносится с помощью считывания и записи. Комплекс вопросов, связанных с приемом информации оператором от УУ (обратная связь), изучается специальной наукой – инженерной психологией, которая рассматривает оператора как звено в замкнутой системе управления. Связь УУ с технологическим объектом управления также может быть прямой (УУ – ТОУ) и обратной (ТОУ – УУ).

Прямая связь. Поэтому каналу исполнительным элементом технологического объекта передаются воздействия от управляемого устройства. Основные задачи этого канала – преобразование управляемого сигнала в управляющее воздействие, пригодное по своей природе и виду для подачи его на управляющий вход исполнительного органа технологического объекта управления.

Обратная связь. Эта связь предназначена для получения информации о текущем состоянии технологического объекта, которая необходима для выработки управляющей информации. Канал обратной связи включает в себя первичные преобразователи контролируемого параметра в сигнал (датчики) и вторичные преобразователи сигнала датчика в сигнал, форма которого позволяет ввести его в управляющее устройство. При этом используются преобразования непрерывных (аналоговых) сигналов в цифровые, когда непрерывно изменяющийся технологический параметр преобразуется в дискретную комбинацию выходных сигналов, представляющую собой цифровой код. Такое аналого-цифровое преобразование выполняется первичным импульсным или кодовым датчиком, либо первичный датчик дает на выходе разность потенциалов, которая вторичным преобразователем преобразуется в код.

Преобразование технологической информации. Материальным носителем информации является сигнал, который помимо информации несет также некоторою энергию, полученную

от источника информации. Эта энергия воздействует на приемник. Сигнал носителей внешней (априорной и исходной) информации должен передавать сведения о задачах и целях управления. Сигналы текущей информации, вырабатываемые датчиками, должны обеспечивать необходимую простоту и высокую достоверность преобразования технологического параметра в сигнал. В преобразовании сигналов можно выделить два аспекта: преобразование природы, формы и параметров сигнала (модуляция, квантование и др.); установление однозначного соответствия между отдельными видами сигналов и состояниями управляемости контролируемого параметров (кодирование: состояние – сигнал; перекодирование: сигнал – сигнал; диодирование: сигнал – состояние).

Виды и форма сигналов. Для управления АСУТП наиболее часто используются электрические сигналы, реже – механические, гидравлические, пневматические. Классификация представления сигналов в АСУТП приведена на рис. 2.3.

В соответствии с классификацией сигналы делятся на две группы:

- аналоговые или непрерывные, способные в определенном диапазоне находиться в бесконечно большом количестве состояний;
- дискретные, способные в определенном интервале находиться в конечном числе состояний (ток в цепи, коммутируемой реле; выходной сигнал логического элемента и т. д.).

Аналоговые сигналы могут быть потенциальными с линейным и нелинейным преобразованием первичного состояния и частотным (гармоническим), отрабатывающим изменение первичного состояния соответствующим изменением амплитуды, частоты или фазы сигнала.

Дискретные сигналы бывают квантовыми по уровню и по времени. Квантование сигналов по уровню сводится к замене текущих значений непрерывного сигнала конечным числом его уровней.

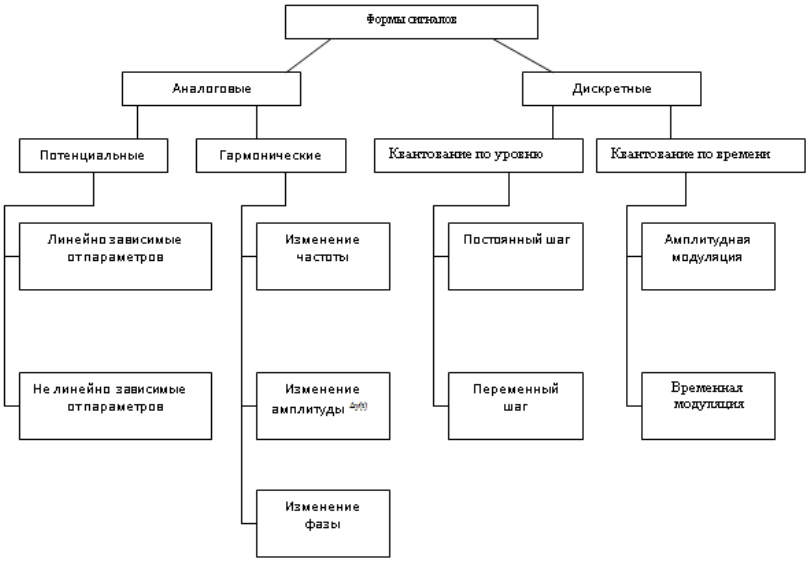


Рис. 2. 3. Классификация представления сигналов

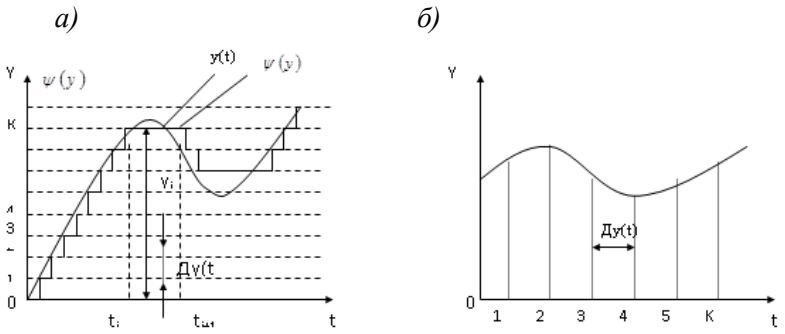


Рис. 2. 4. Квантование сигналов по уровню *(а)* и времени *(б)*

На рис. 2.4, *а* показан непрерывный сигнал y(t), который в результате квантования заменяется ступенчатой функцией $\psi(y)$. Разность уровней Ду(t) называется разрешающей способностью сигнала или шагом квантования по уровню.

Пока сигнал не изменится на Ду(t), преобразователь фиксирует предыдущее значение его уровня. Если в интервале времени t_i до t_{i+1} приращение сигнала не выходит за пределы шага квантования в одну или другую сторону, то прибор фиксирует постоянное значение y_i.

Шаг квантования определяется требуемой точностью измерения и обеспечивается разрешающей способностью квантуемого преобразователя. Чем выше разрешающая способность преобразователя, тем меньше шаг квантования. Он зависит от допустимой относительной погрешности измерения д:

$$\Delta y(t) \le \delta\left(y_{\max}(t) - y_{\min}(t)\right), \tag{2.3}$$

где $y_{\max}(t), y_{\min}(t)$ – соответственно максимальный и минимальный уровни сигналов.

Число уровней квантованного сигнала с учетом нулевого вычисляется по формуле

$$n = \frac{y_{\max}(t) - y_{\min}(t)}{\Delta y(t)} + 1 \cdot \tag{2.4}$$

Количество информации (в битах), содержащееся в таком сигнале, составит $J = \log n$.

С учетом (2.3) и (2.4) получим объем информации в зависимости от допустимой погрешности:

$$J = \log\left(\frac{1}{\delta} + 1\right) \cdot \tag{2.5}$$

Квантование непрерывного сигнала по уровню позволяет ограничить конечным числом бесконечное множество измерений. В этом случае система в большей степени защищена от помех.

Квантование непрерывного сигнала y(t) во времени (рис. 2.4, *б*) сводится к замене большого числа значений непрерывного сигнала конечным числом мгновенных значений, фиксируемых через определенный промежуток времени $T = \Delta t$. Последний называется шагом или периодом квантования по времени и может быть постоянным или переменным.

Кодирование сигналов. Кодирование сигналов служит для обмена информацией между отдельными составляющими АСУТП, ее обработки и хранения с требуемой точностью и надежностью.

Кодирование состоит в использовании кода – универсального способа отображения информации при ее передаче, обработке и хранении. Код представляет собой систему соответствий между элементами сообщений и сигналами, при помехе которых эти элементы можно зафиксировать.

По соображениям простоты технической реализации явное преимущество на стороне, когда с n = 2 (n – число символов в разделе или основание кода), при котором для хранения, передачи и обработки информации необходимы дискретные элементы с двумя устойчивыми состояниями *(«да» – «нет», «включено» – «отключено»)*. Поэтому двоичный код получил широкое распространение в цифровых устройствах контроля и управления.

Переход от десятичной к другим системам (10→2, 10→8, 10→16) удобнее всего производить по методу деления. По этому методу исходное число в десятичной системе последовательно делится на основание числа искомой системы. Остатки от деления образуют результат перевода, причем старший разряд соответствует последнему остатку, а младший – первому остатку.

Например:

Преобразование 10→2

Преобразование 10→8

1479/2 = 739 (остаток 1) – младший разряд

1479/8 = 184 (остаток 7) – младший разряд

739/2 = 369 (остаток 1)

184/8 = 23 (остаток 0)

369/2 = 184 (остаток 1)

23/8 = 2 (остаток 7)

184/2 = 92 (остаток 0)

2/8 = 0 (остаток 2) – старший разряд

92/2 = 46 (остаток 0)

$N_8 = 2707$

46/2 = 23 (остаток 0)

23/2 = 11 (остаток 1)
Преобразование 10→16
11/2 = 5 (остаток 1)
1479/16 = 92 (остаток 7) – младший разряд
2.2 = 1 (остаток 0)
92/16 = 5 (остаток 12)
1/2 = 0 (остаток 1) – старший разряд
5/16 = 0 (остаток 5) – старший разряд
N_2 =10111000111
N_{16} = 5C7,

так как в шестнадцатеричной системе для изображения чисел применяются от 0 до 15 (всего 16 цифр); обозначение первых десяти цифр от 0 до 9 совпадают с десятичным, а остальные шесть цифр (от 10 до 15) обозначаются латинскими буквами A,D,C,D,E,F.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите причины, вызывающие необходимость внедрения автоматизации.
2. Дайте определение понятия «*система*» и «*система управления*».
3. Какие существуют разновидности систем управления?
4. Дайте определение понятия «*управляемость*» технологического процесса.
5. Каким показателем оценивается допустимый уровень качества управления?
6. Чем определяется необходимый объем управления? Понятие «*информация*».
7. Какая наиболее употребляемая единица информации?
8. Что является материальным носителем информации?
9. Для чего проводят квантование сигналов? Виды квантования.

2.2. Уравнения состояния динамических систем

Дифференциальные уравнения, описывающие физический процесс, всегда можно преобразовать в систему обыкновенных дифференциальных уравнений. В этом случае говорят, что это описание в виде уравнения состояния или в пространстве состояний. Главное преимущество такой формы записи в том, что для решения этих уравнений можно использовать численные методы. Основой математического аппарата для моделей в пространстве состояния служат главным образом линейная алгебра – векторная и матричная форма значительно упрощает описание.

Состоянием называется набор всех переменных – так называемых *переменных состояния*. Если известны текущее состояние системы и входные сигналы, то можно предсказать ее дальнейшее поведение. Другими словами, состояние – это минимальное количество информации о системе, которое необходимо, чтобы предсказать ее будущее поведение.

Состояние X можно представить как вектор-столбец, компоненты которого – переменные состояния $X = (x_1, x_2,\ldots,x_n)^T$.

Непосредственно измерить все переменные состояния практически невозможно. Поэтому описание в пространстве состояний называется также *внутренним описанием*. Выходные величины, т. е. измерения, обозначаются через $y_1,y_2,\ldots,y_n$ и составляют вектор У.

$$У = (y_1,y_2,\ldots,y_p)^T.$$

В общем случае число датчиков P, связанных с процессом, меньше числа переменных состояния n. Поэтому вычисление X и У весьма сложная и нетривиальная задача.

На любую техническую систему влияют сигналы двух типов – сигналы, которые можно измерить вручную или автоматически какими-либо техническими средствами, и сигналы, которыми управлять невозможно.

Сигналы первого типа называются *управляющими сигналами* или *переменными управления* $u_1,u_2,\ldots,u_r$ и составляют вектор U $U = (u_1,u_2,\ldots,u_r)$.

Входные сигналы второго типа могут влиять на систему, но не поддаются управлению.

Все эти сигналы обозначаются вектором V.

$$V = (v_1, v_2, \ldots, v_m).$$

Целью системы управления является вычисление на основе имеющихся измерений У таких сигналов U, чтобы, несмотря на влияние возмущений V, техническая система выполняла поставленные задачи. Управляемую систему можно представить в виде блок-схемы (рис. 2.5).

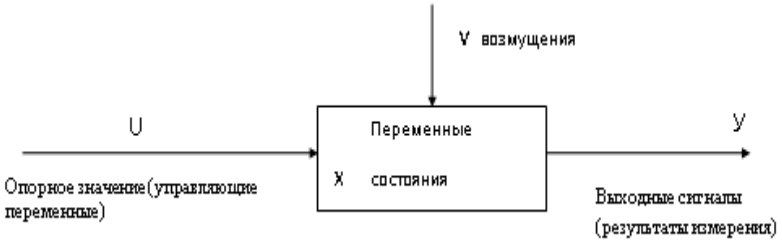


Рис. 2.5. Блок-схема управляемой системы

2.3. Описание линейной системы в пространстве состояния

Большинство процессов можно смоделировать линейными дифференциальными уравнениями, в которых отсутствуют члены, содержащие произведения переменных состояния типа x_1^2; X*U или X_1*X_2. Линейная система, имеющая n переменных состояния и r входных переменных, описывается следующими уравнениями состояния с постоянными коэффициентами:

$$\frac{dx1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + \ldots + b_{1r}u_r$$

.

.

.

$$\frac{dxn}{dt} = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + b_{n2}u_2 + \ldots + b_{nr}u_r,$$

где параметры a_{ij} и b_{ij} – константы.

Поскольку эти уравнения являются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, они обладают рядом привлекательных свойств. Например, всегда можно найти аналитическое решение X(t) при произвольных входных сигналах U(t). Начальные условия определяются n-константами.

$$X(0) = (x_{10}, x_{20}, \ldots, x_{n0})^T.$$

В матричном виде уравнения состояния записываются проще:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU,$$

где A и B – матрицы, содержащие коэффициенты

$$A = \begin{vmatrix} a11 & a12 & \ldots & a1n \\ a21 & a22 & \ldots & a2n \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ an1 & an2 & \ldots & ann \end{vmatrix} \qquad B = \begin{vmatrix} b11 & \ldots & b1r \\ b21 & \ldots & b2r \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ bn1 & \ldots & bnr \end{vmatrix}.$$

При единственном управляющем сигнале матрица B имеет только один столбец.

Между внутренними переменными состояния X и измерениями У существует линейная зависимость. Кроме того, иногда имеется прямая связь между управляющими переменными U и выходными переменными У.

$$y_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \ldots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + d_{12}u_2 + \ldots + d_{1r}u_r;$$

.

.

$$y_p = c_{p1}x_1 + c_{p2}x_2 + \ldots + c_{pn}x_n + d_{p1}u_1 + d_{p2}u_2 + \ldots + d_{pr}u_r.$$

Или в векторно-матричных обозначениях $У = CX+DU$,

где $C = \begin{vmatrix} c11 & c12 & \dots & c1n \\ c21 & c22 & \dots & c2n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ cn1 & cn2 & \dots & cnn \end{vmatrix}$ $D = \begin{vmatrix} d11 & \dots & d1r \\ d21 & \dots & d2r \\ \dots & \dots & \dots \\ dp1 & \dots & dpr \end{vmatrix}$.

Если имеется только одна выходная переменная, то C состоит из одной строки. Обычно нет прямой связи между входными и выходными переменными, и тогда матрица D – нулевая.

Линейная система имеет много преимуществ. Наиболее важной из них является принцип суперпозиции. Это означает, что если при каком-либо изменении амплитуды входного сигнала ΔU выходной сигнал изменяется на величину ΔУ, то при удвоенном изменении выходного сигнала 2*ΔU выходной сигнал изменится на величину 2ΔU.

Линейные сигналы обладают свойствами АДДИТИВНОСТИ входных сигналов, т. е. если входной сигнал U1 вызывает выходной сигнал $У_1$, а U_2 – сигнал $У_2$, то общий сигнал U_1+U_2 на входе приведет на выходе к $У_1+У_2$. Исходя из этого, можно сказать, что влияние сигналов управления и возмущений можно анализировать идеально.

Несмотря на все достоинства линейного описания, применять его следует с большой осторожностью, поскольку большинство процессов существенно нелинейны. Если нелинейности “гладкие”, т. е. отсутствуют скачки, то при определенных условиях нелинейную систему можно рассматривать как линейную. Тогда линейное описание справедливо для малых отклонений вокруг точки равновесия.

Многие параметры промышленных процессов должны поддерживаться вблизи некоторых постоянных (опорных) значений, а целью системы управления является приведение параметров процесса к их опорным значениям. Поэтому, пока отклонения от опорного значения малы. Линейное описание системы является адекватным.

Описание системы в виде отношений входных и выходных переменных. Если в системе описывать только связь между входными и выходными сигналами, то некоторые внутренние пере-

менные и их взаимосвязи остаются скрытыми, представление системы становится более комплексным и имеет меньшее число параметров, чем описание в пространстве состояний. Поскольку в модель включены только входные и выходные переменные, то она называется *внешним описанием*. Из внутреннего описания системы можно исключить вектор X и получить описание системы в виде

$$d^n y/dt_n + a_1 d^{n-1} y/dt_{n-1} + \ldots + a_n y = b_0 d^n u/dt_n + b_1 d^{n-1} u/dt_{n-1} + \ldots + b_n u,$$

где коэффициенты a_i и b_i могут быть получены из матрицы A, B, C и D.

В системах со многими входными и выходными переменными для каждой пары вход/выход существует своя зависимость (в дальнейшем для простоты представления рассмотрение будет ограничено системами только с одним входом U и одним выходом У). Для дифференциального уравнения порядка n можно выполнить преобразование Лапласа.

$$(S^n + a_1 S^{n-1} + \ldots + a_n) * У(S) = (b_0 S^n + b_1 S^{n-1} + \ldots + b_n) * U(S),$$

где S – переменная (оператор) Лапласа, а У(S) и U(S) – результат преобразования Лапласа (изображение Лапласа) для y(t) и u(t) соответственно.

Преимущество этого метода в том, что комплексными переменными S, которые представляют собой операторы дифференцирования, можно манипулировать алгебраическими методами. Здесь полагаются, что начальные значения переменных состояния – нулевые.

Связь между входными и выходными переменными линейной системы можно выразить ее передаточной функцией, которая определяется как отношение между изображениями Лапласа выходного и входного сигналов системы

$$G(S) = \frac{У(S)}{U(S)} = (b_0 S^n + b_1 S^{n-1} + \ldots + b_n) / (S^n + a_1 S^{n-1} + \ldots + a_n).$$

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение понятия «*состояние*» системы.
2. Какие переменные входят в управляемую систему?
3. Какими преимуществами обладает линейная система?
4. В чем смысл принципа суперпозиции?
5. Что позволяет анализировать свойства аддитивности входных сигналов?

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Интерфейс между техническим процессом и системой управления

Датчики и исполнительные механизмы

Для того чтобы обеспечить связь компьютера с процессором, применят много разных технологий. Жизненно важными для цифрового управления являются измерения и технология датчиков. Датчики должны точно отображать физические переменные технологического процесса как в стационарных, так и в переходных режимах работы.

Передача сигналов между датчиками, управляющим компьютером и исполнительными устройствами – еще одна большая тема. Сигналы, которые вырабатываются датчиками, должны быть согласованы как с устройствами измерения, так и интерфейсом компьютера. В этом смысле очень важно предпринять защитные меры против влияния разнообразных электрических помех, искажающих первоначальный сигнал датчика. Вид носителя сигнала – ток, напряжение или свет – обычно выбирается в зависимости от характера помех.

Для того чтобы воздействовать на процесс, выходной сигнал компьютера необходимо преобразовать либо в механическое движение, либо в другой тип электрического сигнала. Такие задачи решают исполнительные устройства. Это также очень обширная область, в которой особое место занимают различные электроприводы – устройства для преобразования электрической энергии в механическую.

Общая структура ввода/вывода между процессом и управляющим компьютером показана на рис. 3.1. Хотя на практике используются разнообразные датчики, исполнительные механизмы и согласующие устройства, основная структура интерфейса всегда одна и та же.

Для большинства физических величин существует множество различных измерительных технологий, характеризуемых зависимостью между вырабатываемым сигналом и измеряемой величиной. Измерительное устройство или датчик состоит из двух частей – измерительной головки и преобразователя.

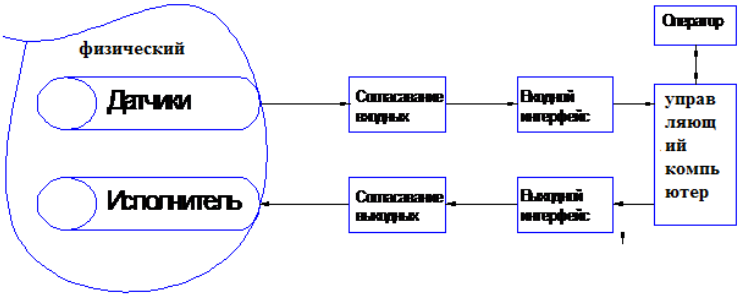


Рис. 3.1 Общая структура ввода/вывода между процессом и управляющим компьютером

Результат измерения – это *«реакция измерительной головки датчика»*, которая на входе преобразователя представляет собой электрическую величину, распространяющуюся дальше по проводнику. Следовательно, выходной сигнал измерительного устройства (датчика) есть выходной сигнал преобразователя. В большинстве управляющих систем этот выходной сигнал обычно – и предпочтительно – электрический, однако довольно часто встречаются и пневматические датчики. Главное достоинство электрических датчиков – это гибкость и разнообразие способов обработки сигнала. Следует отметить, что электрический сигнал можно передавать на большие расстояния с очень малыми затратами энергии. Пневматические датчики, по сравнению с электрическими, обычно дешевле, меньше по размерам, проще и нечувствительны к возмущениям. Более того, в условиях взрыво- и пожароопасные среды пневматические датчики более безопасны, чем электрические.

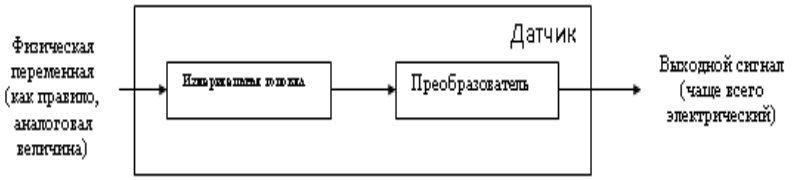


Рис. 3.2. Составные элементы датчика

Различаются три класса датчиков:

– аналоговые датчики, т. е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал;

– цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово;

– бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: *«включено/выключено»* (иначе говоря, 0 или 1).

Исполнительное устройство и механизм преобразуют электрическую энергию в механическую или физическую величину для воздействия на управляемый процесс. Электродвигатели, управляющие *«суставами»* промышленного робота, и есть исполнительные механизмы. В химических процессах оконечными управляющими элементами могут быть клапаны, задающие расход реагентов. Следует подчеркнуть, что исполнительные устройства обычно лишь опосредованно влияют на переменные физических процессов, изменяемые датчиками. Например, датчики измеряют температуру, координаты или химическую концентрацию, а исполнительные устройства управляют подводом тепла, движения или потоками исходных реагентов. И уже от динамики физической системы зависит, как измеряемые величины изменяются из-за управляющих воздействий исполнительных устройств.

В составе исполнительного устройства можно выделить две части (рис. 3.3): во-первых, преобразователь и/или усилитель, во-вторых, силовой преобразователь и/или исполнительный механизм. Преобразователь превращает входной сигнал в механическую или физическую величину, например, электромотор преобразует электрическую энергию во вращательное движение. Усилитель изменяет маломощный управляющий сигнал, получаемый от выходного интерфейса компьютера, до значения, способного привести в действие преобразователь. В некоторых случаях усилитель и преобразователь конструктивно составляют одно целое. Таким образом, некоторые оконечные управляющие элементы могут представлять собой самостоятельную систему управления – выходной сигнал компьютера является опорным значением для оконечного управляющего элемента.

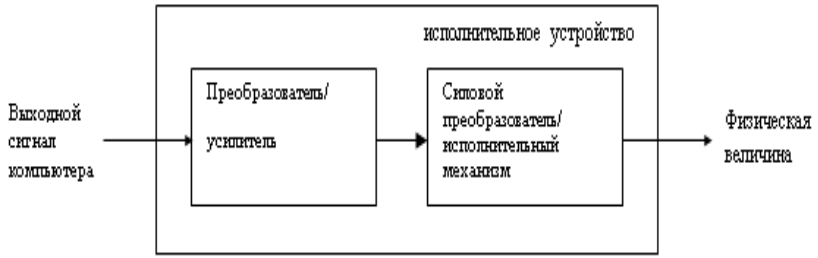


Рис. 3.3. Составные элементы исполнительного устройства

Требования к исполнительным устройствам – потребляемая мощность, разрешающая способность, повторяемость результата, рабочий диапазон и т. д. – могут существенно различаться в зависимости от конкретного приложения. Для успешного управления процессом правильно выбрать исполнительные устройства так же важно, как и датчики.

Для перемещения клапанов часто применяется сжатый воздух. Если необходимо развивать значительные усилия, обычно используют гидропривод. Электрический сигнал компьютера должен быть преобразован в давление или расход воздуха либо масла. Бинарное управление обеспечивается электромеханическими реле или электронными переключателями.

Передача измерительных сигналов. Аналоговые сигналы, вырабатываемые измерительными устройствами, обычно необходимо так или иначе преобразовать, прежде чем ввести их в компьютер. Сигнал в виде напряжения должен быть усилен так, чтобы соответствовать диапазону напряжений интерфейса компьютера.

При передаче аналоговых сигналов существуют специфические проблемы, обусловленные электрическими возмущениями. Сигнал, передаваемый от датчика по электрическому проводнику, может подвергнуться зашумлению под влиянием среды из-за нежелательных связей резистивного, индуктивного или емкостного характера. Этот может исказить исходный сигнал. Одно из возможных решений – преобразовать аналоговый измерительный сигнал в последовательность импульсов, частота или продолжительность (ширина) которых известным образом связана с

уровнем исходного сигнала, а затем передавать этот преобразованный измерительный сигнал. Такой переход особенно полезен, когда внешний шум имеет ту же частоту, что и исходный сигнал. Последовательность импульсов может передаваться либо по электрическому, либо по волоконно-оптическому кабелю.

Характеристики датчиков. Датчик должен воспроизводить физическую величину максимально быстро и точно. Хотя чаще всего датчик выбирают исходя из надежности и удобства обслуживания, его точность, стабильность и проверяемость результатов остаются важнейшими факторами. Основой работы управляющего компьютера является входная информация, поэтому точные и надежные измерения – это необходимое условие качества управления.

Большая часть характеристик датчика, которые приводятся в техническом описании, – статические параметры. Эти параметры не показывают, насколько быстро и точно датчик может измерить сигнал, изменяющийся с большой скоростью. Свойства, отражающие работу датчика в условиях измеряющихся входных воздействий, называются *динамическими характеристиками*. Они существенно влияют на работу системы управления. Идеальный датчик мгновенно реагирует на изменение изменяемой физической величины. На практике любому датчику необходимо некоторое время на обработку нового выходного сигнала. Очевидно, что для адекватного отображения реальных изменений наблюдаемой величины время реакции датчика должно быть как можно меньше.

Динамические характеристики датчиков. Динамические свойства датчика характеризуются целым рядом параметров, которые, однако, довольно редко приводятся в технических описаниях производителей. Динамическую характеристику датчика можно экспериментально получить как реакцию на скачок измеряемой входной величины (рис. 3.4). Параметры, описывающие реакцию датчика, дают представление о его скорости (например, время нарастания, запаздывания, время достижения первого максимума), инерционных свойствах (относительное перерегулирование, время установления) и точности (смещение).

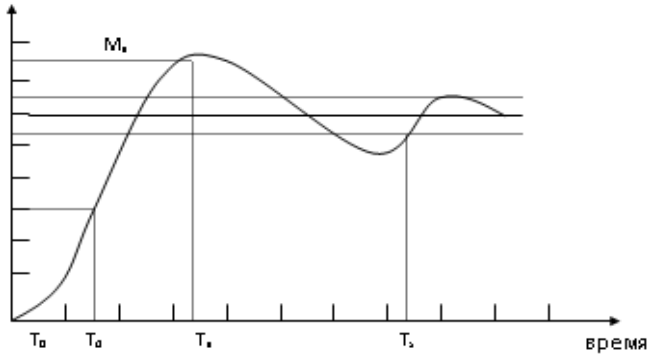


Рис. 3.4. Динамическая реакция датчика (реакция на скачок):
T_0 – время прохождения зоны нечувствительности;
T_d – запаздывание; T_p – время достижения первого максимума;
T_s – время установления; M_p – перерегулирование.

В принципе следует стремиться к минимизации следующих параметров.

Время прохождения зоны нечувствительности – время между началом изменения физической величины и моментом реакции датчика, т. е. моментом начала изменения выходного сигнала.

Запаздывание – время, через которое показания датчика первый раз достигают 50 % установившегося значения.

Время нарастания – время, за которое выходной сигнал увеличивается от 10 до 90 % установившегося значения. Другое определение времени нарастания – величина, обратная наклону кривой реакции датчика на скачок измеряемой величины в момент достижения 50 % от установившегося значения, умноженного на установившееся значение. Иногда используются другие определения. Малое время нарастания всегда указывает на быструю реакцию.

Время достижения первого максимума – время достижения первого максимума выходного сигнала (перерегулирования).

Время переходного процесса, время установления – время, начиная с короткого отклонения выхода датчика от установившегося значения, становится меньше заданной величины (например, $\pm$ 5 %).

Относительное перерегулирование – разность между максимальным и установившимся значением (в процентах).

Статическая ошибка – отклонение выходной величины датчика от истинного значения или смещение. Может быть устранена калибровкой датчика.

В реальных условиях некоторые требования к датчикам всегда противоречат друг другу, поэтому все параметры нельзя минимизировать одновременно.

Статические характеристики датчиков. Статические характеристики датчика показывают, несколько выход датчика отражает измеряемую величину спустя некоторое время после ее изменения, когда выходной сигнал установился на новое значение. Важными статическими параметрами являются: чувствительность, разрешающая способность или разрешение, линейность, дрейф нуля и полный дрейф, рабочий диапазон, повторяемость и воспроизводимость результата.

Чувствительность датчика определяется как отношение величины входного сигнала к единичной входной величине (для тонких измерительных технологий определение чувствительности может быть более сложным).

Разрешение – это наименьшее изменение измеряемой величины, которое может быть зафиксировано и точно показано датчиком.

Линейность не описывается аналитически, а определяется исходя из градуированной кривой датчика.

Аналоговые датчики. Выходной сигнал датчика подается на выход обрабатываемого устройства, например, на входной порт компьютера.

Большинство датчиков с преобразователем, применяемым в системах управления генерируют аналоговый сигнал. Как правило, при управлении измеряются следующие физические величины:

– электрические и магнитные характеристики;
– параметры движения;
– сила, момент и давление;
– температура;
– уровень заполнения емкости;
– расход;

– плотность, вязкость и консистенция;

– концентрация (газа, жидкости, растворенных и взвешенных веществ);

– химическая или биохимическая активность.

Датчики температуры. Зависимость свойств многих материалов от температуры не всегда является недостатком – из таких материалов изготавливаются датчики температуры. Конструкция выбирается таким образом, чтобы усилить температурную зависимость какой-либо электрической характеристики. Эта зависимость, как правило, является нелинейной, что создает дополнительные трудности при ее воспроизведении. Обычно применяются три типа датчиков температуры:

– термоэлементы;

– резистивные детекторы температуры (термометры сопротивления);

– термисторы.

Термоэлементы. Первый термоэлемент был создан в 1887 г. французским ученным Ле Шателье. В термоэлементе две точки контакта A и B соединены двумя параллельными проводами, выполненными из разных металлов (например, алюминий и медь). Таким образом, создается замкнутая цепь (рис. 3.5).

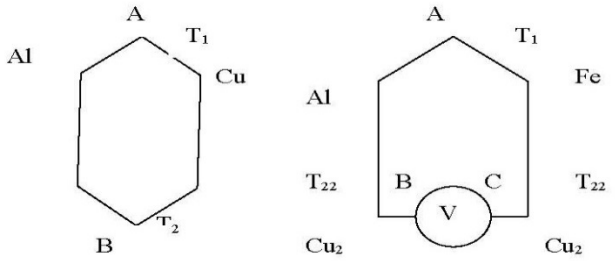


Рис. 3.5. Принципы работы термоэлемента

Если температуры точек A и B различаются, то по замкнутой цепи циркулирует ток. На правом рисунке показана реальная цепь для измерения этого тока. Точка A соответствует *«горя-*

чему» спаю, В и С – холодному. Точки В и С должны иметь одинаковую температуру.

До тех пор пока температуры в точках А и В отличаются, то по цепи начинает протекать электрический ток. Это явление называется *термоэлектрическим эффектом* или *эффектом Сибека*. Эта так называемая термоэлектродвижущая сила увеличивается как функция разности температур. Возникающее напряжение лежит в пределах нескольких милливольт.

Для различных температурных диапазонов используются разные сочетания металлов. Термоэлементы весьма надежны и недороги, имеют малую теплоемкость и способны работать в широком диапазоне температур.

Международная электротехническая комиссия определила некоторые стандартные типы термоэлементов. Элементы имеют индекс R, S, B, K, J, E, T в соответствии с диапазоном измеряемых температур. Металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления, т. е. с увеличением температуры сопротивление проводника растет. Это свойство используется в резистивных детекторах температуры.

Термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) термопары, спай которой находятся при температурах t и t_0, равна $E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}((t_0)$ и может быть рассчитана на основе эффектов Пельтье и Томпсона. Поддерживая температуру свободного спая постоянной, т. е. $t_0 = const$, получим $E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t)$ – const. Таким образом, $E_{AB}(t, t_0) = f(t)$ При экспериментально найденной зависимости термоЭДС термопары от температуры, измерение неизвестной температуры сводится к измерению термоЭДС. Зависимость термоЭДС термопара от температуры при постоянно заданной температуре свободного конца термопары называется *номинальной статической характеристикой* (*НСХ*), которая определяется ГОСТом. Государственный стандарт РФ (ГОСТ Р8.585–2001) определяет типы термопар (при температуре свободных концов и 0 °С), приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики термопар по ГОСТ Р8.585–2001

Тип	Обозначение термопреобразователя		НСХ	Материал термоэлектродов		Диапазон измерения, ^{0}C	ТермоЭДС, мВ
				Положительный	Отрицательный		
R	ТПП	Pt + 13 % Rh/Pt	ПП	ПР -13 (87 % Pt + + 13 % Rh)	ПлТ(Pt)	-50…1768	-0,226… 21,101
S	ТПП	Pt + 10 % Rh/Pt	ПР	ПР-10(90 % Pt + + 10 % Rh)	ПлТ(Pt)	-50…1768	-0,236…18,693
B	ТПР	Pt + 30 % Rh/Pt + + 6 % Rh	ПР	ПР-30(70 % Pt + + 30 % Rh)	ПР- 30(94 % Pt + + 6 % Rh)	0…1820	0…13,820
I	ТЖК	[Fe/Cu + Ni] (железо/константан)	ЖК	Fe	55 % Cu + 45 % Ni, Mn, Fe	-210…1200	-8,095…69,553
T	ТХКн	[Ni + Cr/Cr + + Ni] (хромель/константан)	ХК	ТНХ 9,5(90,5 % Ni + + 9,5Cr)	55 % Cu + 45 % Ni, Mn, Fe	-270…1000	-9,835…76,373
K	ТХА	[Ni + Cr/Ni + Al] (хромель/алюмель)	ХА	ТНХ 9,5 (90,5 % Ni + + 9,5Cr)	НМцАК2-2-1 94,5% Ni +5,5 % Al, Si, Mn	-270…1372	-6,458…54,886
N	ТНН	[Ni + Cr + + Si/Ni + Si] (нихросил, нисил)	НН	84,2 % Ni + + 14,2 % Cr + 1,5 % Si	95 % Ni + 4,5%Si	-270…1300	-4,345…47,513
L	ТХК	[Ni + Cr/Cu + + Ni] (хромель/копель)	ХК	ТНХ 9,5 (90,5 Ni + + 9,5Cr)	МНМц 43-05 56 % Cu + 44 % Ni	- 200…800	-9,488…66,466
M	ТМК	[Cu/Cu + Ni] (медь/копель)	МК	М1(Cu)	МНМЦ 43-05 56 % Cu + 44 % Ni	-200…100	-6,154…4,722
A (А-1, А-2, А-3)	ТВР	[W + Re/W + Re]	ВР	ВР-5 95 %W + 5% Re	ВР-20 80 % W+20 % Re	А-1:0…2500 А-2:0…1800 А-3:0…1800	0…33,015 0…27,232 0…26,773

Конструкция термопары включает термоэлектроды, изоляционные бусы и защитную арматуру, в том числе защитный чехол. Диаметр термоэлектродов из благородных металлов находятся в переделах от 0,07 до 0,5 мм, из неблагородных металлов – до 1 мм.

Для получения нормированного выходного аналогового или цифрового сигнала, повышения точности и снижения габаритов применяются измерительные (нормирующие) преобразователи, встраиваемые в клеммную головку термопары. В качестве выходных сигналов используются токовые (0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА) или 0…10 В, HART-протокол, Profibus и др. В измерительных преобразователях сигнал термопары усиливается входным каскадом усилителя и с помощью АЦП преобразуется в циф-

ровой сигнал. Микропроцессор пересчитывает (ставит в соответствие) цифровой сигнал со значениями температуры в соответствии с градуировочной таблицей, осуществляет функции компенсации температуры свободных концов термопары, линеаризации, демпфирования, контроля обрыва цепи и др., и далее через ЦАП преобразует его в аналоговый выходной сигнал в диапазоне 0/4.. .20 мА или 0... 10 В. При этом источник питания преобразователя находится во внешней цепи (цепи нагрузки).

Термометры сопротивления. В термометрах сопротивления используется зависимость сопротивления металлов или полупроводников от температуры измеряемой среды. При увеличении температуры сопротивление чистых металлов (платина, медь, никель и др.) увеличивается, а полупроводников (окислы металлов) уменьшается и наоборот. Показателем изменения сопротивления термометра от температуры служит температурный коэффициент сопротивления (ТКС) а, который должен быть, как и удельное электросопротивление, возможно большим и постоянным. ТКС принято определять в небольшом диапазоне температур 0...100 °С:

$$\alpha_{0:100} = (R_{100} - R_0) / R_0 \cdot 100.$$

Для платины $\alpha_{Pt} = 3{,}9 \cdot 10^{-3}$ град$^{-1}$, для меди $\alpha_{Cu} = 4{,}26 \cdot 10^{-3}$ град$^{-1}$, для никеля высокой чистоты $\alpha_{Ni} = 6{,}17 \cdot 10^{-3}$ град$^{-1}$. Зависимость сопротивления термометра от температуры характеризуется номинальной статической характеристикой (НСХ). НСХ термометров сопротивления представлены в виде таблиц по ГОСТ 6651–94. Тип НСХ определяется двумя параметрами – R_0 (сопротивление термометра при 0 °С) и отношением R_{100}/R_0.

Термометры сопротивления платиновые (ТСП) имеют высокую точность измерения и используются для диапазона температур -200...+850 °С. Нелинейность статической характеристики ТСП в интервале температур 0...500 °С не превышает 5 %. Для ТСП определены следующие НСХ: 50П, 100П и РИОО ($К_0$ равно 50 и 100 Ом, соответственно). Для диапазона температур -200...+850 °С известны также градуировки (НСХ) Pt50, Pt200, Pt500 и Pt1000.

Изменение сопротивления платины в диапазоне температур 0...+650 °С выражается зависимостью

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2);\ \ A = 3{,}9685 \cdot 10^{-3} K^{-1};\ \ B = -5{,}847 \cdot 10^{-7} K^{-1}.$$

Термометры сопротивления медные (ТСМ) используются в диапазоне температур -50...+180 °С. Для ТСМ определены следующие НСХ: 50М и 100М (R_0 равно 50 и 100 Ом соответственно). Зависимость сопротивления от температуры у ТСМ линейная.

Изменение сопротивления меди в диапазоне температур -50...+180 °С выражается зависимостью

$$R_t = R_0(1 + At);\ \ A = 4{,}26 \cdot 10^{-3} K^{-1}.$$

В качестве вторичных приборов для термометров сопротивления обычно используются уравновешенные мосты и логометры.

В термометрах с цифровым выходом сопротивление соединительных проводов параметрируется (измеряется и компенсируется) с помощью программного обеспечения, например, для измерительных преобразователей ТК–Н и ТЗК РА фирмы *Siemens* таким программным обеспечением Simatic PDM.

Для существенного снижения погрешности из-за влияния соединительных проводов измерительная мостовая схема размещается в непосредственной близости от чувствительного элемента термометра, а именно в клеммной головке термометра сопротивления. Выходной сигнал измерительной схемы такого нормирующего преобразователя, как правило, токовый (0...5 мА, 4...20 мА).

Технические характеристики термометров сопротивления с унифицированным выходным сигналом приведены в табл. 3.2.

Погрешности измерения температуры термометрами сопротивления в основном определяются схемой подключения, конструкцией термометра, изменением сопротивления линии от температуры окружающей среды, соблюдением правил эксплуатации и рядом других факторов, зависящих от конкретных условий измерения.

Таблица 3.2

Характеристики термометров сопротивления с унифицированным выходным сигналом

Тип термометра сопротивления	НСХ	Тип нормирующего преобразователя	Выходной сигнал, мА	Диапазон измеряемых температур, ^{0}C	Класс точности	Изготовитель
ТСМУ Метран-274	100М	-	0...5.4...20	-50...50,0...50, 0...100, 0...150,0...180	0,25; 0,5	ГК «Метран», г.Челябинск
ТСМУ Метран-274-Ex	100М	-	4...20			
ТСПУ Метран-276	100П	-	0...5.4...20	-50...50,0...100, 0...200, 0...400, 0...500		
ТСМУ Метран-276-Ex	100П	-	4...20			
Метран-286	100П	-	НАКТ	-40...200-40...500	0,4	
Метран-286-Ex1a	РТ100	-				
ТСМУ-055 ТСМУ-205 ТСМУ-205-Ex	100М	ПТ-205	4...20	-50...50,0...50, 0...100,0...150, 0...180	0,25; 0,5	НПП «Элемер», Московская обл.
ТСМУ-055 ТСМУ-205 ТСМУ-205-Ex	100П	ПТ-205	0...5, 4...20, 4...20	-50...50, 0...100, 0...200, 0...300, 0...500		НПП «Автоматика», г.Владимир
ИТ-1.1-Ex	50М, 100М	НПТ-1Г-EX	4...20	-50...50, -50...150, -50...200, 0...100, 0...200	0,5	
ИТ-1.4-Ex	50П, 100П РТ100	НПТ-1Г-EX	4...20	-50...50, 0...100, 0...200, 0...400, 0...500		
TR-201, -301, -401, -501	Pt 100	T12.10T21.10 T31.10	4…20	-200…850	0,5	WIKA, Германия
		T32.10	НАКТ	-200...850	0,1	

Термистор, т. е. температурно-зависимый резистор, изготавливается из полупроводникового металла, имеющего отрицательный температурный коэффициент и высокую чувствительность. Его сопротивление нелинейно зависит от температуры

$$R = R_0 \cdot e^{\beta(1/T - 1/T_0)},$$

где Т – температура в градусах Кельвина; R_0 – сопротивление при

опорной температуре T_0 (обычно 298 К, т. е. 25 °С), а в – постоянная (обычно 3000 – 5 000 К). Наклон кривой R–T соответствует температурному коэффициенту a, который, в свою очередь, является функцией температуры

$$a = \frac{1}{\left(R / R_0\right)} \cdot \frac{d\left(R / R_0\right)}{dT} = \frac{-b}{T^2}.$$

Значение коэффициента a обычно лежит в диапазоне от -0,03 до -0,06 $К^{-1}$ при 25 °С (298 К).

Из-за конечного сопротивления термистора при протекании по нему тока выделяется тепло. Энергия, выделяемая в термисторе при 25 °С, имеет обычно порядок 0,002 мВт. При постоянной рассеяния около 1 мВт/ °С температура датчика будет повышаться на 1°С (на воздухе) на каждый милливатт рассеиваемой мощности.

Термистор не является точным датчиком температуры. Однако, благодаря своей чувствительности, он используется для измерений малых отклонений температуры.

Измерение расхода. Измерение расхода играет жизненно важную роль в промышленности. Несмотря на большую потребность в качественных датчиках расхода, точность этих устройств до сих пор оставляет желать лучшего. Расходом вещества принято называть количество вещества, прошедшее через определенное сечение (трубопроводов) в единицу времени. Объемный расход измеряется в $м^3/с$ ($м^3/ч$, л/ч), массовый – в кг/с (кг/ч). Приборы, измеряющие расход, называются *расходомерами*.

Измерение объемного расхода. Объемный расход можно определить на основе скорости истечения потока. Связь между этими величинами однозначно определяется геометрией сечения трубы, где производится измерение, поэтому их взаимный пересчет легко выполняется с помощью калибровочной таблицы, поставляемой производителем датчика. Для измерения объемного расхода можно использовать следующие принципы:

– разность давлений;

– скорость вращения турбины;

– распространение ультразвука в жидкости;

– магнитную индукцию;

– интенсивность образования вихрей.

Датчики расхода, основанные на измерении разности давлений, работают в соответствии с законом Бернулли. Движущаяся в трубопроводе жидкость имеет постоянный объемный расход во всех сечениях. Даже если трубопровод имеет сужение, то массовый и объемный расход должны оставаться одинаковыми. Чтобы удовлетворить законы сохранения энергии и количества движения, в месте сужения скорость и статическое давление жидкости должны отличаться от остальных сечений трубопровода. В соответствии с законом Бернулли в месте сужения скорость движения жидкости увеличивается, а давление падает. По величине перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2$ можно рассчитать скорость жидкости. Расход пропорционален $\sqrt{\Delta p}$; коэффициент пропорциональности зависит от геометрии сужения. Для измерения можно использовать смещение мембраны, возникающее из-за увеличения давления. Если мембрана соединена с магнитным сердечником дифференциального трансформатора, то выходное напряжение также будет пропорционально разности давлений и, следовательно, расходу жидкости (рис. 3.6, *а*).

В месте сужения всегда присутствуют потери на трение, которые можно уменьшать за счет выбора гидродинамически обтекаемой формы. Примером такого устройства является трубка Вентури (рис. 3.6, *б*), которая состоит из сужающегося и расширяющегося сопел.

Расход можно измерить турбиной со счетчиком частоты вращения, поскольку он пропорционален скорости вращения. Обычно этот принцип применяется в расходомерах, которые выдают импульс при прохождении через турбину определенного количества жидкости. Такой измеритель можно использовать только для чистых жидкостей, так как любые твердые частицы будут мешать вращению турбины.

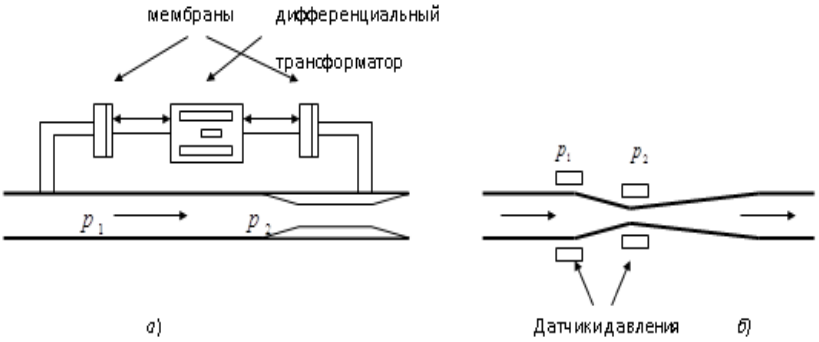


Рис. 3.6. Измерение расхода по разности давлений:
а – общий подход с использованием сужения трубопровода; б – принцип трубки Вентури

В месте сужения всегда присутствуют потери на трение, которые можно уменьшать за счет выбора гидродинамически обтекаемой формы. Примером такого устройства является трубка Вентури (рис. 3.6, *б*), которая состоит из сужающегося и расширяющегося сопел.

Расход можно измерить турбиной со счетчиком частоты вращения, поскольку он пропорционален скорости вращения. Обычно этот принцип применяется в расходомерах, которые выдают импульс при прохождении через турбину определенного количества жидкости. Такой измеритель можно использовать только для чистых жидкостей, так как любые твердые частицы будут мешать вращению турбины.

Простой способ измерения объемного расхода основан на свойствах распространения ультразвука в жидкости. В результате ультразвукового измерения можно получить среднюю скорость жидкости, которая определяется по скорости распространения ультразвуковых волн.

Ультразвуковое измерение выполняется с помощью двух пьезоэлектрических преобразователей, помещенных по разные стороны трубы на расстоянии (вдоль оси трубы), по крайней

мере, 100 мм друг от друга. Они могут работать как в режиме излучения (прямо), так и в режиме отражения.

Измерение массового расхода. Во многих случаях вместо объемного расхода или скорости жидкости необходимо знать массовый расход. Если известна плотность несжимаемой жидкости, то массовой расход рассчитывается непосредственно по объемному с учетом, если необходимо, температуры, давления.

Многие попытки определить массовый расход на основе измерения сил и ускорений потерпели неудачу. Один принцип, однако, получил промышленное применение – это измерение массового расхода на основе гидростатического метода и влияния ускорения силы Кориолиса.

Кориолисовые расходомеры

Кориолисовые расходомеры относятся к расходомерам массового расхода (с одновременным измерением объемного расхода, плотности и температуры). Принцип действия кориолисового расходомера основан на измерении силы Кориолиса, возникающей при движении измеряемой среды в трубках первичного преобразователя, колеблющихся в противофазе с резонансной частотой, пропорциональной массе скорости потока (рис. 3.7). Частота колебаний трубки первичного преобразователя зависит от формы, материала и массы преобразователя трубки, которая складывается из массы 1700/2700 самой трубки и массы вещества. Масса вещества процессора равна произведению объема трубки на плотность вещества. При постоянстве объема трубки частота колебаний определяется плотностью вещества с учетом его температуры, измеряемой термодатчиком. К краям одной трубки расходомера прикреплены катушки-соленоиды, к краям другой – постоянные магниты. За счет колебаний трубок относительно друг друга в противоположных направлениях под действием задающей катушки, в катушках-соленоидах (движущихся в магнитном поле) генерируются синусоидальные - колебания (рис. 3.7 *а, б*).

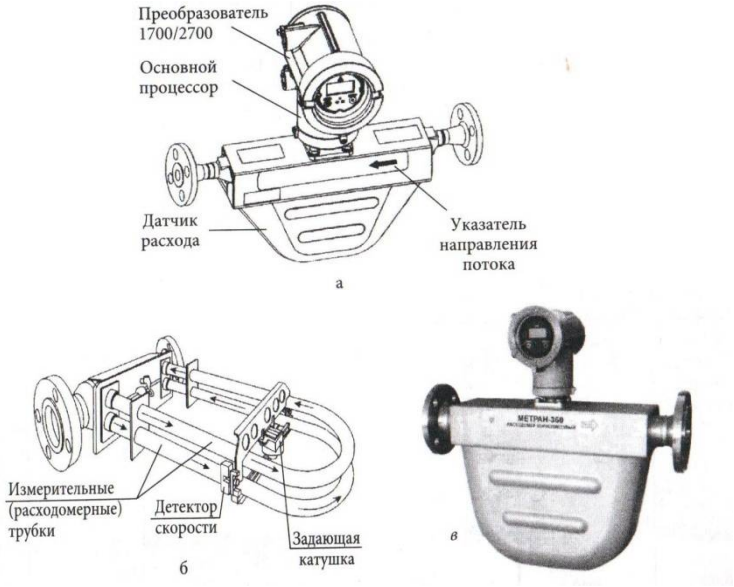


Рис. 3.7

Когда расход вещества отсутствует, сигналы от двух катушек-соленоидов совпадают по фазе. При наличии расхода в результате эффекта Кориолиса различные участки трубки изгибаются относительно друг друга, что приводит к фазовому сдвигу колебаний по длине трубки. Временной промежуток фазового сдвига, измеряемый микросекундами, прямо пропорционален массовому расходу. Сенсор преобразует этот сигнал в аналоговый или частотно-импульсный выходной сигнал.

Измерение плотности в кориолисовом расходомере производится на основании соотношения массы и частоты колебаний трубки. При увеличении массы трубок с измеряемой средой собственная частота колебаний трубок уменьшается и наоборот. Измеряя период колебаний, который обратно пропорционален частоте, судят о плотности вещества.

На рис. 3.7, *в* показан общий вид расходомера. В табл. 3.4 представлены технические характеристики кориолисовых расходомеров.

Таблица 3.4

Характеристики кориолисовых расходомеров

Тип	Модель	Д, мм	Массовый расход жидкости, т/ч	Давление среды, МПа	Температура среды, ^{0}C	Выход
Proline Promass 80, 83 (Endress+Hauser GmbH)	Датчики: Promass 8*F Promass 8*M Promass 8*F Promass 8*F Promass 8*F Promass 8*F	8, 5, 25, 40, 50, 80, 100, 150 8, 15, 25, 40, 50, 80; 8, 15, 25, 40, 50; 8, 15, 25, 40, 50; 8, 15, 25, 40, 50; 1, 2, 4;	800 180 70 45 450 кг/ч	10 35 10 4 40	-50...+200 -50...+150 -50...+150 -50...+200 -50...+200	4...20 мА, HART, OK, Profibus PA 4…20 мА, HART. OK, Profibus PA или FF
Proline Promass 40 E (Endress+Hauser GmbH)	Датчик: Promass E Преобразователь; Promass 40	 8 15 25 40 50	Кг/ч: 0...2000 0...6 500 0...18 000 0...45 000 0...70 000	10	-40...+125	4...20Ма, HART, OK
Метран-360 (Emerson Process Management и ГК «Метран»	Датчик: Promass E Преобразователь; Promass 40	 15 25 50	Кг/ч: 3...1360 8...2450 33...16 325 33...11 161 87..43 550 87...31 980	30	-40...+150	4, ...20 мА 4, ...20 мА 4...20мА, НАКТ
Micro Motion (Emerson Process Management США)	Датчик: ELITE (CMF) F H T D DT Преобразователь: 2000 1000 3000	3...150 6...75 6...75 6...50 3...150 6...40	28...108 654 378...12 300 177...7611л/ч: 680...87 000 680...680 400 8 160...38 100	15 10 10 10 15; 40 60	-40...+200 -50...+180 -50...+180 -50...+420	Мод. 2000: 2*х(4...20 мА) HATR, OK, RS-485, Profibus, FF. Мод.1000: HART, RS-485 Мод.3000: 2*(4...20мА) HART, RS-485, OK

Вихревые (вихреакустические) расходомеры

Принцип действия вихревого расходомера (рис. 3.8) основан на измерении параметров вихревой дорожки Кармана, образующейся в виде завихрений потока при обтекании средой вихревого тела (призмы трапецеидальной формы или другого типа). На гранях вихревого тела обтекания чередующиеся вихри создают перепады давления на его поверхности. Число перепадов давления в единицу времени и частота завихрений прямо пропорциональны скорости потока, т. е. объемному расходу. Частота импульсов преобразуется емкостным или ультразвуковым преобразователем в выходной сигнал. При наличии температурного датчика измеряется также массовый расход.

Измерительная система расходомеров Prowirl состоит из проточной камеры, в которую помещен завихряющий барьер со встроенным в него язычковым сенсором. Одним концом сенсор прикреплен к емкостному или пьезоэлектрическому датчику. Поток рабочего вещества, огибая завихряющий барьер, создает вихревые вибрации язычкового сенсора. Частота этих вибраций F прямо пропорциональна скорости потока v, ширине барьера d рабочего вещества

$$F = St \cdot v / d,$$

где St – число Струаля.

Данное уравнение справедливо для измерения расхода газов, пара, низковязких жидкостей (число Рейнольдса Re > 4000). Микропроцессорный модуль расходомера измеряет частоту вихревых вибраций и вычисляет объемный расход вещества.

К основным достоинствам вихревых расходомеров относятся:

- возможность измерения расхода жидкостей, пара и газов;
- независимость измерений от колебаний температуры, давления, вязкости среды;
- возможность измерений при высоких температурах среды (до +400 °С);
- высокая стабильность и простота эксплуатации;
- высокая надежность, в том числе при наличии вибраций.



Рис. 3.8

Электромагнитные (магнитноиндукционные) расходомеры

Электромагнитный расходомер основан на использовании закона электромагнитной индукции Фарадея, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле, наводится ЭДС *(E),* пропорциональная скорости потока.

$$E = K \bullet B \bullet V \bullet d,$$

где K – коэффициент пропорциональности (постоянная сенсора); B – магнитная индукция между полюсами катушек; V – скорость потока жидкости; d – внутренний диаметр трубопровода.

Роль проводника в данном случае играет электропроводящая жидкость. Конструктивно расходомер состоит из специальных катушек, расположенных с разных сторон измерительного участка трубы, и минимум двух электродов, установленных внутри или вне измерительного участка трубы. Напряжение, наводимое движущейся в магнитном поле электропроводящей жидкостью, воспринимается измерительными электродами и преобразуется электронной схемой с большим входным сопротивлением в выходной сигнал для отображения значения расхода на дисплее и (или) передачи к контроллеру (компьютеру).

За счет создания пульсирующего электромагнитного поля снижаются погрешности от амплитудных факторов, состава вещества, низкой электропроводности жидкости. К достоинствам электромагнитных расходомеров также относятся высокое быстродействие и независимость показаний от характера потока жидкости (ламинарный, турбулентный).

Внутренняя поверхность трубы (или специальная вставка) выполняется из непроводящего материала, в качестве которого используются фторопласт, керамика, полиуретан. Измерительные электроды изготавливаются из нержавеющей стали, титана, тантала или платины.

Электромагнитные расходомеры используются для измерения расходов воды, кислот, щелочей, суспензий, сточных вод с электропроводностью более 1 мкСм/см. Погрешность измерения электромагнитных расходомеров составляет от ±0,5 до ±1 %.

Преимущества электромагнитных расходомеров:

- работа в широком диапазоне температур, вязкости, плотности, давления и электропроводимости;
- отсутствие контакта с измеряемой средой без потери давления;
- возможность измерения без помех жидкости со взвешенными частицами или пузырьками газов;
- большой диапазон диаметров трубопроводов (от 2 до 2600 мм);
- большой динамический диапазон измерений и линейность показаний;
- высокая точность, надежность и простота эксплуатации;
- ряд электромагнитных расходомеров имеют дополнительные функции:
- представление результатов в различных единицах на 2...4-строчном дисплее;
- самодиагностика и электрическая самоочистка электродов;
- возможность сохранения результатов измерения, калибровки в ПЗУ и др.

В табл. 3.5 представлены технические характеристики электромагнитных расходомеров.

Таблица 3.5

Технические характеристики электромагнитных расходомеров

Тип	Исполнение	Д, мм	Расход, $м^3/ч$	Миним. проводимость, мкСм/см	Давление среды, МПа	Температура, ^0C	Выход
Взлет ЭР (ЗАО «Взлет»	ЭРСВ-410-510	10 20 32 40 50 65 80 100 150 200	0,028...3,4 0,113...13,58 0,290...34,78 0,453...54,34 0,708...84,9 1,196...143,5 1,811...217,3 2,83...339,6 6,37...764,1 11,32...1358	5	2,5	150	4...20 мА, RS-232
Proline Promag (Endress+ Hauser GmbH)	Датчики: Promag W Promag H Promag S Преобр-ли: Promag 10 Promag 23 Promag 355 Promag 50/53	25...2000 15...600 2...100 15...600	0,005...113 000 0,005...10200 0,005...2000 0,005...10200	5 5; 50 5;50	4 4 4; 1,6 4	80 180 180 130	4...20мА, HART, Profibus PA/DP, FF
ADMAG (Yokogava)	ADMAG -CA -AXF	15…100 2,5…400	Скорость потока до 10 м/с	0, 001; >1,0	4	-40…+180	4…20мА, HART
SITRANS FM (Siemens)	Датчики: -711/A; -711/E; 911/E Преобр-ль: -Transmag, Intermag2	15…2000 15…2000 15…600	Скорость потока 0,25...12м/с	3 3 (пост, поле); 0,001 (перем поле)	1, 0; 1,6; 2,5; 4,0 по заказу	60	4...20мА, HART Profibus PA
ПРЭМ (ЗАО «Теплоком»	Мод.3	15 20 25 32 40 50 80 100 150	0,007...6,7 0,012...12 0,018...18 0,003...30 0,045...45 0,007...72 0,18...180 0,28...288 0,63...630	1	1,6	150	4...20Ма, RS-485

Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия ультразвукового расходомера основан на зависимости разности времени прохождения сигналов ультразвуковой частоты (20 кГц. и более), направленных одновременно (или попеременно) в направлении потока и против него, от скорости потока, т. е. от объемного расхода.

Скорость распространения ультразвуковых колебаний в измеряемой среде (V) связана со скоростью измеряемого потока ($v_{ср}$) равенством

$$V = C_0 + v_{СР},$$

где C_0 – скорость звука в данной среде (для жидкости C_0 = 800...2000 м/с, для газа и пара от 150 до 1000 м/с, для твердых тел от 2000 до 6 000 м/с).

Время прохождения колебаний по потоку (t_1) и против потока (t_2) равны:

$$t_1 = L/(C_0 + v_{ср}); \quad t_2 = L/(C_0 + v_{ср}),$$

где L – длина участка между датчиком и приемником ультразвуковых колебаний. Приравняв скорость звука в этих уравнениях, найдем скорость потока $v_{ср}$:

$$v_{ср} = L \cdot (t_2 - t_1)/2t_1 \cdot t_2.$$

Датчики расходомера могут быть накладные, врезные, устанавливаемые относительно оси трубопровода по диаметру или хорде, в контакте или без контакта с измеряемой средой. Расходомер имеет одну пару датчиков, устанавливаемых под углом, или две пары датчиков, устанавливаемых одна по направлению потока, а другая – против потока. Измерительный участок расходомера представляет собой врезку, монтируемую на трубопроводе, или устанавливаемую на байпасе. Измерительный преобразователь может находиться на расстоянии от 30 до 250 м от датчика (в зависимости от типа расходомера). В качестве материала датчиков (пьезоэлементов) используется титанат бария.

В табл. 3.6 приведены технические характеристики ультразвуковых расходомеров.

Таблица 3.6

Характеристики ультразвуковых расходомеров

Тип	Исполнение	Число каналов измерения	Ду, мм	Скорость потока, м/с	Давление среды, МПа	Температура Среды, ^{0}C	Выход
Взлет-МР (ЗАО «Взлет»	УРСВ-510-520-530-540УРСВ-110	1 2 3 4 1	10...5000 10...5000 10...5000 10...5000 10...4200	0,1...20 0,1...20 0,1...20 0,1...20 0,1...12	2,5	160	4...20мА, RS-232/RS-485
Proline Prosoing Flow (Endress+Hauser GmbH)	Prosoling Flow W P U C	1 1 1 1	50…4000 50…4000 15…100 300…2000	0…15 0..15 0…10 0…10	-	80 170 80 60	4…20м А, ОК
SITRANS FUS (Siemens)	-	1	25 50 80 100	м^3/ч: 17 70 180 300		180	4...20м А; HART; Profibus PA; OK;CK
Тип	Исполнение	Число каналов измерения	Ду, мм	Скорость потока, м/с	Давление среды, МПа	Температура среды, ^{0}C	Выход
Тип	Исполнение	Число каналов измерения	Ду, мм	Скорость потока, м/с	Давление среды, МПа	Температура среды, ^{0}C	Выход
ULTRAHEART 2WR (LANDIS&GYR)	Исполнение 5 6 7	1	0,6... 60	М^3/ч: 3,5/6/10	16; 25	150	Импульсный
UFM 005 («Тепло-прибор»)	ПП14 ПП15 ПП18М ПП10U	1 1 1 1	20… 1600	3,6…36 200 35…36 200 15…9 024 …36 200	1,6; 2,5	150	RS-232

К достоинствам ультразвуковых расходомеров относятся:

- неконтактность измерения сред, в том числе агрессивных или находящихся под высоким давлением;
- независимость результатов измерения от температуры, давления, вязкости, электропроводимости;
- большой диапазон диаметров трубопроводов (от 15 до 4000 мм и более);
- надежность, точность, минимальные затраты на обслуживание и ремонт.

Приборы для измерения давления

Согласно Международной системе единиц СИ, в качестве производной единицы для измерения давления принят Паскаль (Па) – давление силой 1 Н на площадь 1 м^2 (1Па = 1 Н/м^2). К числу внесистемных единиц, встречающихся на практике, относятся кг/см^2, мм рт. ст., мм вод. ст, атм, бар и др. В табл. 3.7 приведено соотношение этих величин.

Таблица 3.7

Единицы измерения давления

	кПа	Мпа	кгс/см^2	мм рт, ст.	м вод. ст.	бар
1кПа	1	0,001	0,0102	7,501	0,102	0,01
1МПа	1000	1	10,2	7501	102	10
1 кгс/см^2 (1 атм)	98,07	0,09807	1	735,6	10	0,9807
1 мм рт. ст.	0,13332	0,0001333	0,001359	1	0,01359	0,001333
1 мм вод. ст.	9,807	0,009807	0,1	73,56	1	0,09807
1 бар	100	0,1	1,02	750,1	10,2	1

Известны различные уровни давления, используемые в приборах для измерения давления. К ним относятся абсолютное (или полное), избыточное (или относительное), атмосферное (или барометрическое) и остаточное (или вакуум). Избыточное давление ($P_и$) равно разности абсолютного давления ($P_а$) и атмосферного давления ($P_{атм}$):

$$P_и = P_а - P_{атм}.$$

Если абсолютное давление ниже атмосферного, т. е. $P_а < P_{атм.}$, то имеет место вакуум. Приборы для измерения давления классифицируют по виду измеряемого давления и по принципу действия.

По виду измеряемого давления приборы делят на:

- манометры – приборы для измерения избыточного и абсолютного давления;
- барометры – приборы для измерения атмосферного давления;
- вакуум-метры – приборы для измерения разрежения или вакуума;
- мановакуум-метры – приборы для измерения избыточного давления и разрежения;
- напоромеры – приборы для измерения малого избыточного давления (до 40 кПа)
- тягомеры – приборы для измерения малого разрежения (до -40 кПа);
- тягонапоромеры – приборы для измерения малых избыточного давления и разрежения;
- дифференциальные манометры — приборы для измерения разности двух давлений.

По принципу действия приборы для измерения давления делят на:

- жидкостные (или гидравлические), основанные на уравновешивании измеряемого давления давлением столба жидкости;
- пружинные (или деформационные), основанные на уравновешивании измеряемого давления силой упругой деформации чувствительного элемента;
- грузопоршневые, в которых измеряемое давление уравновешивается силой, создаваемой массой поршня и грузами, действующими на поршень, или создаваемым давлением жидкости; используются в качестве образцовых при поверке и градуировке манометров; диапазон измерения от 0,1 до 250 МПа;

Электрические манометры и вакуум-метры, основанные на преобразовании измеряемой величины в электрическую (напряжение, ток) или в изменение сопротивления чувствительного элемента.

Жидкостные манометры подразделяют на U-образные манометры, чашечные манометры (с вертикальной и наклонной трубкой), а также жидкостно-механические приборы, к которым относят кольцевые весы, поплавковые и колокольные манометры.

Пружинные манометры в зависимости от упругого чувствительного элемента делят на приборы с трубчатой или пластинчатой пружиной, мембраной или мембранной коробкой и сильфоном.

Электрические манометры, вакуум-метры и манова-куум-метры, характеризующиеся наличием выходного сигнала, подразделяют на манометры (вакуум-метры) сопротивления, тепловые манометры, пьезоэлектрические манометры (вакуум-метры), ионизационные и радиоизотопные вакуум-метры.

Манометры сопротивления основаны на зависимости изменения сопротивления проводника (манганина) или полупроводника от давления в области высоких давлений. Использование в качестве проводника манганина объясняется его низким ТКЭС. Для большинства проводников электрическое сопротивление с ростом давления уменьшается. Манометры сопротивления применяются для измерения высоких давлений вплоть до 1000 МПа.

Теплопроводные (термопарные) манометры основаны на зависимости теплопроводности газов от давления в области низких давлений. Изменение теплопроводности газов приводит к изменению температуры нагревателя и изменению термоЭДС связанной с ним термопары (или сопротивления термометра сопротивления). Термопарные манометры применяются для измерения давления (вакуума) в диапазоне от 0,0133 до 1333 Па.

Пьезоэлектрические манометры. Чувствительным элементом пьезоэлектрического манометра служат кварцевые пластины. Изменение давления, передаваемого через мембрану на пластины, вызывает изменение разности потенциалов на пластинах. Напряжение на входе усилителя преобразователя формирует унифицированный выходной сигнал прибора. Пьезоэлектрические манометры применяются для измерения давлений до 100 МПа.

Приборы для измерения уровня

Измерение уровня необходимо для контроля количества вещества в емкостях (бункеры, реакторы и пр.) и его расходе (изменении количества вещества во времени). Приборы для измерения уровня называются *уровнемерами*, а для сигнализации предельных значений уровня (минимального или максимального) – сигнализаторами уровня.

В зависимости от метода преобразования значений уровня в измеряемый электрический или пневматический сигналы уровнемеры делят на следующие группы:

- поплавковые уровнемеры;
- гидростатические уровнемеры;
- ультразвуковые уровнемеры;
- радарные уровнемеры;
- емкостные уровнемеры.

Сигнализаторы уровня подразделяют на ультразвуковые, емкостные, вибрационные, радиоизотопные и электромеханические.

Анализаторы состава и свойств веществ

Качество продуктов, получаемых в ходе технологических процессов, определяется его физико-химическими свойствами. Контроль этих свойств в ходе процесса позволяет повысить эффективность процесса и качество продукта. Анализ состава веществ предполагает определение таких свойств, как концентрация, вязкость, плотность, электропроводность и др.

Приборы, предназначенные для анализа состава веществ, называются *анализаторами*. В основном это анализаторы газов и жидкостей. Методы анализа определены ГОСТ для газов подразделяются в зависимости от прямого измерения или с предварительны преобразованием пробы на две группы. Первая группа (прямого измерения включает абсорбционно-оптические, термокондуктометрические, термомагнитные, пневматические методы. В состав второй группы входят электрохимические, термохимические, фотоколориметрические,

пламенно-ионизационные, хроматографические и массоспектрометрические методы. Методы анализа жидкостей также регламентированы и по вышеприведенной классификации подразделяются на методы прямого измерения – кондуктометрические, потенциометрические, диэлькометрические, полярографические, оптические, радиоизотопные, механические и кинетические. К методу с предварительным преобразованием пробы относится титрометрический метод.

Газоанализаторы

Существует большое число газоанализаторов для контроля процентного содержания различных газов, в том числе токсичных (CO_2, CO, SO_2, Cl_2, NH_3, H_{2S} и др.), взрывоопасных (H_2, CH_4, C_3H_8) газов, а также O_2.

Для токсичных и взрывоопасных газов введено понятие предельно допустимой концентрации (ПДК) в рабочей зоне. Выпускаются сигнализаторы до-взрывных концентраций (ДВК). Сигнализаторы ДВК и газоанализаторы ПДК при содержании горючих паров 5...50 % от нижнего предела воспламенения (НПВ) должны включать световую и звуковую сигнализацию для оповещения персонала о наличии опасных концентраций взрывоопасных и вредных веществ. Одной из основных технических характеристик газоанализатора или сигнализатора является диапазон измерения по поверочному компоненту в процентах от концентраций, соответствующих нижнему пределу.

Весоизмерительная техника

Весоизмерительное и дозирующее оборудование

Весоизмерительное промышленное оборудование классифицируют по различным признакам: назначению, статической (динамической) нагрузке, типам весоизмерительных (чувствительных) датчиков, грузоподъемности, точности и т. д.

По назначению промышленное весоизмерительное оборудование (лабораторные и другие непромышленные весы далее не рассматриваются) делят на конвейерные, бункерные,

крановые, платформенные, монорельсовые, паллетные и вагонеточные весы. Отдельную группу весоизмерительных устройств составляют дозирующие устройства (дозаторы) непрерывного и дискретного действия, шнековые весы и специальные тензометрические весоизмерительные устройства.

В зависимости от того, осуществляется взвешивание в статике или в динамике, весы делят на статические и динамические. К динамическим весам относятся конвейерные весы, а также весы для взвешивания, например, вагонеток в движении; к статическим – платформенные, бункерные, крановые, паллетные и другие весы при взвешивании в статике.

Чувствительными датчиками весов являются силогидравлические преобразователи, тензодатчики, динамометрические датчики и др. Наибольшее применение нашли тензодатчики в комплекте с программируемыми измерительными преобразователями.

Диапазон измерения веса современных весоизмерительных устройств составляет от нескольких грамм до 200 тонн. При этом весоизмерительные датчики имеют различную конструкцию и работают как на сжатие, так и на растяжение.

Среди отечественных производителей весоизмерительной техники отметим фирмы «Балтийские весы и системы», «Веста», «Метра», «Тензо-М», «ПетВес», «Пе-тровес», «Топау», «Эталон Прибор», «Сибтензоприбор», «Промавтоматика», «Союзцветметавтоматика» и др. Крупные призводители весоизмерительной техники входят в Российскую Ассоциацию производителей весоизмерительной техники. Из зарубежных производителей весоизмерительной техники на Российском рынке отметим Mettler-Toledo GmbH, Caston.

В табл. 3.8 приведены краткие технические характеристики отечественных весоизмерительных и дозирующих устройств. В качестве первичного преобразователя используется, как правило, тензометрический преобразователь.

Таблица 3.8

Характеристики весоизмерительных и дозирующих устройств

Тип	Производительность, т/ч	Ширина, мм, и скорость, м/с, транспортерной ленты	Параметры материала	Погрешность	Число роликоопор	Выходной сигнал	Габариты, мм
ВК-2	1...1000	400...2400 мм; 0,5...4 м/с	Насыпная плотность >0,8 т/м^3	±1...2 %	1	0/4…20 мА; К8-232/К5-485	1560*1145 *1065
Тип	Производительность, т/ч	Ширина, мм, и скорость, м/с, транспортерной ленты	Параметры материала	Погрешность	Число роликоопор	Выходной сигнал	Габариты, мм
ВКТ-3	0,8...100	650; 800 мм	Насыпная плотность >0,8т/м^3	±1%	1	0…5мА	1560*1145* 1065
ВКТ-4	5; 10; 25; 50; 100; 250	650; 800 мм; 0,4 м/с	Линейная Плотность 10...450 кг/м	±0,5...1 %	1	0/4…20 мА;0..5 мА; К5-485	1650*300*690
ВКТ-5	0,8...8000	650; 800 мм; 0,125...2,5м/с	Линейная плотн 16...800 кг/м	±1%	1;2	0/4…20Ма; 0...5Ма; К5-485	1560*1145* 1065
ВЕ7371	990	1400 мм; 2,1 м/с	Линейная плотн 25...125 кг/м	±0,5%	2	0...5мА, 0...10В	1600*1820*400
ВЕ 7 240	10 000	500...1600 мм; 0,5...6,3 м/с	Линейная плотн 25...400 кг/м	±0,5%	2	0...5мА, 0...20мА, ИРСП	1485Х (760...2050) Хх410
МШ	2000	1800 мм; До 3 м/с	Линейная плотн 2... 350кг/м	±0,5%... 1%	1	4…20мА, СК	2092*242*468
М15	5 000	500...1800; до 4 м/с	Линейная плотн 10... 415кг/м	±0,5%	1	4…20мА, СК	(740, ...2340)хх(241.. .

Показывающие и регистрирующие приборы

Показывающие аналоговые и цифровые приборы

В аналоговых измерительных приборах используются электромеханические измерительные преобразователи, преобразующие электрическую величину (ток, напряжение) в угловое или линейное перемещение указателя.

Электромагнитные приборы для измерения переменного тока и напряжения основаны на взаимодействии магнитного поля измеряемого тока, проходящего через катушку, с одним или несколькими сердечниками из магнитомягкого материала. В приборах используются неподвижная катушка и подвижный сердечник со стрелкой. Подвижный сердечник может быть выполнен с плоской или круглой катушкой. Приборы электромагнитной системы позволяют измерять действующее значение тока и напряжения в цепях с искаженной формой сигнала.

Помимо электромагнитной системы в приборах для измерения переменного тока и напряжения используется магнитоэлектрическая система с выпрямителем. Измерительный механизм с внутрирамочным магнитом имеет опоры на кернах или растяжках и выпрямитель в измерительной цепи.

Основным элементом магнитоэлектрических приборов, предназначенных для измерения постоянного тока и напряжения, являются постоянный магнит и катушка (рамка). Приборы выполнены с подвижной катушкой или с подвижным магнитом. В первом случае магнит по отношению к катушке является внешним. В воздушном зазоре между магнитопроводом и полюсными наконечниками магнита находится цилиндрический сердечник с катушкой и стрелкой. Магнитоэлектрические приборы используются для измерения токов от 10 мкА до 20 А и напряжений от 25 мВ до 750 В при прямом включении. Для измерения в большем диапазоне применяются внешние шунты и добавочные сопротивления.

В электродинамической системе электроизмерительных приборов используется подвижная катушка со стрелкой и неподвижная катушка. Основное применение электродинамическая система нашла в переносных приборах переменного тока.

В ферродинамических измерительных приборах для создания магнитного потока в рабочем зазоре используется электромагнит, состоящий из неподвижной катушки, магнитопровода и ферромагнитного сердечника. Подвижной частью является бескаркасная рамка со стрелкой. Ферродинамические приборы в основном используются для измерения мощности.

Индукционные измерительные устройства используются в электросчетчиках энергии переменного тока. Прибор состоит из электромагнитов с обмотками, питаемыми переменным током. В зазорах магнитопроводов располагается подвижный алюминиевый диск, в котором индуктируются токи, взаимодействие которых с магнитными потоками создает вращающий момент.

Для преобразования значений токов или напряжений в стандартный (унифицированный) вид используются измерительные трансформаторы тока и напряжения. Стандартными величинами тока и напряжения принято считать для тока – 5 А (иногда 1 А), для напряжения – 100 В.

Функциональные устройства систем автоматизации

Нормирующие преобразователи

Нормирующие преобразователи неунифицированных входных сигналов в нормированные выходные сигналы широко используются в системах автоматизации.

Входными сигналами нормирующих преобразователей являются сигналы термопар, термометров сопротивления, дифференциально-трансформаторных и ферродинамических датчиков, датчиков давления, расхода и др.

Выходными сигналами измерительных (нормирующих) преобразователей являются сигналы постоянного тока 0...5 мА, 0/4...20 мА, а также сигналы напряжения 0...5 В, 0...10 В, -5... +5 В или -10...+10 В.

По числу преобразуемых входных или выходных сигналов преобразователи делятся на одноканальные и многоканальные, а по условиям эксплуатации – на преобразователи в общепромышленном и взрывозащищенном исполнении. По зависимости выходного сигнала от входного преобразователи могут быть с линейной или нелинейной зависимостью, а по связи между входными и выходными цепями – с гальванической связью или без нее. Ряд преобразователей имеют ЖК-дисплей для индикации значений преобразуемого параметра.

В табл. 3.9 приведены технические характеристики некоторых нормирующих преобразователей отечественного производства.

Преобразователи имеют возможность перестройки диапазона измерения параметра, а также типа НСХ (например, 50М на 100М, 50П на 100П или Pt100). Крепление нормирующих преобразователей в основном осуществляется на DIN-рейку.

Таблица 3.9

Технические характеристики некоторых нормирующих преобразователей

Модель	Тип первичного преобразователя	Число каналов преобразования	Погрешность преобра-зования, %	Выходной сигнал	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, мм
ИПМ 0101Ех «Элемер»	ТС:50 МДООМ, 50П, 100П, Pt 100; ТП: L,K	2	±0,5 %	0…5мА, 4...20 мА	24 VDC	78, 5x22,5x60,5
НП-02 ГП «Метран»	ТС:50МДООМ, 50 П, 100 П; ТП:L,K,S,B	1	±0,5 %	0…5мА, 4...20 мА	24 VDC	72x144x180
Ш9322А-2 ГП «Метран»	ТП:L,K,S,B,A-1, A-2, A-3	2	±0,5 %	0…5мА, 4...20 мА	24 VAC	60x160x350
ИПМ0196/М 1 ГК «Метран»	ТС:50М, 100М, 50П, 100П, Pt 100, ТП: L,K,A	2	±0,5 %	0…5мА, 4...20 мА	24 VDC; 220VAC	23x75x125
НП-П10 ОАО «ЗЭиМ»	0...10, -10...0...10 мГн	1	±1,0 %	0…5 мА, 0...20мА, 4...20мА	220 VAC	40x172x162
НП-Ш0 ОАО «ЗЭиМ»	0, 1...10 кОм	1	±0,5 %		24 VDC через БП24	80x170x162
НП-Р10 ОАО «ЗЭиМ»	До 150 мБ	1	±0,5%		24 VDC через БП24	40x172x162

Исполнительные механизмы

Исполнительные механизмы (электрические, пневматические, гидравлические) предназначены для перемещения (поворотного или поступательного) регулирующего органа в системах управления технологическими процессами. В качестве регулирующих органов в АСУ ТП используются запорные и регулирующие односедельные и двухседельные клапаны, клапаны типа *«баттерфляй»*, шаровые запорные и регулирующие краны, пробковые краны, заслонки (шибера), поворотные дисковые затворы и др.

Электрические исполнительные механизмы

Электрические исполнительные механизмы (ЭИМ) по принципу действия делят на электромагнитные (соленоидные) и моторные. Электромагнитные ЭИМ представляют собой электромагнит с плунжером, связанным с регулирующим органом (РО).

При подаче командного импульса на электромагнит плунжер втягивается внутрь электромагнита, перемещая РО. При снятии сигнала плунжер под действием возвратной пружины устанавливается в начальное положение. В зависимости от конструкции РО электромагнитные ЭИМ имеют исполнение НО *(«нормально открыт»)* или НЗ *(«нормально закрыт»)*. Ввиду того, что РО может занимать одно из двух крайних положений *(«закрыто»* или *«открыто»)* электромагнитные ЭИМ применяются в схемах двухпозиционного регулирования, а также в схемах аварийной защиты и блокировки. ЭИМ имеют ряд преимуществ перед пневматическими и гидравлическими ИМ. Подвод питания осуществляется по проводам, монтаж и эксплуатация которых значительно проще, чем монтаж импульсных линий. Недостатком ЭИМ является некоторый выбег сервомотора и люфты редуктора.

Управление электрическим исполнительным механизмом (ЭИМ) осуществляется контактным способом (с помощью контактов реле или магнитного пускателя) или бесконтактным способом (с помощью бесконтактных ключей пускателей, тиристорных или симисторных ключей).

Для контроля положения вала ЭИМ и регулирующего органа ЭИМ комплектуется контактным блоком сигнализации положения (блок концевых выключателей) или бесконтактным (индуктивный, реостатный или токовый). Блок концевых выключателей (БКВ) обеспечивает сигнализацию при нахождении вала ЭИМ в крайних положениях и прерывание перемещения вала в соответствующем направлении.

Концевые выключатели могут быть смещены (раздвинуты или сдвинуты) в пределах сектора угла поворота вала ЭИМ. Поворот вала ЭИМ составляет для большинства однооборотных ЭИМ 0,25 оборота (90°) или 0,63 оборота (225°).

Одним из крупнейших российских производителей ЭИМ является ОАО «Завод Электроники и Механики (ЗЭиМ)» (г. Чебоксары) [1.111]. Предприятие выпускает блоки сигнализации положения индуктивные БСПИ (диапазон 0...10 мГн), блоки сигнализации положения реостатные БСПР (диапазон 0...120 кОм), блоки сигнализации положения токовые БСПТ (диапазон 0...5, 0...20 или 4...20 мА). Также для сигнализации положения регулирующего органа ЭИМ может комплектоваться механизмом

детализации положения МСП–1. Выходной сигнал МСП–1 токовый (0...5 мА при сопротивлении нагрузки 2,5 кОм и 0.. .20 мА, 4.. .20 мА при сопротивлении нагрузки до 1 кОм). Питание блока МСП–1 составляет 220 В, 50 Гц. Для взрывозащищенного исполнения выпускаются блоки сигнализации положения соответственно БСПР–ПВТ6, 5СПТ–ПВТ6 и блоки концевых выключателей БСП–ПВТ6. Некоторые МЭО имеют ручной маховик для поворота вала редуктора без помощи электродвигателя.

В зависимости от климатических условий работы ЭИМ по ГОСТ 15150 имеют различное климатическое исполнение: У2 (-30...+50 °С, относительная влажность до 100 % без конденсата), УЗ (-Ю...+50 °С, относительная влажность до 95 % без конденсата), Т2 (-10...+50 °С, относительная влажность до 100 % без конденсата), ТЗ(+5...+50 °С, относительная влажность до 100 % без конденсата) и ряд др.

В табл. 3.10 приведены характеристики ЭИМ ОАО «ЗЭиМ».

Таблица 3.10

Характеристики ЭИМ ОАО «ЗЭиМ»

Тип	Потребляемая мощность, Вт	Тип электродвигателя	Тип командного устройства	Габаритные размеры, мм
МЭО–6,3/10–0,25–01	46	ДСОР–68–0,25–150')	ПБР–2М	230х200х185
МЭО–16/63–0,25–01	46	ДСОР–68–0,25–150	ПБР–2М	230х200х185
МЭО–40/10–0.63–99К	95	ДСТР–НО–0,6–136[2])	ПБР–ЗА	235х200х185
МЭО–100/63–0.63–99К	170	ЗДСТР–135–1,6–150[3])	ПБР–ЗА	440х315х305
МЭО–250/63–0.63–99К	250	ЗДСТР–135–4,0–150	ПБР–ЗА	440х315х305
МЭО–630/63–0.63–92КБ	200	АИР–56А4	ПБР–ЗА	445х452х402
МЭО–10/10–0,25–ИВТ4–00	110	ДСТР–П6–0,6–136–ПВТ4	ПБР–2М	410х265х305

Продолжение табл. 3.10

Тип	Потребляемая мощность, Вт	Тип электродвигателя	Тип командного устройства	Габаритные размеры, Мм
МЭО–16/10–0.25–ПВТ4–00	ПО	ДСТР–116–1.6–136–11ВТ4	ПБР–2М	410х265х305
МЭО–40/25–0.25–ПВТ4–00	170	ДСТР–116–1,6–136–ПВТ4	ПБР–2М	410х265х305
МЭОФ–6,3/10–0,25–02	46	ДСОР–68–0,25–136	ПБР–2М1	245х200х185
МЭОФ–16/63–0,25–02	36	ДСОР–68–0,25–136	ПБР–2М1	245х200х185
МЭОФ–40/160–0,63–02	46	ДСОР–68–0,25–136	ПБР–2М1	245х200х185
МЭОФ–6,3/12,5–0,25–ПВТ5-03	60	ДСТР–П6–1,0–136–НВТ4	ПБР–3А	320х150х210
МЭМ–6,3/63–10–96	6,3	АИР 56В4	ПБР–3А	255х150х285
МЭМ–16/63–10-96	16		ПБР–3А	255х150х285
МЭМ–63/63–10–ПВТ4–98	6,3		ПБР–3А	152х280х500
МЭП–25 000/100–50–99	200	Номин. усилие на штоке: 25 000 Н; ход штока – 50 мм	ПБР–2М1	325х330х720
МЭП–20 000/240–120–00	200	Номин. усилие на штоке: 20 000 Н; ход штока	ПБР–3А	325х330х840
ПЭОЗ–13–1,5-02К[4]>	100	ДСТР–1 10–0,6–136	ПБР–3А	–
ПЭОЗ–21–1.5–11ВТ4–02	ПО	ДСТР–П6–0,6–НВТ4	ПБР–3А	375х265х305

Продолжение табл. 3.10

Тип	Потребляемая мощность, Вт	Тип электродвигателя	Тип командного устройства	Габаритные размеры, Мм
ПЭОМ–8/80–0,25–02	10	АИР 63А6	ПБР–2М	–
ПЭМ–А7	180	Асинхронный. Настройка номин. крутящего момента 25. . .70 Н–м; число оборотов 10... 45	ПБР–2М	373х332х559

1) ДСОР–68 – малогабаритный синхронный двигатель с числом оборотов вала 150 об/мин.

2) ДСТР–110 – малогабаритный синхронный двигатель с числом оборотов вала 136 об/мин.

3) ЗДСТР–135 – малогабаритный синхронный двигатель с числом оборотов вала 150 об/мин.

4) ПЭОЗ–13–1.5–02К: 13 – номинальный крутящий момент, 13Н; 1,5 – скорость вращения вала, 1,5 об/мин.

Контрольные вопросы:

1. На какие три класса делятся первичные преобразователи (датчики)?
2. Статические и динамические характеристики датчиков.
3. Какие три типа датчиков применяются при измерении температуры?
4. Перечислите основные типы термопар.
5. Принцип работы термометра сопротивления и их основные типы.
6. Каково отличие термистора от термометра сопротивления?

7. Перечислите основные методы измерения расхода.

8. Какие три уровня давления используются в приборах для измерения давления?

9. Перечислите типы уровнемеров в зависимости от метода преобразования значений уровня в различные сигналы.

10. Какие значения принимают выходные сигналы нормирующих преобразователей?

3.2. Связь УВМ с технологическим объектом

Преобразование аналоговых и цифровых сигналов

Цифро-аналоговое преобразование. Важным этапом во многих процессах управления является цифро-аналоговое (ЦА) преобразование – генерация аналогового сигнала с уровнем напряжения, соответствующим цифровому значению на входе.

Эта процедура используется для передачи от компьютера управляющего сигнала исполнительному механизму или опорного значения для регулятора.

ЦА – преобразование – также необходимый шаг в выполнении обратного аналого-цифрового (АЦ) преобразования.

Идеальный ЦАП вырабатывает выходной аналоговый сигнал, линейно зависящий от n-битного цифрового входного сигнала. В наиболее распространенных схемах каждый бит входного слова управляет некоторой составляющей выходного напряжения, которое генерируется каскадом сопротивлений (см. рис. 3.7). Величины резисторов выбираются так, чтобы получить напряжение, равные $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8} \ldots \frac{1}{2^n}$ опорного значения, которые соответствуют позиции соответствующего бита в слове. Эти значения складываются под управлением входных бит и затем усиливаются.

Положение ключей $S_1, S_2 \ldots S_n$ соответствует либо 0, либо 1 во входном цифровом слове.

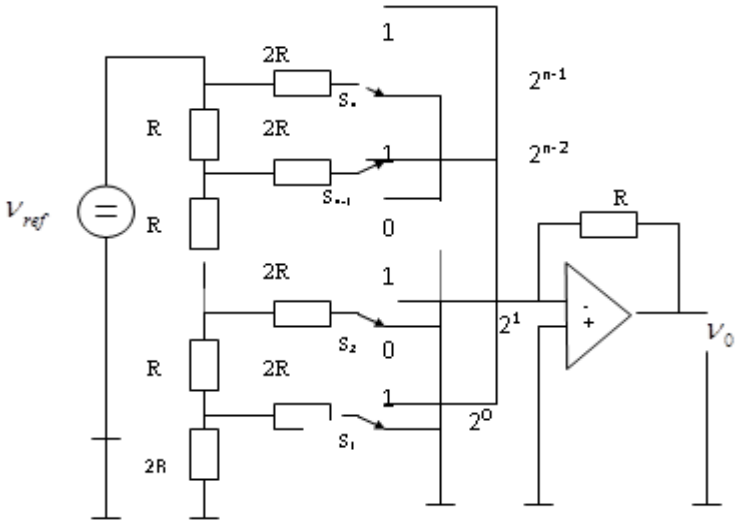


Рис. 3.7. Цифро-аналоговый преобразователь
с каскадом сопротивлений

Выходное напряжение составляется из последовательно убывающих членов

$$\upsilon_0 = \upsilon_{zef} \cdot \left(\frac{S_1}{2^1} + \frac{S_2}{2^2} + \ldots \frac{S_n}{2^n} \right).$$

Пример, в -8-битном ЦАП байт $\overset{S_1\ S_2\ S_3\ S_4\ S_5\ S_6\ S_7\ S_8}{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1}$ приводит к следующему выходному напряжению (при $\upsilon_{zef} = -10в$).

$$\upsilon_0 = \upsilon_{zef} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{256} \right) \approx -3{,}48в.$$

Очевидно, что ЦАП выдает только дискретные выходные напряжения с разрешением $\upsilon_{zef} \cdot 2^{-n}$.

Аналого-цифровое преобразование. Для компьютерной обработки дискретные аналоговые значения измерительного сигнала необходимо представить в цифровой форме, т. е. выполнить

АЦ преобразование. АЦП генерирует двоичное слово – цифровой выход – на основе аналогового сигнала. АЦП выполняется в виде платы расширения компьютера.

АЦП могут работать по двум методам – параллельное сравнение и пошаговое приближение (аппроксимация).

В АЦП работающим по принципу сравнения *(conparation),* входное значение сравнивается с различными уровнями напряжения, выработанными на основе известного опорного напряжения и каскада сопротивлений (рис. 3.8). На выходе каждой схемы сравнения – компаратора появляется 0 либо 1 в зависимости от соотношения входного и опорного напряжений. Выход каждого компаратора затем преобразуется в двоичный код. Такие АЦП обладают хорошим быстродействием, но довольно дороги из-за применения компараторов.

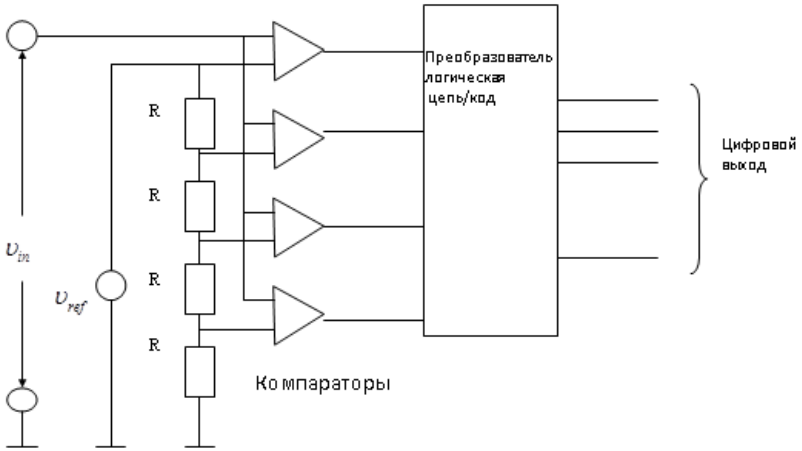


Рис. 3.8. АЦП с параллельными схемами сравнения

АЦП, работающий по принципу пошагового приближения, построен на основе ЦАП.

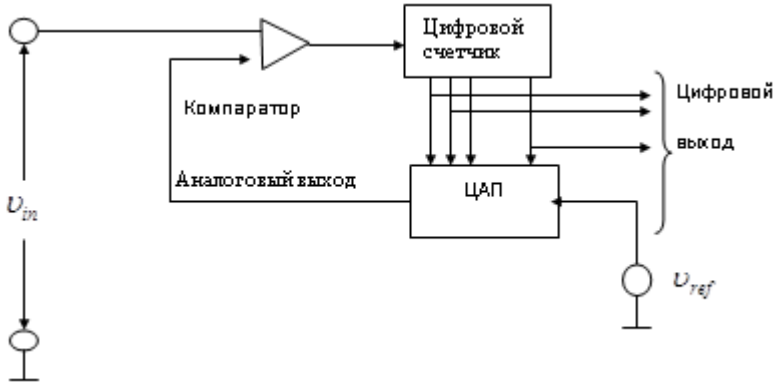


Рис. 3.9. АЦП, работающий по принципу
пошагового приближения

Диапазон входного сигнала разделен на 2^n–1 интервалов, где n – число бит в выходном слове. Счетчик быстро генерирует последовательные числа, которые сразу преобразуются в аналоговые значения. Счетчик продолжает наращивать выход до тех пор, пока разница напряжений между выходом АЦП и входным аналоговым значением не станет меньше разрешающей способности АЦП.

Контрольные вопросы:

1. Что входит в состав технических средств локальной автоматики?
2. Приведите основные преобразователи (датчики), используемые при измерении температуры, расхода, давления и т. д. в технических процессах.
3. Какие устройства относятся к средствам отображения и хранения информации?
4. Что относится к средствам использования командной информации?
5. По каким признакам классифицируются измерительные сигналы?
6. Перечислите основные узлы УВМ.
7. Какое назначение ЦАП и АЦП?

3.3. Программируемые логические контроллеры (ПЛК)

3.3.1. Общее описание и классификация ПЛК

Контроллеры могут быть классифицированы по различным признакам: функциональным, конструктивным, объему вычислительных ресурсов, числу каналов ввода/вывода и др.

Все контроллеры в зависимости от функциональных возможностей, вычислительной мощности и конструктива (по критерию цена/производительность) предложено разделить на моноблочные (компактные), модульные, PC-совместимые (PC-based) и встраиваемые (Embedded Controller). Следует отметить, что эта классификация носит условный характер, поскольку моноблочные или модульные контроллеры могут быть PC-совместимыми, а PC-совместимые контроллеры могут иметь модульную или моноблочную конфигурацию. Однако для проектирования АСУ ТП малой, средней или большой информационной мощность предварительный выбор аппаратно-программного обеспечения системы определяется выбором того или иного типа контроллера по вышеприведенной классификации, прежде всего с учетом функциональных особенностей, производительности 1 числа каналов ввода/вывода.

Моноблочный контроллер представляет собой микропроцессорное устройстве, в едином конструктиве которого располагаются источник питания (не обязательно центральный процессор (сопроцессоры), память, включающая память программ и память переменных (как правило, энергонезависимая), встроенный порт(ы) для выхода в сеть, фиксированное число встроенных каналов аналогового и/или дискретного ввода/вывода, встроенный ПИД-регулятор с автонастройкой. Так, новый моноблочный контроллер Twido фирмы *Schneider Electric* имеет 24 входа/выхода с расширением до 88 каналов, моноблочный контроллер FPO фирмы *Matsushita* имеет 16 дискретных входов и 16 дискретных выходов.

Модульные контроллеры представляют собой крейт (корзину) с модулем питания, процессорным модулем и различным числом модулей ввода/вывода, коммуникационных и специальных модулей. Число модулей в корзине доходит до 16 и более.

При выборе коммуникационных модулей промышленных сетей следует иметь в виду скорость и дальность передачи данных в сети, число узловых станций, наличие питания по шине, топологию сети. Следует отметить, что наблюдается расширение применимости Ethernet-сетей, Internet-технологий и GSM-телемеханики (на базе сотового телефона, модема и SIM-карты) и ряда др.

PC-based или PC-совместимые контроллеры составляют отдельный класс программируемых контроллеров, значение и роль которых с развитием Internet-технологий существенно возрастает. PC-based контроллеры характеризуются наличием встроенной PC-совместимой операционной системы (Windows 9x/200/NT/XP/CE,QNX,MS DOS, Linux, MiniOS7, OS-9 и др.), использованием стандартных системных шин (PC–104, VME, AT96 и др.), возможностью использования стандартного программного обеспечения (ISaGparh, Си, Турбо-Си, Си++, Паскаль, Assembler, SCADA-систем Trace Mode, InTouch, Citect и др., а также баз данных), коммуникационных стандартов, наличием OPC-сервера и др. PC-based контроллеры, таким образом, могут использовать богатое программное обеспечение независимых производителей, имеют значительно больший объем памяти, чем 1 лицонные ПЛК, возможности расширения и модернизации, а также лучшие возможности диагностирования. PC-based контроллеры на базе промышленных ПК позволяют сосредоточить функции управления и визуализации в одном месте, используя встраиваемые системы –платы УСО, памяти, коммуникационные могли и др., а SCADA-системы, требующие больших объемов памяти и недоступные ПЛК, легко реализуются на ПК. Промышленные компьютеры, выпускаемые рядом фирм *(Advantech, Axiom, Portwell* и др.), удовлетворяют самым жестким условиям эксплуатации, — степень защиты лицевой панели IP65, диапазон рабочих температур от 0 до 50 °С. Стандартные операционные системы позволяют использовать инструментальные средства разработки прикладного программного обеспечения ПО) различных фирм. Наличие коммуникационных портов ввода/вывода, механизма взаимодействия OPC позволяют ПК взаимодействовать с любым оборудованием – от ПЛК до любых рабочих станций. Однако эти

контроллеры зачастую обладают избыточностью вычислительных ресурсов и функций ввиду их универсальности, возможностью зависания с длительным временем рестарта, пониженной надежностью за счет множества компонентов (приложений) на платформе PC. Для большинства практических применений влияние этих недостатков может быть устранено или снижено.

Встраиваемые ПЛК (Embedded Controller) представляют собой полнофункциональные системы, выполненные в форматах PCI, CompactPCI, ISA, PC/104, MicroPC и других, устанавливаемые в слот компьютера или объединительной платы, входящей в состав оборудования. При этом встраиваемый ПЛК использует внешнее питание, степень защиты базовой системы, имеет малые габариты, легкость замены и ряд других достоинств. Среди производителей встраиваемых систем фирмы *Advantech, Fastwel, Octagon Sistems* и др. Примерами встраиваемых контроллеров служат RTU188 и CPU188-5 фирмы *Fastwel,* модель 5 070 фирмы *Octagon Sistems* и др. Новым направлением встраиваемых систем является применение SOM-модулей, представляющих собой компактные высокоинтегрированные компьютеры, устанавливаемые на базовую плату.

Следующий класс локальных контроллеров включает контроллеры, встраиваемые в оборудование, и автономные контроллеры для управления небольшими объектами. По вышеприведенной классификации это моноблочные и встраиваемые контроллеры. Наконец, сетевой класс контроллеров (PLC Network) с числом входов/выходов сотни и тысячи каналов представляют модульные контроллеры.

Следует отметить, что программируемые логические контроллеры по сетевым возможностям приближаются к ПК, их память Флэш-memory обладает достаточной емкостью для размещения небольших SCADA-систем. Примером может служить SCADA-система Trace Mode, размещенная в виде SoftPLC в памяти контроллеров «Лагуна», Ломиконт, Теконик, АДЭМ и др. ПЛК обладают повышенной надежностью, высоким быстродействием (0,9 мкс и менее на базовую команду), малыми габаритами, возможностью *«горячей замены модулей»* (замена модулей без выключения питания) и др. К дополнительным возможностям

относятся наличие сторожевого таймера, самодиагностика, режим автонастройки параметров регулятора.

Программирование контроллеров осуществляется в зависимости от задачи и типа контроллера на различных языках программирования по стандарту IEC 61131–3. Широко применяется программный пакет ISaGRAF как интегрированный пакет разработки и отладки приложений для ПЛК и связи с ПО верхнего уровня. Таким образом, отмечается сближение технических характеристик ПК и ПЛК, удовлетворяющих требованиям единого стандарта IEC 1131, и имеющим общий механизм взаимодействия программных средств в виде OPC-сервера (OLE for Process Control), что позволяет на их базе создавать оптимальные структуры РСУ.

Как правило, контроллеры устанавливаются на DIN-рейку, а соединения с другими модулями, например с модулем питания, модулем аналогового ввода и других, осуществляются с помощью разъемов, жгутов или проводников с наконечниками *«под винт»*.

В последние годы получили развитие станции удаленного ввода/вывода, включающие в состав модули УСО, процессорный модуль обработки входных сигналов блок питания и коммуникационный модуль для связи с базовым контроллером. При этом станции ввода/вывода располагаются вблизи объекта управления и обмениваются данными по сети с контроллером, находящимся в операторском помещении (в шкафу или универсальной стойке). Этим достигается существенная экономия кабельных трасс, а базовый контроллер освобождается от функций обработки сигналов (фильтрация, масштабирование, усреднение и др.). Станции управления представляют собой каркас со встроенными модулями (устройства I/O) или отдельные модули, объединенные цифровым каналом приема/передачи данных, устанавливаемые, как правило, на DIN-рейке. Модули могут быть распределены территориально или располагаться в непосредственной близости друг от друга на общей DIN-рейке.

3.3.2. Контроллеры компании Advantech, Тайвань

Фирма *Advantech* производит контроллеры различных классов: компактные, модульные, PC-совместимые и встраиваемые. К компактным контроллерам можно отнести управляющие модули ADAM–4500 и ADAM 6 500/6 501. Семейство модульных контроллеров представлено серией ABAM–8 000. К PC-based контроллерам относятся контроллеры серии ABAM–5 000 и промышленные компьютеры M1C–3000 с модулями ввода/вывода на шине Сотрас 4PC1.

Контроллер ADAM–4500 (рис. 3.10) в компактном корпусе представляет собой IBM PC-совместимый управляющий модуль с процессором 80 188 и ОС ROM–DOS. Память ОЗУ – 256 Кбайт, флэш-ПЗУ – 256 Кбайт. Коммуникационные порты: COM1 – К5–232/К5–485, COM2 – К5–485, COMЗ – К5–232. Скорость обмена – до 115,1 Кбит/с, длина линии связи — до 1200 м. Напряжение питания: 10...30 *VDC*.

Контроллер ADAM–6500/6501 с набором модулей аналогового и дискретного ввода/вывода в аналогичных корпусах предназначен для построения систем сбора данных и управления на основе интерфейса Ethernet. Для этого в каждый модуль сбора данных встроен Web-сервер. Для взаимодействия со SCADA-системой в модули реализована поддержка протокола Modbus TCP/IP и обмен данными осуществляется с помощью OPC-сервера. Контроллер ADAM–6 500/6 501 со встроенной ОС WindowsCE снабжен процессором Intel StrongArm 206 МГц (ADAM–6 500) или Intel XScale 400 МГц (ADAM–6 501). Память ОЗУ – 64 Мб, флэш-ПЗУ – 16 Мб (ADAM–6 500) и 32 Мб (ADAM–6 501). Интерфейс Ethernet: 10BaseT (ADAM–6 500) и 10/100 BaseT (ADAM–6 501). Последовательные интерфейсы ADAM–6 500: 3xRS–232 и 2xRS–485. Интерфейсы ADAM–6 501:1xRS–232,1xRS–232/RS–485.

В состав серии ADAM–6 000 входят 8-канальный модуль аналогового ввода ADAM–6 017 и 8-канальный модуль для подключения термопар, 16-канальный модуль дискретного ввода/вывода ADAM–6 051, конверторы Ethernet в оптический интерфейс 100 BaseFX и USB в RS–232/RS–422/RS–485 и др.

Модульный контроллер распределенной системы сбора данных и управления ADAM–8 000 (рис. 3.11) программно совместим с контроллерами серии Simatic S7–300 фирмы *Siemens.* Программирование контроллера возможно как с помощью пакета STEP7, так и с помощью пакетов ADAM–WinPLC7 и ADAM–WinNCS. Контроллеры серии ADAM-8000 могут объединяться в сетях Profibus DP, Modbus TCP и CAN. Контроллер имеет сменные процессорные модули и модули ввода/вывода. В табл. 3.11 приведены основные характеристики процессорных модулей.

Таблица 3.11

Характеристики процессорных модулей ADAM–8 000

Тип модуля/CPU	Память ОЗУ/ программ, кбайт	Число таймеров/ счетчиков	Время исполнения бита/слова, мкс	Интерфейс
ADAM–8214–1B/ CPU14	32/40	128/256	018/0,78	RS–232
ADAM–8214–2B/ CPU14	32/40	128/256	018/0,78	RS–232, Profibus DP
ADAM –8215–1B/ CPU15	64/80	128/256	018/0,78	RS–232
ADAM–8215–2B/ CPU15	64/80	128/256	018/0,78	RS–232, Profibus DP
ADAM –8216–2B/ CPU16	128/192	128/256	018/0,78	RS–232, Profibus DP

Для всех моделей контроллера допускается объединение до 32 модулей ввода/вывода по MPI-интерфейсу. При наличии интерфейса Profibus DP (скорость обмена данными от 9600 бит/с до 12 Мбит/с) число ведомых устройств — до 125 (до 32 без повторителя). В состав серии AOAM–8 000 входят коммуникационные

модули Profibus DP Master и Profibus DP Slave, CANopen Maser и CANopen Slave, а также DeviceNet Sve.

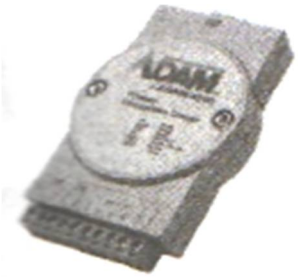


Рис. 3.10

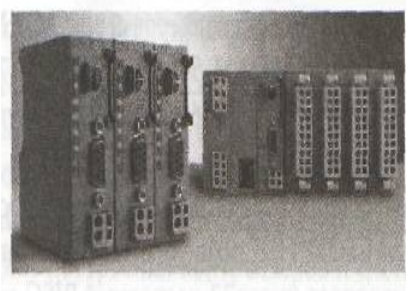


Рис. 3.11

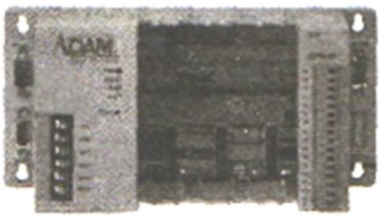


Рис. 3.12

Модули аналогового ввода – 4- и 8-канальные (ADAM8231–1BD52 и ADAM8231–1BF00), аналогового вывода – 4-канальные ADAM8232–1BD50, модули дискретного ввода и вывода – 8-, 16- и 32-канальные. Помимо этих модулей в состав ADAM–8 000 модуль интерфейса Modbus, модуль счетчика и др. ***Модульные контроллеры серии ADAM–5 000*** включают IBM PC-совместимые контроллеры: ADAM–5 510/5 510M/5 510E, различающиеся объемом памяти и числом последовательных портов; ADAM–5 511 – с поддержкой Modbus; ADAM–5 000/TCP. AOAM–5 510/TCP, ADAM–5 510E/TCP и ADAM–5 510EKW/TCP – с поддержкой Ethernet; ADAM–5 550 с ОС Windows CE 5.0; ADAM–5 000/485 на базе интерфейса RS–485; ADAM–5 000/TCP с 32-разрядным RISC-процессором Strong ARM фирмы Intel.

Контроллеры ADAM–5 000 состоят из процессорного модуля, кросс-платы с блоком питания и модулей ввода/вывода (от 4 до 8). Питание контроллера — 10...30 *VDC,* диапазон рабочих температур от -10 до +70 °С. Для примера рассмотрим контроллер ADAM–5 550.

Контроллер ADAM–5 550 с ОС Windows CE (рис. 3.12) снабжен процессором ADM Geode CX533, объем ОЗУ — 128 Мбайт, флэш-ПЗУ – 1,5 Мбайт. Контроллер bмеет встроенные Web-сервер и PTP-сервер. Шасси рассчитано на установку 8 модулей ввода/вывода. Коммуникационные порты: 2xRS-232/RS-485,1xRS-485,1xRS-232, USB 1.1,2x Ethernet 110/100 BaseT. Программирование контроллера осуществляется помощью пакета KW MULTIPROG.

В табл. 3.12 представлены характеристики некоторых других моделей контроллеров серии ADAM–5 000.

Таблица 3.12

Технические характеристики контроллеров серии ADAM–5 000.

Тип контроллера	Тип процессора	ОС	Объем памяти ОЗУ/ПЗУ	Интерфейсы	Сетевой протокол	ПО
ADAM-5510M	16-разрядный микропроцессо 80 188	ROM-DOS	640 Кбайт/ 1,5Мбайт	2xRS-232,1xRS-485, 1xRS-232/RS-485	Modbus/ RTU	Ultra Logik
ADAM-5511			256 Кбайт/ 512 кбайт	2xRS-232,1xRS-485	Modbus/ RTU	Ultra Logik, SCADA ADAM View
ADAM-5510/TCP			640 Кбайт/ 1,5 Мбайт	2xRS-232,1xRS-485, 1Xrs-232/RS-485, Ethernet 10/100 BaseT	Ethernet TCP/IP	Turbo C++

Новые модели ADAM–5 510/HC и ADAM–5 510/HCC со встроенной SCADA-системой Trace Mode поддерживают новые функции, в том числе возможность программирования в единой среде контроллера и операторской станции, функции автопостроения проекта, использование единой базы данных и др.

Также имеется возможность приема и передачи данных в формате SMS по GSM-каналу. Со встроенной системой Trace Mode ADAM–5 510 поддерживают до 128 точек ввода/вывода и до 32 FBD-программ.

Среди модулей ввода/вывода для контроллеров серии ABAM–5 000 отметим 8-ка-нальные модули аналогового ввода (ADAM–5 017 и ADAM–5 017H), 4-канальный модуль аналогового вывода ADAM–5 024, 8- и 16-канальные модули дискретного ввода и вывода, модули релейного вывода и др.

Максимальное число встроенных каналов ввода/вывода достигается при использовании контроллера ADAM–5 000/TCP, позволяющего установку 8 модулей на 125 каналов ввода/вывода. Контроллер имеет 32-разрядный RISC-процессор Strong ARM фирмы *Intel,* встроенные порты Ethernet 10/100 BaseT и RS–485. Использование протокола Ethernet Modbus/TCP позволяет интегрировать ADAM–5 000/TCP со SCADA-системой и другими пользовательскими приложениями.



Рис. 3.13

Промышленный компьютер серии MIC3000 (рис. 3.13) базируется на системной шине CompactPCI и имеет конструктивное исполнение по стандарту Евромеханика высотой 3U и 6U Исполнение 3U применяется в системах промышленной автоматизации, исполнение 6U – в телекоммуникационных системах. В табл. 3.13 приведены основные технические характеристики процессорных модулей MIC3000.

Таблица 3.13

Характеристики процессорных модулей M1C–3000

Тип модуля	Тип процессора	Объем ОЗУ	Интерфейс шины	Периферийные интерфейсы	Сетевой интерфейс
MIC–3316	Intel Celeron 650 МГц	До 384 Мбайт	PICMG 32 бит/33 МГц	4xRS–232/422/485, 1xUSB 1.1	Ethernet 10/100 BaseT
MIC–3318	Intel Pentium 4 1,2/1,7 ГГц	До 512 Мбайт	PICMG 32 бит/ 33 МГц	2 xRS–232/422/485, 2xUSB 2.0	2x Ethernet 10/100 BaseT
MIC–3351	Intel Pentium MMX 266 МГц	До 256 Мбайт	PICMG 32 бит/ 33 МГц	2 xRS–232,2xUSB 1.1, 1xFDD, 1xParallel	Ethernet 10/100 BaseT

Исполнение процессорных модулей — безвентиляторное. Также на платах установлены контроллер VGA (C&T 69000 с разрешением 1280x1024) и контроллер IDE (UDMA/33). Имеется возможность установки жесткого диска формата 2,5" и твердотельного накопителя CompactФлэш.

Для увеличения числа портов последовательной передачи (RS-232/422/485) предназначены 4-портовая плата MIC–3612 и 8-портовая плата MIC–3620.

В табл. 3.14 приведены характеристики модулей ввода/вывода MIC–3000.

Распределенный ввод/вывод поддерживает 3 сети: поддержка одной встроена в ЦПУ, поддержка двух других обеспечивается установкой специальных модулей сетевого интерфейса. Для обеспечения коммуникаций поставляются следующие модули: модули Mudbus и Modbus +, Ethernet TCP/IP, SY/MAX, MMS Ethernet; модули удаленного ввода/вывода; модули горячего резерва; модули управления перемещением, модули Lonworks, Profibus DP; модули шины ASi-Bus.

Таблица 3.14

Характеристики модулей ввода/вывода MIC–3000

Тип модуля	Число аналого-вых входов	Число аналоговых выходов	Число дискрет-ных входов	Число дискретных выходов	Частота опроса
MIC–3714	4x12 бит	–	–	–	30 МГц
MIC–3716	16x16 бит	2x16 бит	16 каналов ввода/вывода + 1 счетчик		250 кГц
MIC–3753	–	–	96 TTL-каналов ввода/вывода + 1 счетчик		1,6 МГц
MIC–3756	–	–	32 изолированных 24 *VDC*		40 кГц
MIC–3761	–	–	8 изолиро-ванных 24 *VDC*	4 реле типа A и 4 реле типа B	40 кГц

Программирование контроллера осуществляется в режиме onlin с использованием инструментальных систем ConCept и UnituPro. Пакеты ConCept и UnituPro устанавливаются под управлением MS Windows и позволяют использовать все пять специализированных языков по стандарту IEC 1131–3. Отличительной чертой пакетов является наличие программы, моделирующей контроллер со всеми его модулями (симулятор аппаратных средств). Это дает возможность выполнять большую часть работы по отладке приложения в автономном режиме без подключения к контроллеру. Оба пакета имеют большой набор библиотек стандартных функциональных блоков. Кроме того, имеется возможность создания пользователем нестандартных функциональных блоков на языке Си.

Таблица 3.15

Характеристики процессоров контроллера Modicon TSXQuantum

Характеристика	Процессор			
	140CPU 11302	140 CPU 11303	140 CPU 43412A	140 CPU 53414A
Процессор / тактовая частота	186 / 20 МГц	186 / 20 МГц	486 OX / 80 МГц	586 /133 МГц
Характеристика	Процессор			
	140CPU 11302	140 CPU 11303	140 CPU 43412A	140 CPU 53414A
Объем памяти Флэш / 5КАМ	256 Кбайт / 256 Кбайт	256 Кбайт / 512 Кбайт	1 Мбайт /2 Мбайт	1 Мбайт /4 Мбах-
Число регистров	9 999	9 999	57 К	57 К
Число бит	8 192	8 192	65 535	65 535
Макс. размер программы	109 Кбайт	368 Кбайт	896 Кбайт	2,5 Мбайт
Порт Modbus +	+	+	+	+
Порт Modbus	1	1	2	2
Кол-во дополнительных сетевых модулей	2	2	6	6

3.3.3. Контроллеры компании Siemens, Германия

К контроллерам компании *Siemens* относятся моноблочные контроллер Simatic S7–200, Simatic S7–300C и Simatic S7–620, модульные контроллеры Simatic S7–300/300F, SIPLUS S7–300, Simatic S7–400 (Simatic S7–400H/400F/400FH), PC-based котроллер Simatic WinAS (ПК).

Контроллер Simatic S7–200 (рис. 3.14) предназначен для решения задач управления и регулирования в небольших системах автоматизации. При этом Simatic S7–200 позволяют создавать как автономные системы управления, так и системы управления,

работающие в промышленных сетях. Область применения контролеров Simatic S7–200 простирается от простейших задач автоматизации (управление лифтами, подъемниками и пр.) до управления станками и конвейерными линиями. Программирование контроллеров осуществляется с помощью пакета STEP7 Micro\Win V3.2 для ОС Windows 95/98/NT/2000. Пакет включает языки программирования по стандарту IEC 61131–3 и языки высокого уровня С, С++.



Рис. 3.14



Рис. 3.15

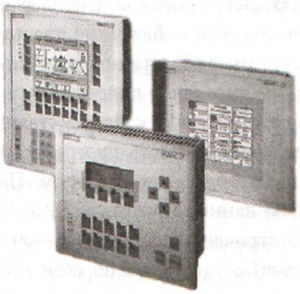


Рис. 3.16

Моноблочный контроллер Simatic S7–300 C объединяет в одном корпусе центральный процессор и встроенные аналоговые и дискретные входы/выходы для подключения датчиков и исполнительных механизмов. Контроллер имеет увеличенный объем памяти и более высокую скорость выполнения команд. В контроллерах Simatic S7–300 C использована новая концепция загрузки и сохранения данных с использованием новых микрокарт памяти, встроенный интерфейс Profibus-DP или PPI (Point-to-Point Interface). Встроенные функции контроллера поддерживают работу скоростных счетчиков, импульсных выходов, ПИД-регуляторов, измерителей частоты.

Модульный контроллер S7–300 (рис. 3.15) представляет собой универсальный программируемый контроллер для построения систем автоматизации низкой и средней производительности. Имеет широкий спектр модулей для максимальной адаптации к требованиям любой задачи. Высокая плотность монтажа

модулей ввода/вывода и возможность расширения системы до 32 модулей позволяют строить системы управления с большим числом каналов ввода/вывода. Программное обеспечение контроллеров реализуется с помощью пакета STEP7/ STEP7-Lite (IEC 1131–3) с языками программирования STL, LD и FBD.

Модульный контроллер Simatic S7–300F представляет собой программируемый контроллер для построения систем автоматики безопасности и противоаварийный защиты и базируется на функциональных возможностях программируемого контроллера Simatic S7–300. Контроллер используется в системах распределенного ввода/вывода на основе Profibus DP со станциями ET 200M с F-модулями, ET 200S PROFIsafe, ET 200pro PROFIsafe и ET 200eco PROFIsafe с использованием для обмена данными профиля PROFIsafe.

Контроллер SIPLUS S7–300 представляет собой универсальный контроллер для эксплуатации в тяжелых промышленных условиях, базирующийся на функциональных возможностях контроллеров Simatic S7–300. Имеет расширенный диапазон рабочих температур (-25 ... +60 °C), более высокую стойкость к вибрационным и ударным нагузкам, работает в средах, содержащих агрессивные примеси и газы.

Контроллер Simatic C7–620 (рис. 3.16) представляет собой устройство, сочетающее в одном корпусе программируемый контроллер и панель визуализации и управления с ЖК-дисплеем. Блоки управления Simatic S7 полностью совместимы с программируемыми контроллерами Simatic S7–300. Помимо панели управления в состав контроллера входят модули аналогового и дискретного ввода/вывода. Возможно расширение числа входов/выходов с помощью модулей контроллера Simatic S7–300. Число дополнительных модулей — 24, по 8 модулей на трех носителях. Встроенный контроллер имеет высокое быстродействие (время выполнения логической команды не превышает 0,1...0.3 мкс), что существенно расширяет допустимые области применения систем автоматизации на базе контроллеров Simatic C7. Контроллер поддерживает математические операции с плавающей запятой и функции связи с устройствами человеко-машинного интерфейса. Это исключает необходимость программирова-

ния функций обмена данными между панелью оператора и контроллером. Панель оператора и контроллер используют единую базу данных проекта STEP 7. Контроллер Simatic C7–620 обменивается данными с контроллерами S7–300, S7–400 и др. устройствами по интерфейсу MPI (MultiPointInterface), а также по сети Profibus DP. Поддерживаются также диагностические функции и парольная защита контроллера.

Встроенная панель оператора осуществляет управление выводом и обработкой сообщений об ошибках и текущих значениях параметров и вывод изображений (Simatic C7 с графической панелью оператора), а также текстовых сообщений. Имеется 6 модификаций контроллера C7–620. Программирование осуществляется с помощью программных пакетов S7–SCL, S7–Graph, S7–HiGraph, а также программного обеспечения RunTime. Программирование панелей оператора осуществляется с помощью пакетов ProTool и ProTool/Pro, работающих под ОС Windows NT/2000. Для конфигурирования системы автоматизации и встроенного контроллера применяется STEP 7 или STEP 7 Lite.

Модульный контроллер Simatic S7–400 (рис. 3.17) предназначен для построения систем автоматизации средней и высокой степени сложности. Контроллер отличается высоким быстродействием, возможностью применения структур локального и распределенного ввода/вывода, широкими коммуникационными возможностями, функциональностью, удобством эксплуатации и обслуживания. Эффективному применению контроллеров способствует возможность использования нескольких типов центральных процессоров различной производительности, наличие широкой гаммы модулей ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров. Simatic S7–400 отвечает самым жестким требованиям промышленных стандартов, обладает высокой степенью электромагнитной совместимости, высокой стойкостью к ударным и вибрационным нагрузкам. Установка и замена модулей контроллера может производиться без отключения питания *(«горячая замена»)*. Контроллер может комплектоваться широким спектром модулей, устанавливаемых в монтажных стойках в любом порядке. Процессорные модули оснащены встроенными интер-

фейсами Profibus DP. При необходимости в базовом блоке контроллера может быть использовано до 4-х центральных процессоров. К числу модулей относятся модули ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов, коммуникационные модули для организации последовательной передачи данных по PP-интерфейсу, функциональные модули для решения специальных задач управления (счет, позиционирование, автоматическое регулирование и т. д.), интерфейсные модули для связи базового блока контроллера со стойками расширения. К одному базовому блоку контроллера Simatic S7–400 может подключаться до 21 стойки расширения. Модули устанавливаются в свободные разъемы монтажных стоек в произвольном порядке и фиксируются в рабочих положениях винтами.

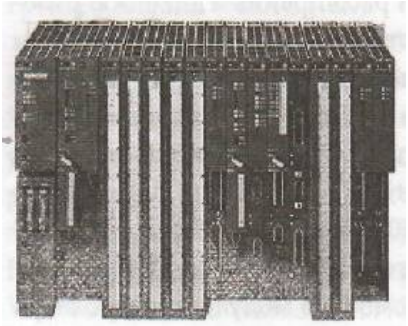


Рис. 3.17

Фиксированные места занимают только блоки питания, центральный процессор и некоторые интерфейсные модули.

В качестве программного обеспечения контроллеров используется программный язык STEP7. Основными областями применения Simatic S7–400 являются технологически установки, машиностроение, химическая промышленность и др.

Контроллер Simatic S7–400H применяется в областях, предъявляющих повышенные требования к надежности функционирования системы управления. Контролер имеет резервированную структуру – резервирование основных функций и конфигурациях систем ввода/вывода, резервирование сетей Profibus DP-контроллера, горячее резервирование модулей и автоматическое

безударное переключение на резервный блок в случае отказа ведущего блока. Для гарантированного безударного включения резерва между базовыми блоками контроллера необходима надежная скоростная связь. Эта связь поддерживается по оптоволоконным кабелям, соединяющим два центральных процессора. В этих целях оба базовых блока контроллера выполняют одну и ту же программу, работают с одними и те ми же блоками данных, с одними и теми же внутренними данными (битами памяти, таймерами, счетчиками и т. д.). При отсутствии ошибок и отказов оба базовых блока находятся в активном стоянии. Сигнал от каждого датчика (или двух резервированных датчиков) поступает на входы резервированной пары модулей ввода, считывается в оба базовых шока и проверяется на идентичность, после чего используется программой. Каждое формируемое программой управляющее воздействие выводится на исполнительное устройство через выходы двух модулей вывода. При отказе одного из двух резервированных модулей программа контроллера выполняет его идентификацию и прекращает обращение к этому модулю, продолжая работать с исправным модулем. После ремонта или замены неисправного модуля и его установки в систему программа возобновляет обращение к обоим модулям.

Безударное переключение может быть обеспечено только при синхронной работе двух базовых блоков контроллера. Функции синхронизации выполняются автоматически операционной системой контроллера и не требуют программирования со стороны пользователя. Этим обеспечивается возможность быстрого перевода функций управления на любой базовый блок контроллера в любой момент времени. Контроллер Simatic S7–400H способен поддерживать обмен данными с другими контроллерами S7–400H, стандартными системами автоматизации S7–400 и компьютерами. Для организации обмена данными с компьютерами через резервированные каналы связи дополнительно необходим пакет программ S7–REDCONNECT. В зависимости от круга решаемых задач для организации обмена данными могут использоваться различные сетевые конфигурации: резервированная или не резервированная магистральная структура и кольцевая топо-

логия с одиночным или дублированным кольцом. Программирование контроллеров 87–400H не отличается от программирования стандартных моделей S7–400. Для этого могут быть использованы все функции пакета STEP 7 от V5.0 или выше. Конфигурирование резервированных систем ввода/вывода контроллера S7–400H выполняется с помощью опционального пакета S7H, интегрируемого в STEP 7.

Контроллер S7–400P/FH предназначен для построения систем противоаварийной защиты (ПАЗ). Базируется на использовании компонентов S7-400H и станций распределенного ввода/вывода ET 200M с модулями систем безопасного управления (F-модулями), станций ET 200S PROFISafe и ET 200eco PROFISafe. Контроллер обеспечивает одновременную поддержку функций противоаварийной автоматики и функций стандартного управления.

PC-based контроллер Simatic WinAC (промышленный компьютер) поддерживает связь с процессом через систему распределенного ввода/вывода на основе Profibus-DP. С этой целью WinAC Slot PLC оснащен встроенным интерфейсом Profibus-DP. Системы WinAC Software PLC подключаются к сети Profibus через коммуникационные процессоры. Для решения технологических задач Simatic WinAC использует программное обеспечение RunTime спектра Simatic, включающее программное обеспечение (например, Standard PID Control, Easy Motion Control и т. д.) с библиотеками и стандартными функциональными блоками, интегрируемыми в программы Simatic WinAC. К этим модулям относятся функциональные и технологические модули, устанавливаемые в станции распределенного ввода/вывода Simatic ET 200 и подключаемые к Simatic WinAC через сеть Profibus-DP. Simatic WinAC, пакет программирования STEP 7 и программное обеспечение визуализации могут устанавливаться на одном компьютере или связываться между собой через сети MPI, Profibus-DP или Ethernet.

В соответствии с концепцией Totally Integrated Automation для подавляющего большинства приборов оперативного управления и мониторинга семейства Simatic HMI, а также систем Si-

matic ProTool/Pro и Simatic WinAC обеспечивается полный доступ к данным и функциям Simatic WinAC. Для организации обмена данными с системами визуализации других производителей Simatic WinAC снабжен OPC-сервером. Интегрированный в Simatic WinAC OPC сервер с Data Access Interface 2.0 (интерфейс доступа к данным) обеспечивает открытый доступ к данным WinAC со стороны приложений, выполняющих функции OPC клиентов. Программирование и конфигурирование систем автоматизации WinAC выполняется с помощью STEP 7, а также инструментальных средств проектирования Simatic, что позволяет использовать для программирования Simatic WinAC все языки программирования, отвечающие требованиям международного стандарта IEC 61131–3. Simatic WinAC работает на стандартном PC под управлением Windows 2000 или Windows XP Professional, программно совместим Simatic S7 и оптимизирован для задач сбора и обработки данных, визуализации и управления.

3.3.4. Контроллеры SMART2 компании PEP Modular Compiters GmbH, Германия

Контроллер SMART2 (рис. 3.18) продолжает развитие концепции SMART2 I/O и базируется на технологии открытой шины VME. Может использоваться в жестких условиях промышленного производства. Контроллер используется для создания небольших систем примерно до 100 каналов ввода/вывода. Однако интерфейс локальной сети Profibus позволяет создавать распределенные системы, объединяющие контроллеры различной мощности других производителей, интеллектуальные датчики и исполнительные устройства с интерфейсом Profibus. Все блоки и модули контроллера устанавливаются на стандартном DIN-рельсе.

Предшествующая модель – контроллер SMART2 I/O, программно совместим с системами VME9000 и IUC9000. В качестве операционной системы используется многозадачная многопользовательская ОС реального времени OS–9. В качестве средств программирования используются ассемблер, компилятор Ultra-C (стандарт ANSI-C, C++).

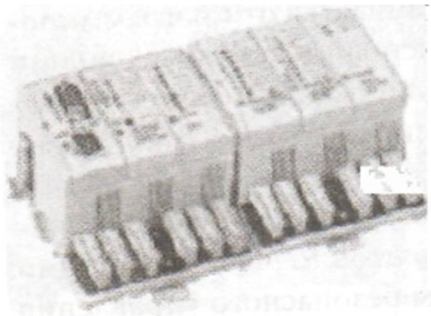


Рис. 3.18

Таблица 3.16

Характеристики модулей CPU 88–5

Тип модели	CPU 88–5LC	CPU 88–5BS	CPU 188–5MX
SRAM	512 Кбайт	1024 Кбайт	
Флэш	1024 кбайт		
COM1	К.5–232 (неизолированный)		
COM2	R5–232 (неизолированный); RS–422/485 (изолированный), скорость обмена 200/2500 кбит/с		
AI/AO	–	–	8/2 (изолированный)
Габаритные размеры, мм	124,5x114,3		

Выбор платы на примере выбора платы АЦП осуществляется в следующей последовательности: выбор частоты дискретизации (кГц, МГц); выбор разрядности АЦП числа каналов, диапазона входного сигнала (в вольтах); наличие на плате ЦАП и его разрядность, число каналов ввода/вывода; коэффициент усиления и необходимый интерфейс платы.

Контрольные вопросы:

1. По каким признакам могут быть классифицированы контроллеры?

2. Отличие моноблочного контроллера от блочного.
3. Дайте общую характеристику контроллеров семейства ADAM.
4. Какие типы контроллеров выпускает компания Siemens?
5. Какое программное обеспечение используется в контроллерах фирмы Siemens?
6. Какая SKADA-система разработана фирмой Siemens?

3.4. Функциональные схемы систем измерения и автоматизации

Схемы автоматизации являются основным техническим документом, определяющим структуру и уровень автоматизации технологического процесса проектируемого объекта; оснащение его приборами и средствами автоматизации, в том числе средствами ВТ и микроконтроллерами; организацию пунктов контроля и управления.

В процессе разработки схем автоматизации осуществляется выбор методов измерения технологических параметров; основных технических средств автоматизации, наиболее полно отвечающих предъявленным требованиям и условиям работы автоматизируемого объекта; приводов исполнительных механизмов регулирующих и запорных органов технологического оборудования управляемого автоматически или дистанционно; а также определяются места размещения средств автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании, трубопроводах и т. п. и способы представления информации о состоянии технологического процесса и оборудования.

Схема автоматизации выполняется в виде чертежа, как правило, на листах формата А1, на котором схематически условными изображениями показывают технологическое оборудование, коммуникации, органы управления и средства автоматизации, а также связей между отдельными функциональными блоками и элементами автоматики; изображают средства автоматизации и аппаратуру всех систем контроля, регулирования, управления и сигнализации.

Вспомогательные устройства, такие как редуктора и фильтры для воздуха, реле, источники питания, автоматические выключатели и другие устройства и монтажные элементы, на схемах автоматизации не показывают.

Схемы автоматизации должны быть выполнены с условным изображением щитов и пультов управления в виде прямоугольников, как правило, в нижней части чертежа, в которых показываются устанавливаемые на них средства автоматизации.

Приборы и средства автоматизации при выполнении схем автоматизации могут быть изображены развернуто: отборные устройства, первичные преобразователи, вторичные приборы, исполнительные механизмы, регулирующие и запорные органы, аппаратура управления и сигнализации, комплектные устройства (средства телемеханики, управляющие вычислительные комплексы, микроконтроллеры) и т. д.

Приборы и средства автоматизации, встраиваемые в технологическое оборудование и коммуникации или механически связанные с ними, изображают на чертеже в непосредственной близости от них. Для первичных преобразователей и приборов, указывающих положение регулирующих органов, исполнительных механизмов и т. п., необходимо показывать механическую связь,

Прямоугольники щитов и пультов следует располагать в такой последовательности, чтобы при размещении в них обозначений приборов и средств автоматизации обеспечивалась наибольшая простота и ясность связи, а также минимум пересечений линий связей. В каждом прямоугольнике с левой стороны указывают его наименование.

Приборы и средства автоматизации, которые расположены вне щитов и не связаны непосредственно с технологическим оборудованием и трубопроводами, условно показывают в прямоугольнике «Приборы местные» или «Приборы по месту».

Для облегчения понимания сущности автоматизированного объекта, возможности выбора диапазонов измерение и шкал приборов, установок регуляторов на схемах автоматизации указывают предельные рабочие значения измеряемых и регулируемых технологических параметров при установившихся режимах работы. Эти значения в международной системе единиц указывают на линиях связи над прямоугольником «Приборы, местные», а

длина линий связи над прямоугольником «Приборы местные» додана быть не менее 50 мм,

Пояснительный текст располагают над таблицей условных обозначений или в другом месте.

Над основной надписью должно быть оставлено свободное пространство размером 25 мм Х 185 мм.

Контуры технологического оборудования, трубопроводные коммуникации, прямоугольники изображающие щиты и/пульты на схемах автоматизации, рекомендуется выполнять линиями толщиной 0,6–1,5 мм: приборы и средства автоматизации – 0,5–0,6 мм; линии связи – 0,2–0,3 мм.

Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на схемах автоматизации, присваиваются позиционные обозначения (позиции), которые, состоят из двух частей: обозначение арабскими цифрами номера функциональной группы и строчными буквами русского алфавита номеров приборов и средств автоматизации в данной функциональной группе.

Буквенные обозначения присваиваются каждому элементу функциональной группы в порядке алфавита в зависимости от последовательности прохождения сигнала: от устройства получения информации к устройствам воздействия на управляемый процесс.

Позиционные обозначения в схемах автоматизации проставляют внутри условного графического обозначения прибора – в нижнем полукруге или рядом с условным графическим обозначением, по возможности с правой стороны или над ним.

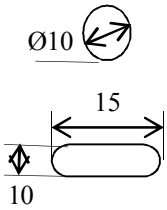
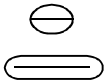
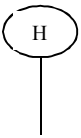
3.4.1. Условные обозначения приборов и средств автоматизации в схемах

Условные обозначения приборов и средств автоматизации должны быть выполнены по ГОСТ21.404–85 «СПДС. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах»

В основу условных обозначений по ГОСТ 21.404–85 положены буквенные обозначения в сочетании с простыми условными графическими обозначениями (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Графические условные обозначения приборов и средств автоматизации по ГОСТ 21.404–85

Наименование	Обозначение
1. Первичный измерительный преобразователь (датчик): прибор, устанавливаемый вне щита (по месту) на технологическом трубопроводе, аппарате, стене, полу, колонне, металлоконструкции: а) базовое обозначение; б) дополнительное обозначение	
2. Прибор, устанавливаемый на щите, пульте: а) базовое обозначение; б) дополнительное обозначение	
3. Исполнительный механизм. Общее обозначение. Положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала не показывается	
4. Исполнительный механизм, который при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала: а) открывает регулирующий орган; б) закрывает регулирующий орган; в) оставляет регулирующий орган в неизменном положении	
5. Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом (обозначение может применяться в сочетании с любым из дополнительных знаков, характеризующих положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала)	

Продолжение табл. 3.17

6. Регулирующий орган	——
7. Отборное устройство без постоянного включенного прибора (служит для эпизодического подключения приборов во время наладки, снятия характеристик и т. п.)	——

Для всех измерительных преобразователей (датчиков), а также приборов, устанавливаемых по месту (на технологическом трубопроводе, аппарате, стене, полу, колонне, металлоконструкции), принято единое графическое обозначение в виде окружности или овала в зависимости от объема вписываемых буквенных обозначений. То же обозначение, но разделенное горизонтальной чертой на две половины, соответствует приборам, устанавливаемым на щите или пульте. Поскольку для отборных устройств постоянно подключенных приборов специальное обозначение отсутствует, предусмотрено специальное графическое условное обозначение отборного устройства без постоянно подключенного прибора, которое служит для эпизодического подключения приборов во время наладки, контрольного снятия характеристик и других поверочных работ. Такие отборные устройства обозначают в виде полукруга, к которому подведена линия связи. Этот прием, не меняя основного принципа построенная условных обозначений приборов и средств автоматизации, обеспечивает возможность быстрого нахождения на схеме нужных отборов в период наладки и других контрольных операций.

В отличие от обозначения приборов все без исключения исполнительные механизмы изображают квадратиком или кружком с отрезком линии связи. Небольшой размер объясняется тем, что в него не требуется вписывать буквенное обозначение. Для показа положения регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала на отрезке линии связи, входящем в условное обозначение исполнительного механизма, наносят стрелку либо поперечную черточку. Дополнительный ручной привод исполнительного механизма изображают либо в виде Т-образного символа на боковой стороне квадратика, либо буквой *Н,* вписанной в окружность. Собственно регулирующий орган изображают аналогично трубопроводной арматуре.

Для получения полного обозначения прибора или средства автоматизации в его графическое условное обозначение в виде круга или овала вписывают буквенное условное обозначение, которое и определяет назначение, выполняемые функции и характеристики работы.

Все буквенные обозначения построены на буквах латинского алфавита. Условные обозначения строят на основании общего принципа построения буквенных обозначений, когда место расположения буквы определяет ее значение. Поэтому вся необходимая информация о приборе или средстве автоматизации уложилась в объем латинского алфавита и математических знаков. В табл. 3.18 приведены основные значения первой буквы в условном обозначении. Из таблицы видно, что в ней отсутствуют буквы *A, B, C, I, N, O, Y,* которые являются резервными и могут быть использованы в необходимых случаях для ввода в обозначение информации, не предусмотренной ГОСТ. Буква *X* не рекомендуется к применению. Стандарт не допускает применения одной и той же резервной буквы в одной и той же документации для обозначения разных величин, понятий и т. п.

Таблица 3.18

Основные условные буквенные обозначения измеряемых величин

Обозначения	Основное значение первой буквы, обозначающее измеряемую величину	Обозначения	Основное значение первой буквы, обозначающее измеряемую величину
D	Плотность	P	Давление, вакуум
E	Любая электрическая величина	Q	Величина, характеризующая качество: состав, концентрацию и т. п.
F	Расход	R	Радиоактивность
G	Размер, положение, перемещение	S	Скорость, частота
H	Ручное воздействие	T	Температура
K	Время, временная программа	U	Несколько разнородных измеряемых величин
L	Уровень	V	Вязкость
M	Влажность	W	Масса

Для обозначения функций, выполняемых прибором, служат семь букв, приведенных в табл. 3.19.

Таблица 3.19

Обозначение	Отображение информации	Обозначение	Формирование выходного сигнала	Обозначение	Дополнительное значение
A	Сигнализация	C	Регулирование	H	Верхний предел измеряемой величины
I	Показание	S	Включение, отключение, переключение	L	Нижний предел измеряемой величины
R	Регистрация	–	–	–	–

Функция, выполняемая прибором, может быть обозначена буквами *E, G, V,* являющимися резервными среди букв, обозначающих функцию. Для обозначения формирования выходного сигнала предусмотрено пять резервных букв: *K, O, T, Y, Z.*

Функциональные признаки приборов и средств автоматизации обозначают четырьмя основными буквами (табл. 3.20).

Таблица 3.20

Дополнительные буквенные обозначения функциональных признаков приборов

Обозначение	Функциональный признак
E	Чувствительный элемент
T	Дистанционная передача
K	Станция управления
Y	Преобразования, вычислительные функции

Буква *E* применяется для обозначения чувствительных элементов, т. е. устройств, выполняющих первичное преобразование, например приемных (сужающих) устройств расходомеров, преобразователей термоэлектрических (термопар), термопреобразователей сопротивления (термометров сопротивления), датчиков расходомеров, уровнемеров и т. п.

Буквой *T* обозначают промежуточное преобразование с дистанционной передачей сигнала. Ее применяют обычно для обозначения приборов с дистанционной передачей показаний, например бесшкальных манометров, дифманометров, манометрических термометров и т. п.

Буквой *K* обозначают станции управления, входящие в состав приборов.

Для построений обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств применяют букву Y.

Для уточнения измеряемого параметра предусмотрено четыре дополнительных буквенных обозначения, приведенных в табл. 3.21, причем три из них *D, F* и *Q* – разрешается записывать строчными буквами: *d f q* .

Таблица 3.21

Дополнительные буквенные обозначения, уточняющие измеряемый параметр

Обозначение	Дополнительное значение первой буквы
D(d)	Разность
F(f)	Соотношение, доля, дробь
I	Автоматическое переключение, обегание
Q(q)	Интегрирование, суммирование по времени

В табл. 3.22 показаны дополнительные буквенные обозначения, определяющие характеристики работы приборов и средств автоматизации. Эти обозначения построены с применением букв латинского алфавита и математических знаков. Необходимо отметить особенности отдельных буквенных обозначений.

Таблица 3.22

Дополнительные буквенные обозначения характеристик работы прибора

Обозначение	Характеристика
	Энергия сигнала:
E	Электрическая
P	Пневматическая
G	Гидравлическая
	Формы сигнала:
A	Аналоговая
D	Дискретная
	Операция, выполняемая вычислительным устройством:
Σ	Суммирование
K	Умножение сигнала на постоянный коэффициент *K*
X	Перемножение двух или более сигналов друг на друга
:	Деление сигналов друг на друга
f^n	Возведение величины сигнала в степень
$\sqrt[n]{}$	Извлечение из величины сигнала корня степени *n*
lg	Логарифмирование
dx/dt	Дифференцирование
$\int$	Интегрирование
X(-1)	Изменение знака сигнала
max	Ограничение верхнего значения сигнала
min	Ограничение нижнего значения сигнала

Сигнализацию обозначают, как в табл. 3.22, буквой *A*. Это обозначение применяют независимо от того, вынесена сигнальная аппаратура (арматура) на какой-либо щит или встроена в сам прибор.

Предельные значения измеряемых величин конкретизируют буквами *H* и *L* (верхний и нижний уровни).

Контактное устройство прибора, выполняющее коммутационные операции (включение, отключение, блокировку и т. п.), обозначают буквой S.

Если контактное устройство, наряду с коммутационными, выполняет и сигнальные функции, то в этом случае для его обозначения используют буквы *S* и *A*. В то же время для обозначения

функции регулирования букву *S* в обозначение прибора или средства автоматизации не вводят.

Зная, какую информацию могут передать буквы, рассмотрим принцип построения всех буквенных обозначений.

Основное буквенное обозначение вписывают в верхнее поле условного графического обозначения прибора (окружности, овала). В поле под чертой указывают позиционное обозначение данного прибора в конкретной схеме измерения, регулирования, сигнализации управления. Принята следующая очередность записи информации в буквенном условном обозначении.

Сначала записывают обозначение основной измеряемой величины и ее уточнение, если это требуется. Затем указывают функциональные признаки, прибора, которые, если их несколько у прибора, также записывают в строго определенной последовательности: показание *I*; регистрация *R*; регулирование, управление *C*; включение, отключение, переключение *S;* сигнализация *A*. Следует помнить, что в условное обозначение прибора вносят буквенные символы только тех его функциональных признаков, которые используют в данной конкретной схеме. Например, если у показывающего и самопишущего манометров в данной схеме используется только показание, его обозначают *PI,* а не *PIR.* Если электронный бесшкальный блок сигнализатора уровня снабжен контактным устройством и встроенными сигнальными лампами, то в зависимости от функций, предусмотренных конкретной схемой, условное обозначение прибора будет различным.

Так, если прибор применен только для включения (отключения) оборудования, то его обозначают *LS;* для сигнализации (местной, дистанционной) – *LA:* для включения (отключения) и сигнализации – *LSA;* для регулирования уровня – *LC.*

В ряде случаев необходимо в условном обозначении прибора передать объем информации больший, чем закодирован в буквенном обозначении, вписанном в графическое обозначение. В этих случаях дополнительную информацию записывают справа от графического обозначения (окружности, овала). Например, для конкретизации измеряемой величины справа от условного графического обозначения прибора указывают *«напряжение»*, *«сила тока»,* pH, O_2; вид радиоактивности; *α-, β-* или *γ*-из-

лучение. Когда буквой *U* обозначают несколько разнородных величин, измеряемых прибором, справа от обозначения приводят расшифровку измеряемых величин.

При уточнении значения измеряемого параметра буквы *D, F* и *Q* могут быть записаны строчными *d, f, q*.

При изображении условного обозначения комплекта средств автоматизации, состоящего из нескольких единичных обозначений, связанных с друг другом, необходимо помнить, что во всех единичных обозначениях устройств, входящих в комплект, первая буква обозначения указывает измеряемый параметр (температуру, давление, уровень и т. п.). Исключение составляют устройства ручного управления, входящие в комплект. В их обозначении шифр измеряемого параметра не вводят.

Например, в комплекте для измерения и регулирования температуры первичный измерительный преобразователь будет обозначен буквами *TE* (чувствительный элемент измерения температуры); вторичный регистрирующий прибор *TR* (самопишущий прибор измерения температуры); регулирующий блок – *TC* (регулятор температуры) и т. п.

В условных обозначениях всех устройств, выполненных в виде отдельных блоков, рассчитанных на ручное управление, всегда первой записывают букву *H* (ручное воздействие), например в обозначении переключателей электрических цепей измерения, управления; переключателей газовых или воздушных линий; байпасных панелей дистанционного управления; кнопок, ключей управления, задатчиков и т. п.

Следует помнить еще одну особенность построения условных, буквенных обозначений. В комплекте, предназначенном для измерений нескольких разнородных величин, первичные измерительные преобразователи (датчики) обозначают буквой, обозначающей измеряемый данным датчиком параметр.

Иначе производится обозначение на схеме постоянно подключенного отборного устройства, для которого специального графического обозначения нет. Местом установки отборного устройства является точка пересечения линии связи с обозначением технологического трубопровода или аппарата. Второй

конец линии связи в этом случае сопрягается с обозначением первичного измерительного преобразователя или прибора.

На рис. 3.19, *а* показано обозначение установки преобразователя термоэлектрического (термопары) на технологическом трубопроводе, а на рис. 3.19, *б* – показывающего манометра. Первичный измерительный преобразователь измерения расхода (например, диафрагма) устанавливается, как известно, в рассечку технологического трубопровода, что показывается в условном обозначении (рис. 3. 19, *в*).

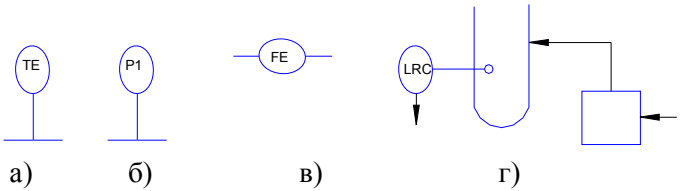


Рис. 3.19. Первичные измерительные преобразователи

Существует прием, с помощью которого можно указать точное место расположения отборного устройства или точки измерения. Для этого линию связи от первичного измерительного преобразователя или прибора вводят внутрь контура технологического аппарата, а на ее конце изображают окружность, как показано на рис. 3.19, *г*. Подвод линии связи к условному обозначению прибора или средства автоматизации изображают в любой точке окружности (сверху, снизу, сбоку). Когда важно знать направление потока среды или передачи сигнала, на изображении линии связи наносят стрелку.

Щиты и пульты систем автоматизации технологических процессов изображают на схемах в виде прямоугольников, размеры которых определяются местом, необходимым для изображения в них условных графических обозначений приборов и средств автоматизации, устанавливаемых на них.

Комплектные устройства, например программируемые микропроцессорные контроллеры, обозначают так же, как и щиты, прямоугольниками произвольных размеров.

Внутри прямоугольника указывают тип комплектного устройства в соответствии с документации завода-изготовителя.

Рассмотрим примеры условных обозначений наиболее часто встречающихся приборов и средств автоматизации, устанавливаемых по месту и на щитах.

На рис. 3.20 приведены условные обозначения приборов для измерения и регулирования температуры. О том, что на рис. 3.20, *а* изображен первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту, например термоэлектрический преобразователь (термопара), термопреобразователь сопротивления (термометр сопротивления), термобаллон манометрического термометра и т. п., указывает: во-первых, окружность без горизонтальной линии, внутри первичный измерительный преобразователь или прибор, установленный по месту, согласно табл. 3.20; во-вторых, первая буква *T,* обозначающая, что измеряемый параметр – температура, и вторая буква *E,* обозначающая, что это чувствительный элемент. Таким образом, это условное обозначение передает необходимый объем информации в общем виде.



а) *б)* *в* *г)* *д)*

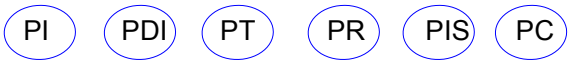
Рис. 3.20. Приборы для измерения и регулирования температуры

Буква *I* в обозначении прибора для измерения температуры (рис. 3.20, *б*) говорит о том, что изображен показывающий прибор. Обозначения приборов, приведенных на рис. 3.20, *в*, расшифровывается так: оба прибора установлены на щите (горизонтальная черта внутри окружности), оба регистрируют *R* температуру *T,* а второй прибор еще и регулирует *C*.

Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту, изображен на рис. 3.20, *г* слева. Вторая буква С обозначает, что это регулятор.

Правое обозначение свидетельствует, что это измерительный комплект температуры *T,* регистрирующий *R*, регулирующий С, со станцией управления *К.* Температурное реле изображено на рис. 3.20, *д*: *Т* – температура; S – контактное устройство (включение, отключение, переключение).

На рис. 3.21, *а* даны приборы для измерения давления *(Р),* установленные по месту (соответственно): показывающий *(I)* – манометр, дифманометр, тягомер, напоромер, вакуумметр и др.; показывающий перепад *(D)* – дифманометр; бесшкальный (отсутствие буквы *I*), с дистанционной передачей *(Т)* – манометр, дифманометр с электрощитом пневмопередачи.



а) *б)* *в)*

Рис. 3.21. Приборы для измерения давления

Из рис. 3.21, *б* видно, что для обозначения прибора, регистрирующего давление, в верхнюю часть круга вписаны буквы *Р* и *R.* Примером этого вида приборов может быть любой вторичный прибор, регистрирующий давление.

На рис. 3.21, *в* даны обозначения электроконтактного манометра (вакуум-метра) и регулятора: *Р* – давление; I – показание; S – контактное устройство; *С* – регулирование.

Окружность без горизонтальной черты (рис. 3.22, *а*) указывает на то, что это первичный измерительный преобразователь или прибор, установленный по месту. Буквы *F* и *Е* обозначают соответственно расход и чувствительный элемент, буква *Е,* что это не прибор, а измерительный преобразователь. Следовательно, это обозначение может принадлежать диафрагме, соплу, трубе Вентури, датчику индукционного расходомера и т. п.

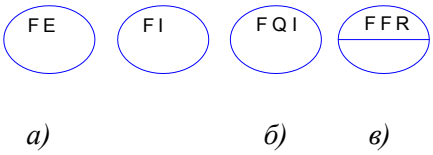


Рис. 3.22. Приборы для измерения расхода

Из обозначения на рис. 3.22, *б* видно, что это установленные по месту приборы измерения расхода *(F)* показывающие *(I),* а второй прибор еще и интегрирующий (*Q*).

На рис. 3.22, *в* показано обозначение прибора для измерения соотношения (вторая буква *F*) расходов (первая буква *F*), регистрирующего (*R*), установленного на пульте (горизонтальная линия в окружности). Это может быть, например, вторичный самопишущий прибор соотношения расходов.

На рис. 3.23, *а* приведено обозначение первичного измерительного преобразователя (чувствительного элемента) *(E)* для измерения уровня *(L)* установленного по месту. Им может быть, к примеру, датчик электрический емкостный или ультракоротковолновый уровнемер.

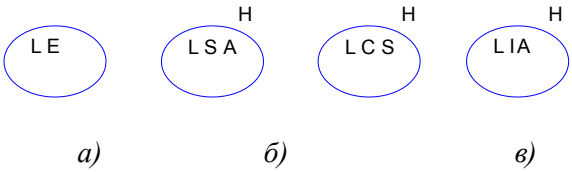


Рис. 3.23. Приборы для измерения уровня

Когда в дополнение к основному буквенному обозначению, вписанному в окружность, необходима информация, например, о предельных значениях параметра, конкретной измеряемой величине и т. п. Такую информацию записывают рядом с окружностью – символом прибора – справа от нее.

На рис. 3.23, *б* показаны обозначения приборов для измерения уровня с контактным устройством, включенным либо в схему сигнализации *(SA)* – реле уровня, либо в схему регулятора – сигнализатора уровня с контактным устройством (*CS*), установленным по месту. Буква *H* вне обозначения, справа вверху, показывает, что приборы должны быть отрегулированы на срабатывание по верхнему уровню.

Сравним обозначения на рис. 3.23, *б* и *в*. Если на рис. 3.23, *б* дано обозначение прибора, установленного по месту, например, реле уровня, то на рис. 3.23, *в* – обозначение вторичного прибора, показывающего и сигнализирующего предельные (*H, L)* значения уровня, поэтому сочетание букв *I* и *A* на рис. 3.23, *в* означает показание и сигнализацию, а S и *A* на рис. 3.23, *б* – контактное устройство, работающее в схеме сигнализации.

На рис. 3.24 приведены обозначения большой группы приборов технологического контроля и Ц правления. Первая буква *D* (плотность) в сочетании со второй буквой *T* (дистанционная передача) обозначает, что это датчик плотномера с электро- и пневмопередачей (буква *E* или *P),* т. е. прибор для измерения плотности раствора бесшкальный (отсутствие буквы *I) с* дистанционной передачей, установленный по месту (рис. 3.24, *а*).

Обозначение прибора, измеряющего размеры (*G*), показывающего, например прибора, измеряющего толщину медной ленты, установленного по месту, изображено на рис. 3.24, *б*.

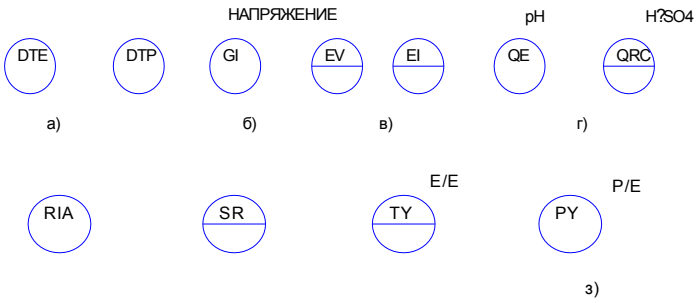


Рис. 3.24. Приборы для измерения различных параметров

Существует большая группа приборов для измерения различных электрических величин (буква *Е),* например вольтметры, ваттметры, частотомеры и др. Обозначение любого из таких приборов приведено на рис. 3.24, *б*, *в* слева. Справа это же обозначение дано с поясняющей надписью *«напряжение»,* показывающей, какую из электрических величин измеряет прибор.

Из табл. 3.24 видно, что буква *Q* – величина, характеризующая качество: состав, концентрацию и т. п. Значит, на рисунке 6,г изображены приборы измерения качества продукта. Буква *Е* в первом обозначении показывает, что это чувствительный элемент, а буквы R и *С* во втором, что прибор регистрирующий и регулирующий. Знаки вне изображения конкретизируют, что именно измеряет этот прибор. Таким образом, в первом случае это может быть датчик pH-метра, а во-втором – вторичный самопишущий прибор регулятора концентрации серной кислоты в растворе.

На рис. 3.24, *д* приведено обозначение прибора для показания *(I)* и сигнализации (A) радиоактивности *(R),* в частности предельно допустимых (верхний предел) значений α- и β-лучей.

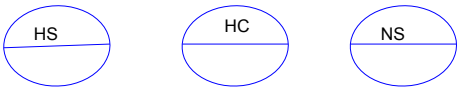
Обозначение вторичного прибора тахогенератора – прибора для измерения и регистрации (R) скорости (первая буква S) привода, установленного на щите, показано на рис. 3.24, *е*. Следует обратить внимание на то, какое важное значение имеет не только сама буква, но и ее место в обозначении. Во всех предыдущих случаях буква 5, занимая второе или третье место, показывает наличие у прибора контактного устройства. В рассматриваемом случае, занимая первое место, буква S обозначает скорость.

Обозначение любого преобразователя (вторая буква Y*)* сигнала приведено на рис. 3.24, *ж*, где показан преобразователь термо-ЭДС термоэлектрического преобразователя (первая буква *Т).*

Чтобы знать вид входного и выходного сигналов, рядом с обозначением записывают соответствующие буквы, например, *Е/Е*. Это значит, входной и выходной сигналы в данном случае электрические.

На рис. 3.24, *з* показано обозначение преобразователя (вторая буква Y*)* пневматического сигнала в электрический (буквы *P/E* обозначения преобразователя) от датчика давления (первая буква *P)*.

Существует ряд средств автоматизации, которые, как правило, имеются почти во всех схемах автоматизации технологических процессов. Обозначения наиболее типичных из них показаны на рис. 3.25. На рис. 3.25, *а* показано обозначение коммутирующего устройства управления. Из его графического изображения следует, что это устройство на щите (горизонтальная линия окружности). Первая буква *(H)* означает ручное воздействие, т. е. ручное управление устройством. Вторая буква (S) показывает, что устройство контактное, обеспечивающее включение, отключение, переключение. Другими словами – это ручное контактное устройство: ключ управления, кнопка, переключатель и т. п.



а) *б)* *в)*

Рис. 3.25. Средства автоматизации

Второй вариант обозначения ручного щитового органа управления, например, байпасной панели дистанционного управления, показан на рис. 3.25, *б*. Буква H означает ручное, а *C* – управление. На рис. 3. 25, *в* дано обозначение пускового аппарата – магнитного пускателя, контактора и т. п. для управления электроприводом (включение, выключение двигателя насоса; открытие, закрытие задвижки и т. п.).

На этом рисунке дан пример применения резервной буквы N, что должно быть оговорено на поле чертежа. Буква S означает контактное устройство.

3.4.2. Графическое оформление схем автоматизации

На схемах автоматизации в верхней части чертежа располагают схему цепей и аппаратов автоматизируемого технологического процесса. Технологическое оборудование принято изображать схематично, чтобы внешние очертания достаточно отображали его.

В нижней части схемы слева направо изображают прямоугольники с указанием пунктов размещения средств автоматизации. В общем случае прямоугольники имеют наименования: «Приборы по месту», «Щит оператора-технолога», разделенный на прямоугольники, в которых располагают аппаратуру управления и средства отображения информации под названием «Панель оператора» в прямоугольниках, размещают программируемые микропроцессорные контроллеры и управляющие вычислительные комплексы с устройствами ввода – вывода и устройства локальной сети для связи с другими системами.

В прямоугольнике «Приборы по месту», как правило, размещают технические средства измерения и преобразования технологических переменных процесса, которые по условиям эксплуатации не встраиваются в технологическое оборудование, а устанавливаются вблизи его и связаны с измеряемыми параметрами с помощью импульсных линий. Здесь также рекомендуется изображать щиты газоанализаторов и коммутационную аппаратуру исполнительных механизмов и автоматизированного электропровода.

В соответствии с ГОСТ 21.404–85 для условных изображений модулей ввода – вывода микроконтроллеров и управляющих вычислительных комплексов приняты буквенные обозначения

AE – модуль ввода аналоговых сигналов ;

AA – модуль вывода аналоговых сигналов;

DE – модуль ввода дискретных сигналов;

DA – модуль вывода дискретных сигналов.

В прямоугольниках «Приборы по месту», «Щит оператора-технолога» и других рекомендуется следующая последовательность расположения средств контроля и регулирования технологических переменных: температура, давление-разрежение, уровень, расход, состав вещества, масса, плотность, влажность, вязкость.

К разработанной схеме автоматизации составляется спецификация приборов и средств автоматизации на том же листе над основной надписью или в виде приложения на листах формата А4. В графе «Наименование» необходимо приводить полное наименование измерительного преобразователя, прибора и средства автоматизации, вид выходного сигнала, класс точности и другие данные, приводимые в каталогах, с указанием технических условий на выбранные технические средства. Рекомендуется та же последовательность заполнения спецификации, что и расположенная средства автоматизации на схеме.

Пример выполнения схемы автоматизации приведен на рис. 3.26, на котором выполнена схема автоматизации технологического процесса вельцевания цинковых кеков. Для автоматизации процесса вельцевания используется программируемый микропроцессорный контроллер Simatic S5–115 фирмы Siemens. Контроллер позволяет принимать и преобразовывать поступающую от измерительных преобразователей контрольную информацию, вырабатывать управляющие воздействия и осуществлять взаимодействия и обмен информацией с оператором технологического объекта управления через панель отображения информации. Использование микроконтроллеров и программно-технических комплексов исключает необходимость использования щитовых приборов контроля, регистрации и регулирования, а также больших щитовых помещений.

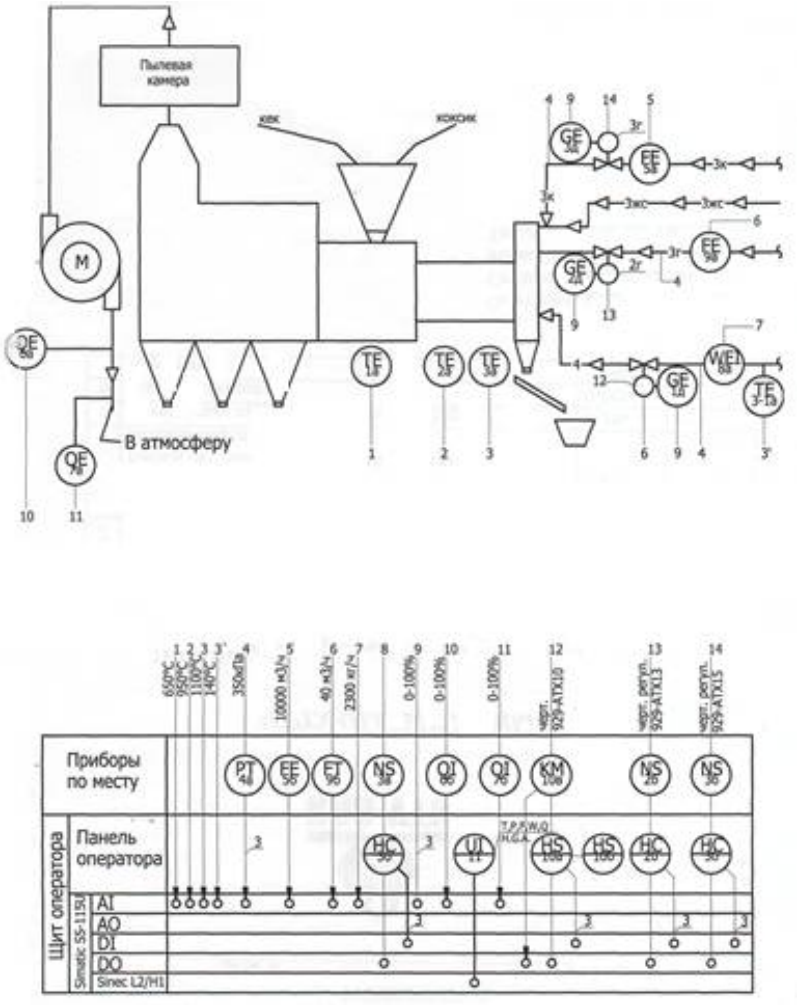


Рис. 3.26. Схема автоматизации вельцевания цинковых кеков

Для контроля температуры в топке выбран термоэлектрический преобразователь ТХА поз.1 а, сигнал с которого поступает на модуль ввода аналоговых сигналов АЕ контроллера. Для регулирования температуры расходом мазута сигнал с выхода модуля аналоговых сигналов ДА поступает на блок управления БУ–21

поз. 1 б и далее на реверсивный пускатель ПБР–2М поз.1 в, на выход которого подключен электрический исполнительный механизм: типа МЭО поз. Л 2 регулирующего клапана с встроенным датчиком положения исполнительного механизма поз. 1, унифицированный сигнал 4–20 мА с которого поступает на модуль ввода АЕ. Изменение расхода мазута автоматически приводит к изменению расхода вторичного воздуха, которое осуществляется регулятором соотношения *«мазут – воздух»*, реализованным программно в микроконтроллере! Управляющий сигнал с модуля ДА подается на блок управления БУ–21 поз. 2 б и далее на пускатель ПБР–2М поз. 2 в, выход которого поступает на исполнительный механизм типа МЭО регулирующего клапана подачи вторичного воздуха поз. 2 г. Унифицированный сигнал со встроенного датчика положения исполнительного механизма поз. 2 д поступает на модуль ввода АЕ.

Температура в зоне возгонки контролируется с помощью термоэлектрического преобразователя ТХА поз. 2 а, сигнал с которого поступает на модуль ввода АЕ.

Температура в зоне подготовки шихты контролируется термоэлектрическим преобразователем ТХА поз. 3 а, сигнал с которого поступает на модуль ввода АЕ контроллера.

Регулирование температуры осуществляется подачей обогащенного кислородом воздуха следующим образом. Управляющее воздействие с модуля вывода дискретных сигналов ДА поступает на блок управления БУ–21 поз. 3 б и далее на пускатель ПБР–2М поз. 3 в, выходной сигнал которого управляет исполнительным механизмом типа МЭО регулирующего клапана поз. 32. Сигнал со встроенного датчика положения исполнительного механизма поз. 3 д поступает на модуль ввода АЕ.

Расход кислорода корректируется по концентрации O_2 и CO в отходящих газах на выходе из пылевой камеры. Для измерения содержания кислорода используется зондовый датчик типа ЭХД–2 поз. 6 а с преобразователем типа ПВ1– поз. 6 а, а для CO – погружной датчик типа ЭХД–ПВ1 поз.7 а с преобразователем типа ГГВ–1 поз. 7 б. Выходные сигналы с преобразователей поступают на модуль ввода АЕ.

Давление мазута, вторичного воздуха и кислорода контролируется измерительными преобразователями типа Метран 43–ДИ поз. 4 а. Выходные сигналы с преобразователей поступают на модуль ввода АЕ.

Для измерения расхода кислорода и вторичного воздуха принят комплект, состоящий кз стандартных диафрагм типа ДКС поз. 5 а, 9 а и измерительных преобразователей перепада давления типа Метран–43 ДЦ поз. 56, 96. Выходные сигналы измерительных преобразователей поступают на модуль ввода АЕ.

Для измерения массового расхода мазута используется показывающий ультразвуковой счетчик – измеритель поз. 8 а, выходной сигнал с которого 4–20 мА поступает на вход модуля АЕ.

Температуру мазута измеряют с помощью термопреобразователя сопротивления типа ТОМ поз. 3–1 а, который подключен к модулю ввода АЕ.

Для управления электроприводом вентилятора-дымососа в автоматическом режиме используется сигнал с модуля вывода дискретных сигналов ДА, который подается на универсальный переключатель типа УП поз.10 а. Сигнал с выхода переключателя поступает на нереверсивный пускатель типа ПА поз. 10 в и далее на электродвигатель. В ручном дистанционном режиме включение и выключение электродвигателя дымососа осуществляется кнопочным постом типа ПКЕ поз. 10 б. Время работы дымососа фиксируется включенным состоянием пускателя ПА, поз. 10 в, сигнал с которого поступает на модуль ввода ДБ микроконтроллера.

Сигналы о положении переключателей поз. 16, 26, 36 и 10 а в различных режимах поступают на модуль ввода АЕ микроконтроллера.

Информация об измеряемых и регулируемых параметрах, положении регулирующих органов, суммарном расходе сырья и энергоносителей отображается в виде таблицы или мнемосхемы на экране панели оператора поз. 11.

Спецификация на приборы и средства автоматизации, изображенные на схеме автоматизации, приведена в приложении.

Приложение

Поз. Обозначение	Наименование	Кол	Примечание
1а	Термоэлектрический преобразователь ТХА-1293Т, А-1110^{0}С, 600 мм, ТУ311-00226253, 032-93	1	Концерн «Метран» г. Челябинск, РФ
2а	Термоэлектрический преобразователь ТХА-1192Т, А-1000^{0}С, 600 мм, ТУ311-00226253, 026-92	1	то же
	Та же, ТХА-0193-А, -40^{0}С+800^{0}С, 320 мм, ТУ311-00226253.032-93	1	то же
3-1а	Термопреобразователь сопротивления, ТСМ-0595, кл.В; 100 м, схема3, 80 мм. ТУ311-00226253.035-93	1	то же
4а	Измерительный преобразователь избыточного давления Метран 43-ДИ-3153-02-У2-0,5-0,4 МПА-42-С-И. ТУ501К-А001-036-92	1	то же
5а	Диафрагма ДКС10-80-А/Б, исп 1, ГОСТ 26969-86	1	то же
9а	Диафрагма ДКС10-300-А исп 1, ГОСТ 26969-86	1	то же
5 б, 9б	Измерительный преобразователь перепада давления Метран-43ДД-3435-02У2-0,25-25кПа-42-СВНО2-02-С-«К» ТУ4212-002-12580824-94	2	Для воздуха, без буквы «К»
6а	Твердоэлектролитный зондовый электрохимический датчик ЭХА-2 предел измерений 0-30% O_2	1	Концерн «Метран» г.Челябинск, РФ
7а	Электрохимический датчик углерода погружной ЭХД-ПВ1 предел 0,01-2,0% СО	1	В комплекте с преобразователем
66,7б	Преобразователь измерительный с унифицированным выходным сигналом 4мА-20мА, Ип-36В ТУ. РИБЮ312-00563415.03-97		Концерн «Метран» г.Челябинск, РФ
	МУ-АТХ.01		Лист 1

Продолжения приложения

Поз. Обозначение	Наименование	Кол	Примечание
8а	Счетчик-измеритель интегрирующий, показывающий с выходным сингалом 4мА-20мА предел измерения а-2500 л/ч, D_y40, P_y2,5 МПа	1	Фирма «Кроне» Германия
1б...3б	Блок управления релейного регулятора БУ-21, ~220В ТУ25-02.1685-84	3	АОЗТ «МЗТА» г.Москва
1в...3а	Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2М1, U=24В ТУ25.02.120760-78	3	ПО «Промприбор» г.Чебоксары
1г	Клапан регулирующий 25ч940нж с электрическим исполнительным механизмом МЭО со встроенным датчиком положения. $T_{вых}$=4-20 мА, P_y4,0 МПа D_y 32 исп. «НЗ» ТУ26.07-296-82	1	
2г	Клапан регулирующий для воздуха D_y, P_y 1,6МПа с электрическим исполнительным механизмом МЭО 100125-0, 25У. Датчик положения	1	
2д	Встроенный БСПТ-10 $I_{вых}$ 4-20мА. Исполнение «НО» 24ч914нж. ТУ26-07-1325-83	1	Чуфаровский арматурный завод г.Чуфаров, РФ
3г	Клапан регулирующий для воздуха с электрическим исполнительным механизмом МЭО-100163-0,63У с датчиком положения БСПТ-10 $I_{вых}$ 4-20мА. Исполнение «НО» 24ч914нж.	1	
10а	Переключатель универсальный на 3 положения, ~220В, 10А.<3* блок «НО». Диаграмма-С430. УП5300-С430, У4.1. ТУ16-524-074-75	1	
	МУ-АТХ.01		Лист 2

Контрольные вопросы:

1. Каково назначение схемы автоматизации?

2. В чем отличие графического изображения приборов, установленных на щите и вне щита (по методу)?

3. Какие буквенные обозначения вписываются в условное изображение вторичного преобразователя, если он измеряет температуру, регистрирует и показывает значение измеряемой величины?

4. Каковы основные гостируемые размеры первичных и вторичных преобразователей, наносимые в схемы автоматизации?

5. Какие буквенные обозначения применяются для условных изображений моделей ввода – вывода микроконтроллеров и управляемых вычислительных комплексов?

4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

4.1. Структура современной АСУТП, ее функции и основные разновидности

Назначение, цели и функции АСУТП. Назначение современных АСУТП можно определить как целенаправленное ведение технологического процесса и обеспечение смежных и вышестоящих систем управления необходимой информацией.

Во многих ситуациях назначением АСУТП является достижение реализуемости и устойчивости технологического процесса при высоких интенсивных и экономичных режимах использования оборудования.

Создание и функционирование каждой АСУТП должно быть направлено на получение определенных технико-экономических результатов (снижение себестоимости продукции, уменьшение потерь, повышение производительности труда, качества продуктов, улучшение условий труда персонала и т. д.)

Поэтому после определения назначения АСУТП необходимо четко конкретизировать цели функционирования системы.

Примерами таких целей для промышленных технологических объектов могут служить:

1. Обеспечение безопасности функционирования ТОУ;
2. Стабилизация параметров входных потоков;
3. Получение заданных параметров входных потоков;
4. Оптимизация режима работы оборудования;
5. Согласование режимов работы оборудования.

Степень достижения поставленных целей характеризуют понятием критерия управления.

Критерий управления – это показатель, характеризующий качество ведения технологического процесса. Критерий управления в строгой математической форме конкретизирует цель создания данной системы.

Например, технологический критерий – минимум потерь меди с отвальными шлаками при функционировании АСУТП процесса электроплавки, отражательной плавки.

Одним из общих критериев управления является критерий, определяющий наибольший экономический эффект при функционировании АСУТП, который определяется разностью стоимостей получаемой готовой продукции и сырья, энергии, рабочей силы и т. д.

Оптимальным будет такое управление процессом, которое позволит добиться максимального значения этой разности.

Как правило, общий критерий экономической эффективности управления технологическим процессом часто не применим из-за сложности определения необходимых количественных зависимостей в конкретных условиях (например, в отдельном технологическом процессе, электроплавке или дуговой плавке, где конечный продукт (штейн) не является товарным и он не имеет конкретной цены).

В таких случаях формируют частные критерии, например:

1) максимальная производительность агрегата;

2) минимальная себестоимость продукции при заданных количественных и качественных характеристиках продукции;

3) минимальный расход некоторых компонентов, например дорогостоящих катализаторов, фотореагентов.

Таким образом, в АСУТП технологическим объектом управления (ТОУ) необходимо в нужном темпе выполнять множество взаимосвязанных различных действий, т. е. собирать и анализировать информацию о состоянии процесса, регистрировать значения одних переменных и стабилизировать другие, принимать и реализовывать соответствующие решения по управлению объектом и т. д. Именно эта *«деятельность»* АСУТП была раннее названа *функционированием АСУТП*, т. е. выполнением системой установленных функций.

Дадим определение и краткое разъяснение этому понятия:

Функция АСУТП – это совокупность действий системы, направленных на достижение частной цели управления.

Различают информационные и управляющие функции АСУТП.

К информационным функциям относят такие функции АСУТП, результатом выполнения которых является представление оператору системы (или какому-либо внешнему получателю) информации о ходе управляемого процесса.

Примеры информационных функций АСУТП:

1. Контроль за основными параметрами процесса;
2. Изменение или регистрация по выводу оператора интересующих его параметров процесса;
3. Информирование оператора (по его запросу) о производственной ситуации на том или ином участке объекта управления в данный момент;
4. Вычисление по вызову оператора некоторых комплексных показателей, неподдающихся непосредственному измерению и характеризующих качество продукции или что-то другое.
5. И т. д.

Управляющие функции АСУТП:

Это действия по выработке и реализации управляющих воздействий на объекте управления.

К основным управляющим функциям АСУТП относятся:

1. Стабилизация переменных технологического процесса (например, температура в пламени печи нужно стабилизировать в заданном режиме 1200 ^{0} С);
2. Программное изменение режима процесса по заранее заданным законам (например, изменение температуры по длине печи при прохождении заготовки в индукционной печи);
3. Распределение материальных потоков и нагрузок между технологическими агрегатами (например, распределение шихты флюсующих материалов при параллельной работе нескольких печей).

Разновидности АСУТП

Современные АСУТП очень разнообразны и могут отличаться друг от друга по функциональному составу, степени автоматизации управления объекта, применяемым технологическим средством и многим другим.

Виды АСУТП:

1. Функционирующие без вычислительного комплекса (система МАРС на УКТМК, диспетчеризация на ДГМК, БГМК).
2. АСУТП с ВК, выполняющие информационные функции (рис. 4.1)
3. АСУТП с ВК, выполняющие управляющие функции в режиме «Советчика» (управление через оператора).

4. АСУТП с ВК, выполняющие функции центрального управляющего устройства (супервизорное управление). (Осуществляется управление от ЭВМ непосредственно через регуляторы на объект управления. Оператор обеспечивает лишь разовые корректировки коэффициентов модели при изменяющихся характеристиках сырья с клавиатуры).

5. АСУТП с ВК, выполняющие функции непосредственного (прямого) цифрового управления (ЭВМ непосредственно воздействует на исполнительные механизмы, а регулятор вообще исключается из системы).

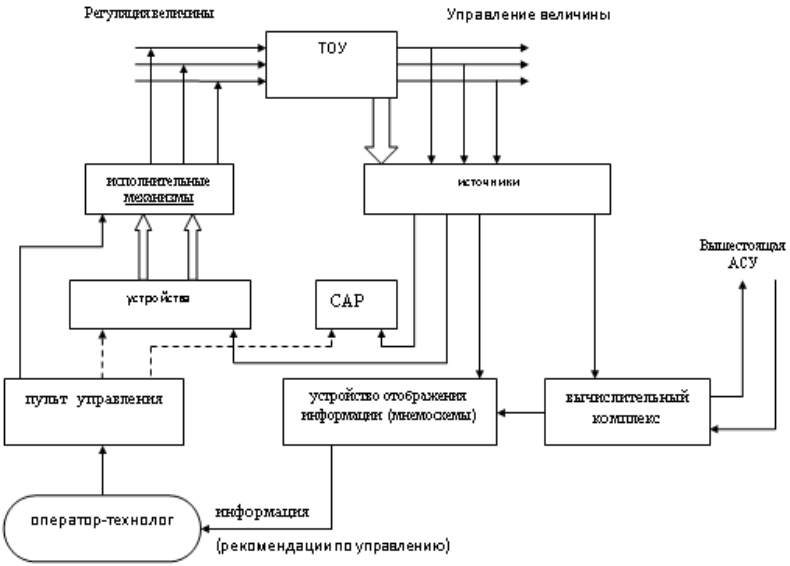


Рис. 4.1. АСУТП с ВК, выполняющие информационно-вычислительные функции

4.2. Состав АСУТП

Состав и строение любой АСУТП выбираются так, чтобы система соответствовала общим техническим требованиям, ГОСТАМ и требованиям, содержащимся в техническом проекте на создание АСУТП.

В состав любой АСУТП входят следующие крупные основные части системы:

1. Оперативный персонал.
2. Информационное обеспечение.
3. Организационное обеспечение.
4. Программное обеспечение.
5. Техническое обеспечение.

Упрощенная схема взаимодействия этих основных частей показана на рис. 4.2).

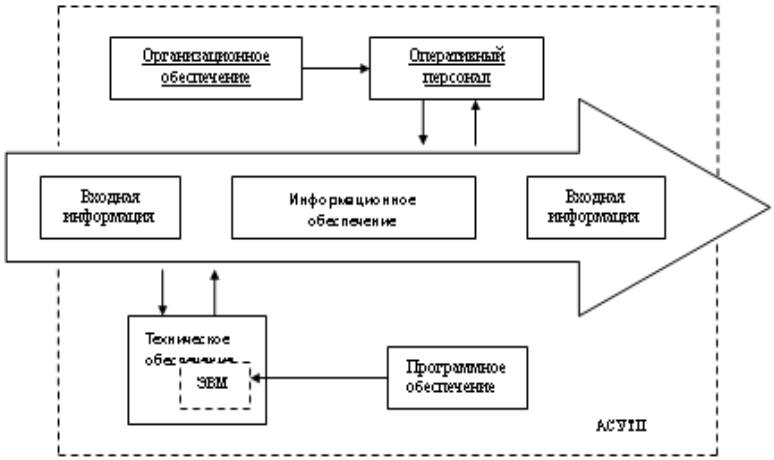


Рис. 4.2. Схема взаимодействия частей АСУТП

Рассмотрим подробнее эту схему:

Прежде всего, напомним себе, что процесс функционирования АСУТП по существу является процессом целенаправленного преобразования входной информации в выходную.

Так, в АСУТП это преобразование выполняется совместно с оперативным персоналом и техническим обеспечением (КТС).

Именно эти две составляющие АСУТП собирают информацию от объекта и других внешних источников, обрабатывают, анализируют, а затем принимают решение по управлению и реализуют это управление.

А чтобы люди, т. е. оперативный персонал и комплекс технических средств функционировали правильно (т.е. в соответствии с принятым критерием), их необходимо обеспечить соответствующими правилами инструкциями.

Для оперативного персонала эту задачу обеспечивает документы организационного обеспечения, а для КТС – программное обеспечение.

Совокупность соглашений, т. е. множество принятых форм и массивов данных документов, перечней, кодов и правил их расшифровки образуют еще один основной компонент АСУТП – это информационное обеспечение.

Оперативный персонал состоит из технологов-операторов (диспетчеров), осуществляющих контроль и управление объектом и эксплуатационного персонала, обеспечивающих эксплуатацию всей техники.

Состав оперативного персонала АСУТП и установленные взаимоотношения между его работниками определяют организационную структуру системы.

Организационное обеспечение АСУТП представляет собой совокупность документов, устанавливающих порядок и правила функционирования оперативного персонала данной системы (технологические инструкции, регламенты, инструкция по эксплуатации системы и т. д.).

Техническое обеспечение включает комплекс технических средств, контроля должна быть достаточной для выполнения всех функции АСУТП.

В состав технического обеспечения входят средства получения (датчики), преобразования (преобразователи), передачи отображения информации (УСО, дисплей), управляющие, вычислительные и исполнительные устройства.

Математическое обеспечение – это совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых при разработке и функционировании системы. (Рассказать о математических моделях, методах, адаптации, об оптимальности, критерии управления и т. д., алгоритмах управления, сглаживания, фильтрации и т. д.).

Программное и информационное обеспечения входят в состав каждой АСУТП, имеющей ЭВМ.

Если математическое обеспечение фиксирует идейные аспекты организации управления, то программное и информационное обеспечение представляет собой конкретную реализацию комплекса машинных алгоритмов функционирования системы.

Программное обеспечение охватывает круг решений, связанных с разработкой и эксплуатационной программ ЭВМ, а информационное обеспечение определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта управления как в виде данных в ЭВМ, так и в виде документов, графиков, сигналов для их представления специалистам, участвующим в управлении процессом.

4.3. Использование SCADA- систем при создании АСУТП

Диспетчерское управление и сбор данных (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition) является основным и в настоящее время остается наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами (процессами) в жизненно важных и критических с точки зрения безопасности и надежности областях. Именно на принципах диспетчерского управления строятся крупные автоматизированные системы в промышленности и энергетике, на транспорте, в космической и военной областях, в различных государственных структурах.

SCADA – процесс сбора информации реального времени с удаленных точек (объектов) для обработки, анализа и возможного управления удаленными объектами. Требование обработки реального времени обусловлено необходимостью доставки (выдачи) всех необходимых событий (сообщений) и данных на центральный интерфейс оператора (диспетчера). В то же время понятие *«реального времени»* отличается для различных SCADA-систем.

Все современные SCADA-системы включают три основных структурных компонента (рис. 4.3).

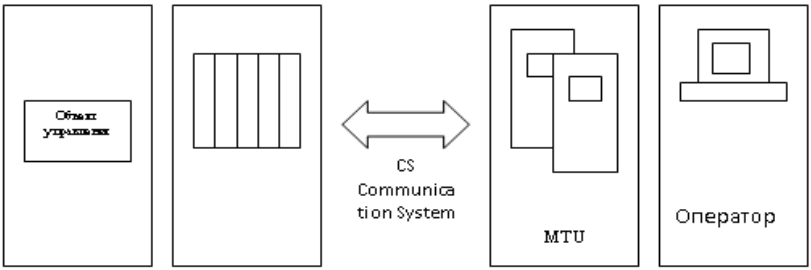


Рис. 4.3. Основные структурные компоненты SCADA системы

Remote Terminal Unit (RTU) – удаленный терминал, осуществляющий обработку задачи (управление) в режиме реального времени. Спектр его воплощений широк – от примитивных датчиков, осуществляющих съем информации с объекта, до специализированных многопроцессорных отказоустойчивых вычислительных комплексов, осуществляющих обработку информации и управления в режиме жесткого реального времени.

Master Terminal Unit (MTU), Master Station (MS) – диспетчерский пункт управления (главный терминал); осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого (квази-) реального времени; одна из основных функций – обеспечение интерфейса между человеком-оператором и системой (HML, MMI).

Communication System (CS) – коммуникационная система (каналы связи), необходима для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на центральный интерфейс оператора-диспетчера и передачи сигналов управления на RTU (или удаленный объект в зависимости от конкретного исполнения системы).

Все SCADA-системы имеют ряд функций, а именно:

- сбор и обработку данных о параметрах процесса (фильтрация, нормализация, масштабирование, линеаризация и др. для приведения данных к нужному формату);

- хранение (архивирование) полученной информации в базе данных;
- представление данных в цифровой, символьной или иной форме; это может быть динамизация значений переменных, представление значений переменных и графиков в функции времени (трендов), гистограмм и др.;
- сигнализация изменений хода технологического процесса, особенно в предаварийных и аварийных ситуациях в виде системы алармов; при этом может осуществляться регистрация действий обслуживающего персонала в аварийных ситуациях;
- формирование сводок, журналов и других отчетных документов о ходе технологического процесса на основе информации, собранной в архивах;
- формирование и сохранение в памяти команд оператора по изменению параметров настройки и режима работы контроллеров, исполнительных устройств (пускостанов, открытие-закрытие и др. функции).

Хорошо известными в мире являются следующие SCADA системы: In Touch, Fix, Lookout, Genesis 32, Win CC и др.

Контрольные вопросы:

1. Каково назначение АСУТП?
2. Приведите примеры целей функционирования АСУТП.
3. Чем определяется степень достижения поставленной цели АСУТП?
4. Что относится к информационным функциям АСУТП?
5. Что относится к управляющим функциям АСУТП?
6. Понятие супервизорного управления в АСУТП.

4.4. Схемы автоматизации типовых технологических процессов.

4.4.1. Управление процессом в реальном времени

Управляющий компьютер должен работать со скоростью, соответствующей скорости процесса. Само понятие *«реальное*

время» указывает на то, что в реакции компьютерной системы на внешние события не должно быть заметно запаздывания



Рис. 4.4. Применение компьютера в управлении процессом

Параллельность – одно из важных свойств реального мира. Все события вокруг нас протекают параллельно. Из этого свойства следует важный вывод: компьютер, взаимодействующий с такими процессами или управляющий им, должен учитывать параллельную природу и должен уметь управлять параллельными задачами. В этом заключается отличие управляющего компьютера от обычного, для которого естественным является последовательный режим.

В качестве примера можно привести управление прессом для пластика.

Компьютер должен одновременно регулировать температуру (поддерживать ее постоянной) и координировать последовательность технологических операций.

Температура пластика в контейнере должна поддерживаться в пределах узкого диапазона. УВМ периодически считывает текущую температуру и рассчитывает тепло, необходимое для ее поддерживания на требуемом уровне. Тепло поступает от нагревательного элемента, управляемого компьютером. Время работы нагревательного элемента согласовано с количеством тепла, которое необходимо подвести.

Нижняя часть пресса состоит из поршня, выталкивающего определенное количество расплавленного пластика через насадку. Когда поршень находится в крайнем правом положении, цилиндр заполняется пластиком. Затем поршень быстро перемещается влево, выдавливая требуемое количество пластика.

Положение поршня контролирует импульсный датчик, который генерирует определенное число импульсов на каждый миллиметр перемещения поршня, а объем выдавливаемого пластика определяется числом импульсов за время перемещения. Движение поршня прекращается при достижении заданного числа импульсов.

Чтобы обеспечить заданную производительность, температура пластика должна иметь заданное значение к тому моменту, когда поршень при движении вправо минует выходное отверстие контейнера.



Рис. 4.5. Пресс для пластика

В этом примере компьютерная система должна регулировать температуру и давление поршня одновременно. Значение температуры поступает в виде непрерывного сигнала от датчика. Положение поршня засчитывается исходя из числа импульсов. Кроме того, еще два датчика генерируют двоичные сигналы при достижении поршнем крайнего положения.

Управление таким процессом с помощью компьютера осуществляется на принципе управления с помощью прерывания.

Главная сложность программы управления прессом – необходимость организации переключения между задачами. На практике проблема решается с помощью двух независимых программ, выполняемых на одной машине: одна регулирует температуру, а другая – управляет перемещением поршня.

Метод сигнализации, называемый прерыванием, используется для переключения центрального процессора с исполнения одной задачи на другую.

4.4.2. Управления последовательностью событий и бинарное управление. Химический реактор – пример системы управления последовательностью событий

В реакторе происходит перемешивание реагентов с помощью смесителя. Уровень давления контролируется датчиком давления PE, а температура – датчиком TE.

Температура регулируется горячей или холодной водой, подаваемой в окружающий бак кожух; потоки воды регулируются клапанами Г (горячего) и Х (холодного).

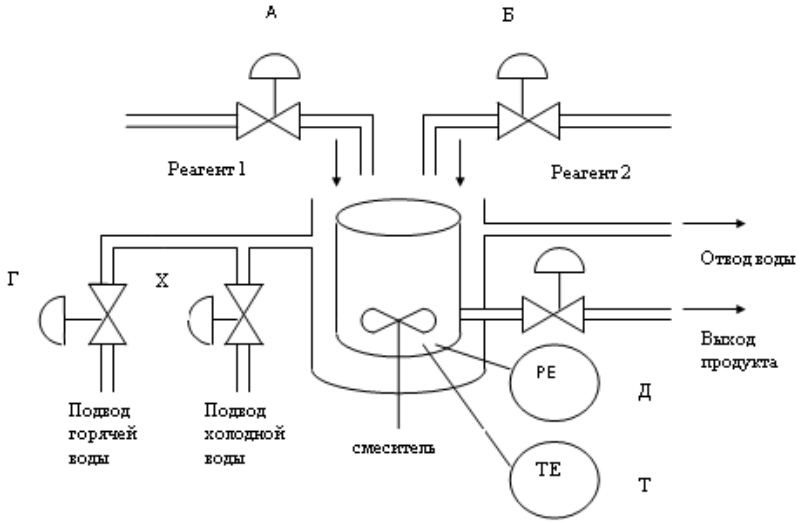


Рис. 4.6. Химический реактор с регулированием температуры

В этом примере в реакторе выполняются следующие операции:

1. Открыть клапан А и залить реагент 1.

2. Если датчик Д показывает, что достигнут новый требуемый уровень, то закрыть клапан А.

3. Запустить смеситель.

4. Открыть клапан Б и залить реагент 2.

5. Если датчик Д показывает, что достигнут новый требуемый уровень, то закрыть клапан Б.

6. Открыть клапан Г для нагрева бака.

7. Если датчик Т показывает, что достигнута требуемая температура, то закрыть клапан Г. Установить таймер на время протекания химической реакции.

8. При срабатывании мера – *«время истекло»* – остановить смеситель.

9. Открыть клапан Х для охлаждения бака.

10. Проверить температуру в баке, если температура упала ниже предела, то закрыть клапан Х и открыть клапан В для опорожнения бака.

11. Закрыть клапан В. Повторить все этапы.

Эта система предназначена для управления очередностью выполнения операции, которая зависит от некоторых логических условий. Входные и выходные данные системы являются бинарными в том смысле, что датчики контролируют два состояния или граничное условие. Входные и выходные данные системы являются бинарными в том смысле, то датчики контролируют два состояния или граничное значение. Например, клапан открыт или закрыт, индикатор закрыт или нет и т. д.

Команды управления имеют аналогичный формат: запустить или остановить двигатель, включить/отключить нагреватель и т. п.

Если задача управления основана только на бинарной логике, то очевидно, что решать удобнее и проще цифровыми

средствами. Существуют так называемые программируемые контроллеры, специально созданные для решения таких задач.

Типовые схемы регулирования температуры представлены на рис. 4.7 и 4.8.

В данном баке температура должна поддерживаться постоянной. В этом примере все сигналы аналоговые, т. е. изменение температуры отслеживается непрерывно (в отличие от предыдущего примера, где проверялось лишь превышение порогового значения), а подача тепла может регулироваться плавно. Измерения производятся периодически, например каждую секунду, и поступают в компьютер. Текущее значение температуры сравнивается с заданным (опорным), которое хранится в компьютере. Величина нагрева или охлаждения рассчитывается по разности между заданным и измеренным значениями (рис. 4.8).

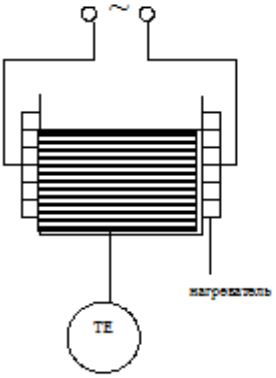


Рис. 4.7. Система регулирования температуры

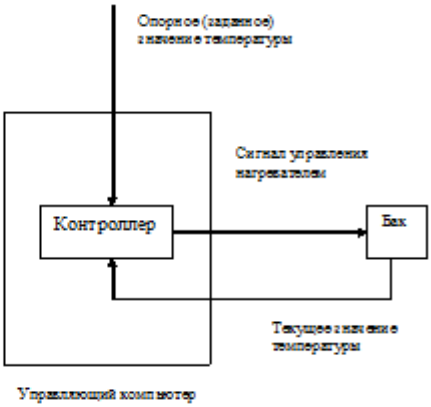


Рис. 4.8. Контур управления – система регулирования температуры

4.4.3. Автоматизация процесса каталитического риформинга нефти

Каталитический риформинг бензинов является важнейшим процессом современной нефтепереработки и нефтехимии. Он служит для одновременного получения высокооктанового базового компонента автомобильных бензинов, ароматических углеводородов – сырья для нефтехимического синтеза – и водородосодержащего газа – технического водорода, используемого в гидрогенизационных процессах нефтепереработки. Каталитический риформинг является в настоящее время наиболее распространенным методом каталитического облагораживания прямогонных бензинов. Установки каталитического риформинга имеются практически на всех отечественных и зарубежных нефтеперерабатывающих заводах (рис. 4.9).

Все эти преимущества современных систем управления технологическим процессом в полной мере относится к автоматизированной системе управления процессом каталитического риформинга.

Комплекс технических средств процесса каталитического риформинга состоит из приборов и средств вычислительной техники нижнего уровня и средств вычислительной техники верхнего уровня.

На нижнем уровне для управления группой из 5 реакторов выбран контроллер S7–300, обладающий повышенной надежностью, с выходом на станцию визуализации ОР–37. Выбор контроллера повышенной надежности обусловлен невозможностью успешно довести в ручном режиме технологический процесс на 5 реакторах. Потеря качественного управления в результате выхода контроллера из строя может привести к получению низкооктанного бензина низкого качества (брака).

Блок контроллера располагается на базовой стойке CR и одной стойке расширения ER. На базовой стойке расположен центральный процесс 6ES7318–2AJ00–0AB0 CPU 318–2DP, с

встроенной рабочей памятью объемом 512 Кбайт, и одним блоком питания 6ES7307–1KA00–0AA0 PS307–1K. Также на базовой стойке находятся:

– 4 модуля ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7PF10–0AB0 для контроля температуры в пяти реакторах и в двух печах;

– 2 модуля ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7PF00–0AB0 для контроля температуры в газофракционирующем адсорбере, в стабилизационной колонне и на трубопроводе;

– 2 модуля ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7NF10–0AB0 для контроля давления в реакторе и на трубопроводе, а также для контроля расхода.

Интерфейсный модуль IM365 6ES7365–0BA01–0AA0, предназначенный для связи между базовой стойкой и стойкой расширения;

На стойки расширения смонтированы блоки:

– 4 модуля вывода аналоговых сигналов 6ES7332–7ND00–0AB0 для автоматического управления исполнительными механизмами регулирующих клапанов с электропневматическим позиционером;

– 1 модуль ввода дискретных сигналов 6ES7321–1BL00–0AA0 для автоматического управления насосами;

– 1 модуль вывода дискретных сигналов 6ES7321–1BL00–0AA0 для автоматического управления насосами;

– Интерфейсный модуль IM365 6ES7365–0BA01–0AA0, предназначенный для связи между базовой стойкой и стойкой расширения;

– 1 блок питания 6ES7307–IKA00–0AA0 PS307–1K. Модули на стойках распределены так, что основные функции контроля и регулирования процесса собраны на панели расширения, что позволяет довести процесс до конца в случае выхода одного из строя модулей, и дает возможность заменить вышедший из строя модуль, не останавливая технологический процесс.

Технологическая схема блока риформинга

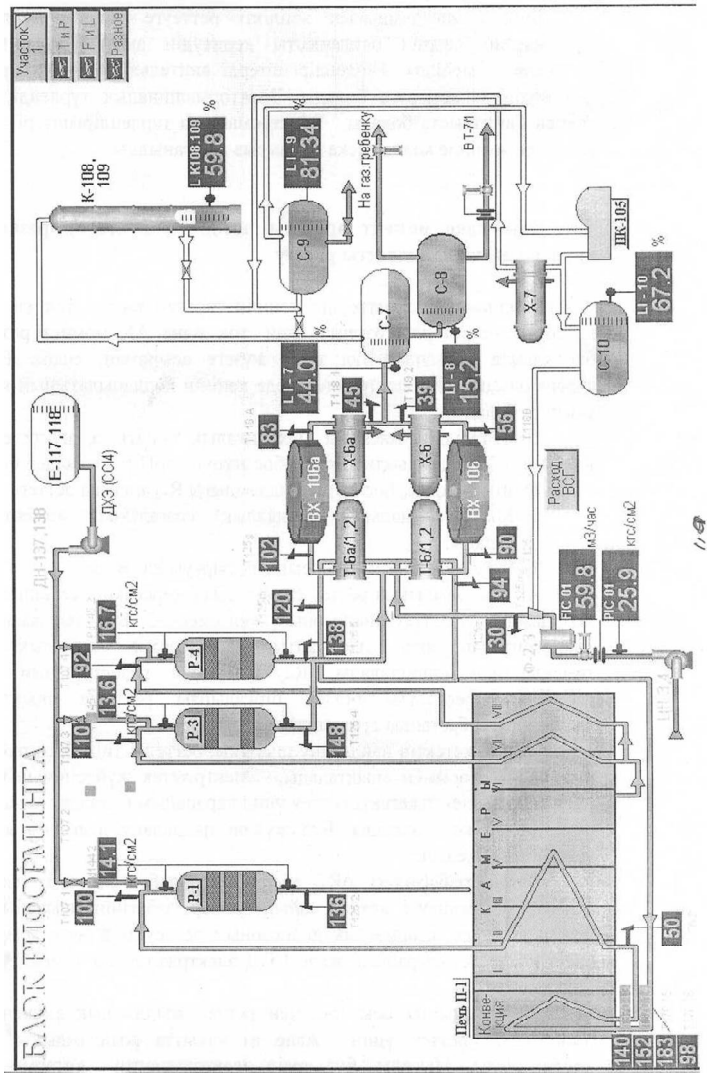


Рис. 4.9

Центральный процессор на базовой стойке соединен способом *«от точки к точке»* с панелью визуализации ОР 37

(цветной дисплей TFT, 640x480, Pentium 100, 8 МБ ОЗУ, Flash–EEPROM 2 Мбайт).

Станции визуализации объединяется локальной вычислительной сетью Profibus–DP и выходят на верхний уровень, где используется станция оператора на базе Intel–Pentium IV на весь передел.

К приборам нижнего уровня относятся:

– Термоэлектрический преобразователь ТХА–0595–02 (0–800 °С), используется для контроля температуры в разных зонах реактора;

– Термоэлектрический преобразователь ТХА–0595–01 (0–800 °С), используется для контроля температуры в кожухе реактора;

– Термоэлектрический преобразователь ТХА–0496 (0–1200 °С), используется для контроля температуры в печи;

– Термопреобразователь сопротивления ТСП Метран–256 (100П) (-200–500 °С), который используется для контроля за температурой в трубопроводе;

– Датчик давления Метран–49–Ех–Ди–9160–06–МШ–1;1–015–6МПа–16–42–БВН04–ШР–ОР. Стоит в трубопроводе после насосов

– Датчик гидростатического давления Метран–43Ф–ДГ–3595–МП–1;10–015–25–10–42–ШР–ВИ., который используется для контроля уровня в газосепараторе и в отстойнике;

– Многофункциональный массовый расходомер модели 3095М; который используется для контроля качества и учета объема выходной продукции;

– Блок управления релейного регулятора БУ 21 ТУ 42 1821 0111 25–02.1685–74 установленные на щите оператора технолога и предназначенные для автоматического и ручного режима управления насосами;

– Блок управления аналогового регулятора БУ 12 установленные на щите оператора технолога и предназначенные

для ручного режима управления исполнительными механизмами регулирующих клапанов с электропневматическим позиционером;

– Клапан регулирующий с исполнительным мембранным механизмом (МИМ ППХ 250–10–02–П6 прямоходный, 25 ч – 34 нж со встроенным электропневматическим позиционером П6, вх. 4 – 20 мА, Р = 250 кПа, нормально открытый, Dy = 80 мм) стоящий на трубопроводе.

– Клапан регулирующий с исполнительным мембранным механизмом (МИМ ППХ 250–10–02–П6 прямоходный, 25ч – 35нж со встроенным электропневматическим позиционером П6, вх.4 – 20 мА, Р = 250 кПа, нормально открытый, Dy = 100 мм) стоящий на трубопроводе.

Для создания рабочих программ выбран программатор PG 740 дисплей активный цветной TFT, Pentium III, 128МБ RAM, HDD 10ГБ, WIN2000 STEP7, WinCC.

4.4.4. Описание схемы автоматизации АСУ ТП реформинга нефти

Температура внутри реактора в двух зонах, контролируется термоэлектрическим преобразователем марки ТХА–0595–02–2000 с рабочим диапазоном измерений 0–800 °С, (поз. 1а,4а,6а) (рис. 4.10).

Температура в кожухе реактора, контролируется термоэлектрическим преобразователем марки ТХА–0595–01–200 с рабочим диапазоном измерений 0–800 °С, (поз. 2а ,5а,7а).

Температура в печи, контролируется термоэлектрическим преобразователем марки ТХА–0496–200 с рабочим диапазоном измерений 0–1200 °С, (поз. 2а,5а,7а).

Аналоговые сигналы с термоэлектрических преобразователей поступают на контроллер S7–300 на модули ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7PF10–0AB0. Контроллер преоб-

разует полученный сигнал в цифровой, сравнивает его со значениями установки и по полученным результатам сравнения регулирует температуру. Управляющий сигнал поступает с модуля вывода аналоговых сигналов 6ES7332–7ND00–0AB0 на блок управления аналогового регулятора БУ 12 (поз. 36), который в свою очередь управляет исполнительными механизмами регулирующих клапанов на печи.

Данные замера температур, поступающие с контроллера на панель визуализации ОР–37 по сети (от точки к точке), формируются там, в исторические файлы и выводятся на дисплее в виде цифровой и цветовой информации на мнемосхеме.

Контроль температуры охлаждающей воды на трубопроводе осуществляется посредством термопреобразователя сопротивления ТСП Метран–256 (100П) с рабочим диапазоном измеряемых температур от -200 до +500С (поз. 8а, 17а). Сигнал, снимаемый с термопреобразователь сопротивления, поступает на модуль ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7PF00–0AB0. Контроллер преобразует полученный сигнал в цифровой, сравнивает его со значениями установки и по полученным результатам выдает управляющий сигнал.

Управляющий сигнал на регулирование температуры в холодильнике поступает с модуля вывода аналоговых сигналов 6ES7332–7ND00–0AB0 на блок управления аналогового регулятора БУ 12 (поз. 86, 176), который в свою очередь управляет исполнительными механизмами регулирующих клапанов, стоящих на вводе охлаждающей воды в холодильник.

Контроль температуры в газофракционирующем адсорбере в стабилизационной колонне осуществляется посредством термопреобразователя сопротивления ТСП Метран–256 (100 П) с рабочим диапазоном измеряемых температур от -200 до +500 °С (поз. 9а,10а,11а,14а, 15а,16а,17а). Сигнал, снимаемый с термопреобразователя сопротивления, поступает на модуль ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7PF00–

0AB0. Контроллер преобразует полученный сигнал в цифровой, сравнивает его со значениями установки и по полученным результатам выдает управляющий сигнал.

Управляющий сигнал на регулирование температуры в газофракционирующем адсорбере в стабилизационной колонне поступает с модуля вывода аналоговых сигналов 6ES7332–7ND00–0AB0 на блок управления аналогового регулятора БУ 12 (поз. 106, 156,) который в свою очередь управляет исполнительными механизмами регулирующих клапанов, стоящих на вводе в печь.

Данные замера температур в газофракционирующем адсорбере, в стабилизационной колонне поступают с контроллера на панель визуализации ОР–37 по сети (от точки к точке), формируются там, в исторические файлы и выводятся на дисплее в виде цифровой и цветовой информации на мнемосхеме.

Контроль давления после насоса осуществляется посредством датчика давления Метран–49–Ех–Ди–9160–06–МП1–t1–015–6МПа–16–42БВН04–ЩР–ОР (поз.7а–24а). Сигнал с датчика давления поступает на модуль ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7NF10–0AB0. Контроллер преобразует полученный сигнал в цифровой, сравнивает его со значениями установки и полученные результаты сравнения в виде цифровой информации отправляет на панель визуализации, формируются там в исторические файлы и выводятся на дисплее в виде цифровой и цветовой информации на мнемосхеме.

Регулирование давления осуществляется управлением насосов с модуля вывода дискретных сигналов 6ES7321–1BL00–0AA0, через блок управления релейного регулятора БУ21 ТУ 42 1821 0111 25–02.1685–74.

Сигнал о включении или выключении насосов берется с контактов электрических схем этих насосов и поступает модуль ввода дискретных сигналов 6ES7321–1BL00–0AA0.

Контроллер преобразует полученный сигнал в цифровой, отправляет его на панель визуализации и выводит на дисплее в виде информации на мнемосхеме.

Уровень в газосепараторе и отстойнике контролируется датчиком гидростатического давления Метран–43Ф–ДГ–3595–МП–110–015–25–10–42–ШР–ВИ (поз.25а, 26а). Сигнал с датчика поступает на модуль ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7NF10-0AB0. Контроллер преобразует полученный сигнал в цифровой, сравнивает его со значениями установки и полученные результаты сравнения в виде цифровой информации отправляет на панель визуализации, где они формируются в исторические файлы и выводятся на дисплее в виде цифровой и цветовой информации на мнемосхеме.

Регулирование уровня осуществляется с модуля вывода аналоговых сигналов 6ES7332–7ND00–0AB0 на блок управления аналогового регулятора БУ 12 (поз. 25б, 26б), который в свою очередь управляет исполнительными механизмами регулирующих клапанов, стоящих на выходе.

Массовый расход, плотность (октановое число) контролируют многофункциональный массовый расходомер модели 3095М (поз. 29а, 30а, 31а). Сигнал с датчика поступает на модуль ввода аналоговых сигналов 6ES7331–7NF10–0AB0. Контроллер преобразует полученный сигнал в цифровой, сравнивает его со значениями установки и полученные результаты сравнения в виде цифровой информации отправляет на панель визуализации, где они формируются в исторические файлы и выводятся на дисплее в виде цифровой и цветовой информации на мнемосхеме.

Схема автоматизации процесса реформинга для получения бензина

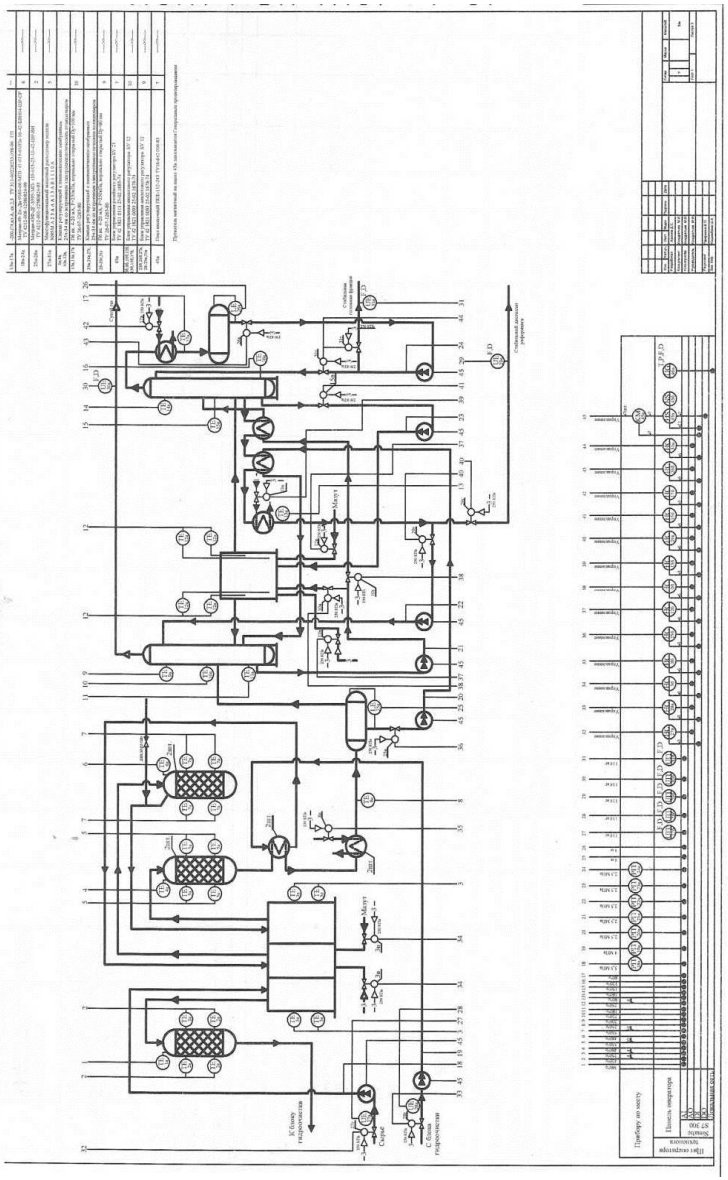


Рис. 4.10

5. АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

5.1. Статические и динамические характеристики. Дифференциальное уравнения САР

Для аналитического исследования процессов в системах автоматического регулирования необходимо составлять уравнения, устанавливающие связь между исследуемой величиной и воздействием. Например, если на вход системы поступают два воздействия f_1 и f_2, то уравнение, устанавливающее зависимость величины x от этих воздействий, в общем случае имеет вид

$$x = F(f_1, f_2). \qquad (5.1)$$

Часто оказывается удобным разделить САР на ряд элементов, для каждого из которых можно записать свое уравнение. При этом уравнение САР будет представлено в виде системы уравнений ее звеньев.

Система автоматического регулирования может находиться в установившемся состоянии, которое характеризуется тем, что все возмущающие воздействия, действующие на САР, и все переменные системы имеют установившиеся значения. САР может находиться и в неустановившемся состоянии, когда некоторые или все возмущения и все переменные изменяют свои значения с течением времени. При аналитическом исследовании уравнение может быть составлено для системы, находящейся в любом из этих состояний. В первом случае уравнение называется *уравнением установившегося состояния* или *уравнением статики системы*, во втором случае – *уравнением переходного состояния* (переходного процесса) или *уравнением динамики системы*. Уравнение статики содержит только исследуемый параметр и воздействия на вход системы и является алгебраическим. Уравнение динамики содержит дополнительно производные от переменной и возмущений того или иного порядка и является дифференциальным уравнением. От уравнения динамики легко перейти

к уравнению статики. Для этого достаточно в уравнении динамики принять все прозводные равными нулю. Например, уравнение динамики для некоторого случая, записанное в виде

$$F_1(x, x', x'') = F_2(f_1, f_1', f_2, f_2', f_2'') \tag{5.2}$$

при подстановке в него $x' = 0,\ x'' = 0, f_1' = 0, f_2' = 0, f_2'' = 0$ превращается в уравнение статики

$$F_1(x, 0, 0) = F_2(f_1, 0, f_2, 0, 0). \tag{5.3}$$

Системы автоматического регулирования, а также отдельные элементы их различаются между собой по виду статических и динамических характеристик.

Статической характеристикой системы или элемента (ее звена) называется *зависимость величины исследуемого параметра от возмущающего воздействия в установившемся состоянии*. Эта зависимость может быть изображена в виде кривой, построенной в соответствующих координатах. Если параметр зависит от нескольких возмущающих воздействий, то статическая характеристика будет представлять собой не одну кривую, а семейство кривых. Статические характеристики элементов и систем могут быть как линейными, так и нелинейными, причем большинство реальных звеньев и систем в целом имеет нелинейные статические характеристики.

Динамической характеристикой системы и элемента называется *зависимость величины исследуемого параметра от возмущающего воздействия в переходном режиме*. Эта зависимость наиболее часто описывается линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями различных порядков. Кроме того, для описания динамических свойств систем и их отдельных звеньев широкое применение находят передаточные функции, частотные и временные характеристики.

Система автоматического регулирования называется *линейной*, если ее уравнения статики и динамики являются линейными.

Если же оба эти уравнения или хотя бы одно из них является нелинейным, то система автоматического регулирования называется *нелинейным*. Эти определения в полной мере относятся и к каждому элементу САР.

Практически все системы автоматического регулирования являются нелинейными, так как всегда в составе САР находится, по крайней мере, один элемент, имеющий нелинейную статическую или динамическую характеристики. Теоретический анализ нелинейных систем является достаточно сложным, тогда как анализ линейной САР значительно проще. Поэтому возможность сведения многих нелинейных систем к классу линейных методом замены их нелинейных уравнений линейными имеет большое значение.

5.2. Передаточные функции. Частотные характеристики

Понятие передаточной функции тесно связано с применением преобразования Лапласа к анализу линейных САР.

Пусть некоторая система автоматического регулирования описывается дифференциальным уравнением

$$\mathrm{C}_0 x_{\text{вых}}^{n} + \mathrm{c}_1 x_{\text{вых}}^{n-1} + \cdots + \mathrm{c}_{n-1} x'_{\text{вых}} + \mathrm{c}_n x_{\text{вых}} =$$

$$= b_0 x_{\text{вх}}^{m} + b_1 x_{\text{вх}}^{m-1} + \cdots + + b_{m-1} x'_{\text{вх}} + b_m x_{\text{вх}} , \qquad (5.4)$$

где $x_{\text{вых}} = x_{\text{вых}}(t)$ – выходная координата САР; $x_{\text{вх}} = x_{\text{вх}}(t)$ – входная воздействие.

Запишем это уравнение в операторной форме, вводя оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$:

$$(c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \cdots + c_{n-1} p + c_n) x_{\text{вых}} =$$
$$= (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \cdots + b_{m-1} p + b_m) x_{\text{вх}} .$$

Преобразуем полученное уравнение, приняв нулевые начальные условия. При этом комплексную переменную $p = \sigma + j\omega$ и оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$ можно отождествить.

Обозначив изображение по Лапласу выходного параметра системы $x_{\text{вых}}(t)$ через $x_{\text{вых}}(p)$, а входного воздействия через $x_{\text{вх}}(p)$, можно записать изображение по Лапласу уравнения (5.4):

$$(c_0p^n + c_1p^{n-1} + \cdots + c_{n-1}p + c_n)x_{\text{вых}}(p) = \\ = (b_0p^m + b_1p^{m-1} + \cdots + b_{m-1}p + b_m)x_{\text{вх}}(p). \qquad (5.5)$$

Обозначив

$$\left.\begin{aligned} D(p) &= c_0p^n + c_1p^{n-1} + \cdots + c_{n-1}p + c_n \\ M(p) &= b_0p^m + b_1p^{m-1} + \cdots + b_{m-1}p + b_m \end{aligned}\right\}, \qquad (5.6)$$

и имеем

$$D(p)x_{\text{вых}}(p) = M(p)x_{\text{вх}}(p), \qquad (5.7)$$

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{M(p)}{D(p)}x_{\text{вх}}(p). \qquad (5.8)$$

Последнее уравнение связывает изображение выходной координаты САР с изображением входного воздействия. Отношение *M(p)/ D(p)* в этом уравнении определяется только параметрами системы и не зависит от входных воздействий. Это отношение характеризует динамические свойства системы и называется *передаточной функцией* САР.

Обозначая передаточную функцию САР через *W(p)*, уравнение (5.8) можно переписать в виде

$$x_{\text{вых}}(p) = W(p)x_{\text{вх}}(p) \qquad (5.9)$$

и

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{L[x_{\text{вых}}(t)]}{L[x_{\text{вх}}(t)]} = = \frac{b_0p^m + b_1p^{m-1} + \cdots + b_{m-1}p + b_m}{c_0p^n + c_1p^{n-1} + \cdots + c_{n-1}p + c_n}. \qquad (5.10)$$

В соответствии с уравнением (5.10) передаточная функция системы представляет собой отношение изображения по Лапласу выходной координаты САР к изображению по Лапласу входной координаты при нулевых начальных условиях.

Передаточная функция системы полностью характеризует динамические свойства САР и поэтому является ее важнейшей характеристикой. Зная передаточную функцию системы, всегда можно определить процесс изменения выходной координаты САР при наличии входного воздействия и заданных начальных условиях.

Передаточную функцию можно записать как для всей САР, так и для каждого ее отдельного звена. Понятие передаточной функции звена аналогично понятию передаточной функции системы.

Зная передаточную функцию системы или отдельного звена ее, нетрудно перейти к так называемой *амплитудно-фазовой характеристике* (*АФХ*) САР или звена.

Допустим, что на входе линейной разомкнутой системы или звена имеется гармоническое воздействие

$$x_{\text{вх}} = X_{\text{вх}} \sin \omega t, \qquad (5.\ 11)$$

где $X_{\text{вх}}$ – амплитуда входного воздействия; ω – частота колебаний.

Это гармоническое воздействие может быть представлено также в виде

$$x_{\text{вх}} = X_{\text{вх}} e^{j\omega t}. \qquad (5.\ 12)$$

После окончания переходного процесса на выходе САР (или звена) установятся вынужденные колебания, которые также будут носить гармонический характер. Однако при одинаковой с входным воздействием частоте эти колебания будут иметь иную амплитуду и фазу, что может быть записано следующим образом:

$$x_{\text{вых}} = X_{\text{вых}} e^{j(\omega t+\theta)} = X_{\text{вых}} e^{j\omega t} e^{j\theta}. \qquad (5.\ 13)$$

Пусть система автоматического регулирования описывается дифференциальным уравнением (5.1).

Известно, что

$$\left.\begin{array}{r} p\left(xe^{j\omega t}\right) = \frac{d}{dt}xe^{j\omega t} = j\omega xe^{j\omega t} \\ p^2\left(xe^{j\omega t}\right) = \frac{d^2}{dt^2}xe^{j\omega t} = (j\omega)^2 xe^{j\omega t} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ p^n\left(xe^{j\omega t}\right) = \frac{d^n}{dt^n}xe^{j\omega t} = (j\omega)^n xe^{j\omega t} \end{array}\right\}. \qquad (5.\ 14)$$

Подставляя выражения (5.12), (5.13) и (5.14) в уравнение САР (5.4), получим

$$\begin{aligned} \mathrm{c}_0(j\omega)^n X_{\text{вых}} e^{j\theta} e^{j\omega t} + \mathrm{c}_1(j\omega)^{n-1} X_{\text{вых}} e^{j\theta} e^{j\omega t} + \\ + \cdots + \mathrm{c}_n X_{\text{вых}} e^{j\omega} e^{j\omega t} = b_0(j\omega)^m X_{\text{вх}} e^{j\omega t} + \\ + b_1(j\omega)^{m-1} X_{\text{вх}} e^{j\omega t} + \ldots + b_m X_{\text{вх}} e^{j\omega t}. \end{aligned} \qquad (5.\ 15)$$

После сокращения на $e^{j\omega t}$ и преобразований имеем

$$\frac{X_{\text{вых}}}{X_{\text{вх}}} e^{j\theta} = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \ldots + b_{m-1}(j\omega) + b_m}{\mathrm{c}_0(j\omega)^n + \mathrm{c}_1(j\omega)^{n-1} + \ldots + c_{n-1}(j\omega) + \mathrm{c}_n} = W(j\omega). \qquad (5.\ 16)$$

Выражение $W(j\omega)$ называют *комплексной частотной функцией разомкнутой системы* (или звена). Частотная функция системы легко получается из ее передаточной функции подстановкой $p = j\omega$. Частотную функцию $W(j\omega)$ часто называют амплитуднофазовой характеристикой (АФХ) САР.

Частотную функцию можно записать в виде суммы вещественной *R(ω)* и мнимой *jI(ω)* частей:

$$W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega), \qquad (5.\ 17)$$

где $R(\omega)$ – вещественная частотная характеристика; $I(\omega)$ – мнимая частотная характеристика.

В полярных координатах частотная функция может быть записана следующим образом:

$$W(j\omega) = A(\omega)\, e^{j\theta(\omega)}. \qquad (5.\ 18)$$

Величина $A(\omega)$ определяет изменение амплитуды колебаний на выходе САР по отношению к колебаниям на входе и называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а величина $\theta(\omega)$ определяет изменение фазы колебаний на выходе по отношению к входным колебаниям и называется фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

Величины $A(\omega)$ и $\theta(\omega)$ определяются выражениями

$$\left.\begin{aligned} A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} \\ \theta(\omega) = \operatorname{arctg}\frac{\mathrm{I}(\omega)}{\mathrm{R}(\omega)} \end{aligned}\right\}. \qquad (5.19)$$

Частотную функцию можно изобразить графически на комплексной плоскости в виде вектора, конец которого при изменении ω от 0 до $+\infty$ прочерчивает некоторую кривую, которая называется *годографом амплитудно-фазовой характеристики* (АФХ) САР и показана на рис. 5.1.

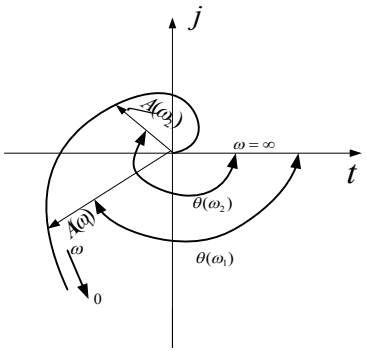


Рис. 5.1. Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой САР

5.3. Типовые возмущающие функции

Внешние возмущения и управляющие воздействия, поступающие на вход реальных систем автоматического регулирования, имеют весьма разнообразный характер.

При исследовании переходных и установившихся процессов используются так называемые *типовые возмущающие функции*, которые отражают наиболее существенные черты реальных возмущений. Использование типовых возмущающих воздействий дает возможность, кроме упрощения анализа САР, сравнивать динамические свойства звеньев и систем, так как позволяет подвергать различные звенья и системы однотипным воздействиям. Типовые возмущающие функции показаны на рис. 5.2.

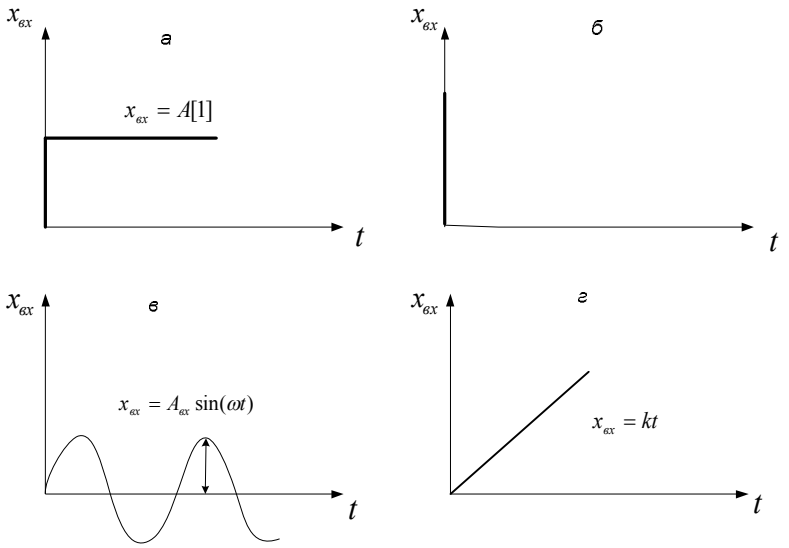


Рис. 5.2. Типовые возмущающие функции

Ступенчатая (толчкообразная) функция (рис. 5.2, *а*) может быть определена следующим образом:

$$f(t) = \begin{cases} 0, \text{при } t < 0 \\ A, \text{при } t > 0, \end{cases} \quad (5.20)$$

где A – некоторое постоянное значение.

При $A = 1$ ступенчатая функция превращается в единичное ступенчатое воздействие (единичную функцию)

$$f(t) = \begin{cases} 0, \text{при } t < 0 \\ 1, \text{при } t > 0, \end{cases} \quad (5.21)$$

Единичную ступенчатую функцию часто обозначают следующим образом:

$$f(t) = 1(t) = [1], \quad (5.22)$$

а ступенчатую функцию так:

$$f(t) = A1(t) = A[1], \quad (5.23)$$

К числу типовых возмущающих функций относится также импульсная функция (рис. 5.2, *б*), которую часто называют δ-функцией или *функцией Дирака*. Ее можно выразить в виде следующей зависимости:

$$f(t) = \delta(t - t_0) = \begin{cases} 0, \text{при } t \neq t_0 \\ \infty, \text{при } t = t_0, \end{cases} \quad (5.24)$$

Причем

$$\int_0^\infty \delta(t - t_0)dt = 1. \quad (5.25)$$

Смысл -функции можно объяснить следующим образом. Представим себе некоторый прямоугольный импульс с произвольной ординатой и длительностью $\Delta\tau$, но с площадью, равной единице (рис. 5.3).

Будем уменьшать длительность импульса и при $t = t_0$ для сохранения условия *S=1* δ- функция будет равна бесконечности. Таким образом, -функцию (импульсную возмущающую функцию) можно трактовать как предел прямоугольного импульса, когда высота последнего стремится к бесконечности, а длительность – к нулю.

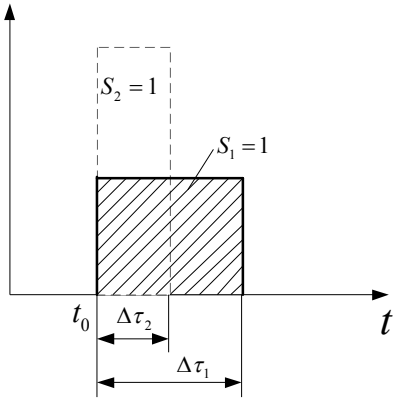


Рис. 5.3. Импульсная возмущающая функция

Достаточно широко используются гармонические входные воздействия или гармонические функции, см. (рис. 5. 2, *в*) или

$$\left.\begin{array}{l} f(t) = A_{\text{вх}} \sin \omega t \\ f(t) = A_{\text{вх}} \cos \omega t \end{array}\right\}. \qquad (5.26)$$

Кроме указанных типовых возмущающих функций, при анализе некоторых САР (например, следящих систем) используются так называемые степенные возмущающие функции – линейная (см. рис. 5.2, *г*), квадратичная и др.:

$$\left.\begin{array}{l} f(t) = kt \\ f(t) = kt^2 \text{ и т. д.} \end{array}\right\}. \qquad (5.27)$$

Каждая из отмеченных типовых функций используется при исследовании определенных свойств систем автоматического регулирования: ступенчатая и импульсная функции – для непосредственного определения временных характеристик элементов или системы в целом гармонического для частотных методов анализа систем автоматического регулирования.

5.4. Переходные функции

Переходная функция в общем случае может быть определена как реакция системы на изменение входного воздействия. Переходные функции описывают переходные процессы, т. е процессы изменения выходной координаты во времени, поэтому переходные функции часто называют *временными характеристиками САР*.

В зависимости от характера изменения входного воздействия различают переходную функцию при единичном ступенчатом воздействии и импульсную переходную функцию. Первая характеризует процесс изменения во времени выходного параметра САР при воздействии на нее единичной ступенчатой функции. Изображение по Лапласу единичной ступенчатой функции имеет вид

$$x_{\text{вх}}(p) = L[x_{\text{вх}}(t)] = L[1] = \frac{1}{p}, \tag{5.28}$$

где L – символ преобразования Лапласа.

Используя понятие передаточной функции, можем записать

$$x_{\text{вых}}(p) = W(p)x(p) = W(p)\frac{1}{p}. \tag{5.29}$$

Подвергнув обратному преобразованию Лапласа (символ L^{-1}) выражение (5.2), получают переходную функцию при единичном ступенчатом воздействии

$$x_{\text{вых}}(t) = L^{-1}\left[W(p)\frac{1}{p}\right] = x_{[1]}t. \tag{5.30}$$

Импульсная переходная функция характеризует процесс изменения выходного параметра САР при воздействии на вход системы импульсной функции. Импульсную переходную функцию часто называют *весовой функцией САР* или *импульсной характеристикой*.

Учитывая, что преобразование Лапласа для -функции равно единице:

$$x_{\text{вх}}(p) = L[\delta(t)] = 1,$$

можно записать

$$x_{\text{вых}}(p) = W(p)x_{\text{вх}}(p) = W(p). \qquad (5.31)$$

Используя обратное преобразование Лапласа, импульсную переходную функцию записывают в виде

$$x_{\delta}(t) = x_{\text{вых}}(t) = L^{-1}[W(p)]. \qquad (5.32)$$

Импульсная переходная функция, таким образом, тесно связана с передаточной функцией системы.

5.5. Типовые звенья

Любая система автоматического регулирования состоит из совокупности отдельных элементов или звеньев. Конструктивное оформление последних и их функции в САР могут быть самыми разнообразными. Однако при исследовании динамических свойств систем, когда важно знать динамические характеристики составляющих их звеньев, целесообразно отвлекаться от конкретного конструктивного исполнения звеньев САР, сравнивая их между собой по динамическим свойствам.

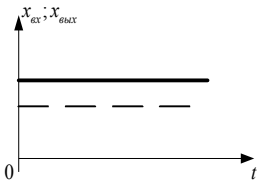
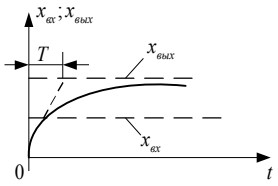
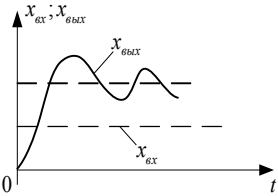
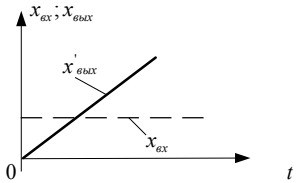
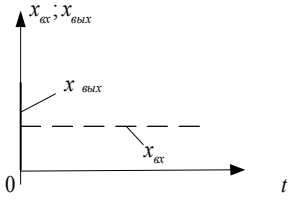
В теории автоматического управления принято классифицировать все звенья САР по виду переходного процесса, возникающего при воздействии на вход звена единичного ступенчатого воздействия. При таком подходе оказывается возможным свести все разнообразие реальных звеньев к сравнительно небольшому числу так называемых типовых звеньев или типовых элементов САР.

К числу таких типовых звеньев относятся: а) безынерционные; б) инерционные или апериодическое; в) колебательное; г) интегрирующее; д) дифференцирующее; е) запаздывающее.

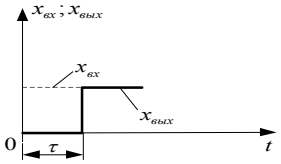
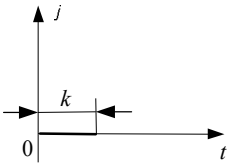
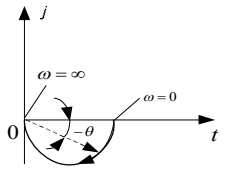
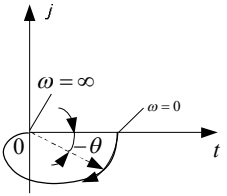
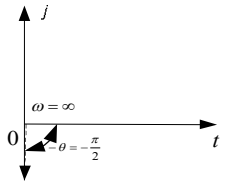
Разделение системы на звенья в общем случае носит произвольный характер. Каждое из полученных звеньев может быть более или менее сложным и свою очередь может быть представлено в виде совокупности типовых динамических звеньев. Характеристики типовых звеньев приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

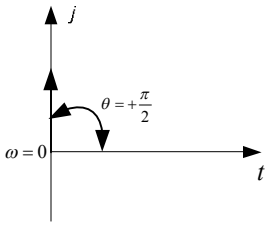
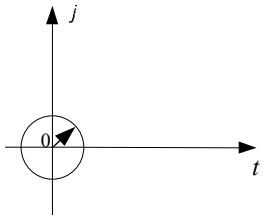
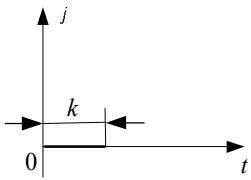
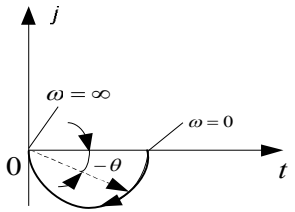
Характеристика типовых звеньев САР

Звено	Уравнение звена	Вид переходного процесса
Безынерционное усилительное	$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$	
Инерционное	$T\dot{x}_{\text{вых}} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$	
Колебательное	$T_1^2\ddot{x}_{\text{вых}} + T_2\dot{x}_{\text{вых}} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$ где корни уравнения $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$	
Интегрирующее	$T\dot{x}_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$	
Дифференцирующее	$x_{\text{вых}} = k\dot{x}_{\text{вх}}$	

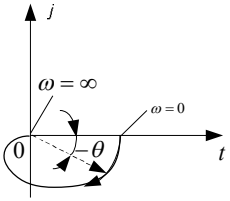
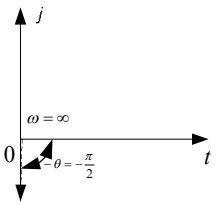
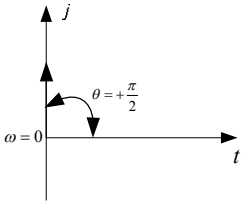
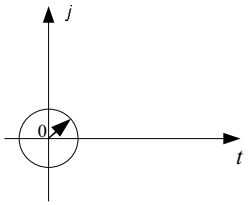
Продолжение табл. 5.1

Звено	Уравнение звена	Вид переходного процесса
Запаздывания	$x_{\text{вых}} = x_{\text{вх}}(t-\tau)$	
При $t=0$ $x_{\text{вых}} = 0$ При $t>0$ $x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$	$W(p) = k$	
$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}(1-e^{\frac{t}{T}})$	$W(p) = \frac{k}{Tp+1}$	
$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}[1 - \sqrt{1+\frac{\alpha^2}{\omega^2}}e^{\alpha t} \times \sin(\omega t + arctg\frac{\omega}{\alpha})]$	$W(p) = \frac{k}{T_1^2p^2+T_2p+1}$	
$x_{\text{вых}} = \frac{k}{T}\int_0^t x_{\text{вх}}\,dt$	$W(p) = \frac{k}{Tp}$	

Продолжение табл. 5.1

Уравнение переходного процесса	Передаточная функция	Амплитудно-фазовая характеристика
При $t \approx 0$ $x_{\text{вых}} = \infty$	$W(p) = k_p$	
	$W(p) = e^{-p\tau}$	
При $t=0$ $x_{\text{вых}} = 0$ При $t>0$ $x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$	$W(p) = k$	
$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}(1-e^{\frac{t}{T}})$	$W(p) = \frac{k}{Tp+1}$	

Продолжение табл. 5.1

Уравнение переходного процесса	Передаточная функция	Амплитудно-фазовая характеристика
$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}[1 - \sqrt{1+\frac{\alpha^2}{\omega^2}}e^{\alpha t} \times \sin(\omega t + arctg\frac{\omega}{\alpha})]$	$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$	
$x_{\text{вых}} = \frac{k}{T}\int_0^t x_{\text{вх}}\,dt$	$W(p) = \frac{k}{Tp}$	
При $t \approx 0$ $x_{\text{вых}} = \infty$	$W(p) = k_p$	
	$W(p) = e^{-p\tau}$	

5.6. Передаточные функции САР

Любую реальную САР можно представить в виде совокупности различных звеньев, соединенных между собой тем или иным образом.

Последовательным соединением называется соединение звеньев, показанное на рис. 5.4, *а*, при котором выходная величина каждого предыдущего звена является входной величиной последующего.

Допустим, что передаточные функции всех звеньев

$$W_1(p) = \frac{x_1(p)}{x_{\text{вх}}(p)}, W_2(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)}, \dots, W_n(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{n-1}(p)}, \tag{5.33}$$

и передаточная функция всей группы звеньев

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)}. \tag{5.34}$$

Очевидно, что

$$\left.\begin{array}{c} x_{\text{вых}}(p) = W_n(p)x_{n-1}(p) \\ x_{n-1}(p) = W_{n-1}(p)x_{n-2}(p) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_1(p) = W_1(p)x_{\text{вх}}(p) \end{array}\right\} \tag{5.35}$$

$$x_{\text{вых}}(p) = W_1(p)W_2(p) \dots . W_n(p)x_{\text{вх}}(p). \tag{5.36}$$

Следовательно,

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n} \cdot W_i(p). \tag{5.37}$$

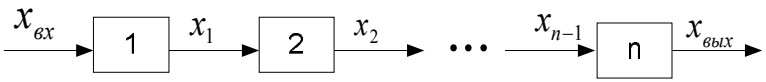
Таким образом, при последовательном соединении звеньев

передаточная функция группы их равна произведению передаточных функций всех звеньев.

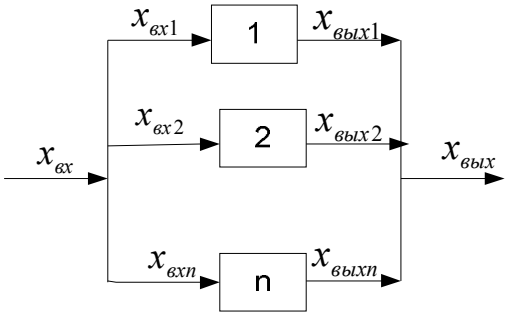
Параллельным соединением звеньев называется такое соединение, при котором звенья образуют замкнутые контуры. При этом можно выделить звенья с прямой и обратной связями. Параллельное соединение звеньев, образующих прямую связь, показано на рис. 5.4, *б*.

Очевидно, что

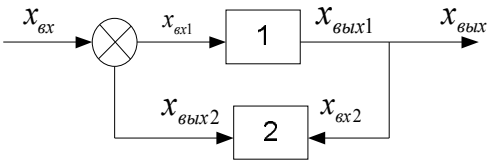
$$\left.\begin{array}{c} x_{\text{вх}1} = x_{\text{вх}2} = x_{\text{вх}3} = \cdots = x_{\text{вх}n} = x_{\text{вх}} \\ x_{\text{вых}1} + x_{\text{вых}2} + x_{\text{вых}3} + \cdots + x_{\text{вых}n} = x_{\text{вых}} \end{array}\right\}. \qquad (5.38)$$



а



б



в

Рис. 5. 4. Структурные схемы разомкнутой и замкнутых систем автоматического регулирования

Учитывая, что

$$\left.\begin{array}{l} x_{\text{вых1}} = W_1(p)x_{\text{вх}} \\ x_{\text{вых2}} = W_2(p)x_{\text{вх}} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x_{\text{вых}n} = W_n(p)x_{\text{вх}} \end{array}\right\} \quad (5.39)$$

$$x_{\text{вых}} = W(p)x_{\text{вх}} \quad (5.40)$$

выражение для передаточной функции группы параллельно соединенных звеньев, образующих прямую связь, имеет вид

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \cdots + W_n(p)$$

или

$$W(p) = \sum_{i=1}^{n} W_i(p). \quad (5.41)$$

Таким образом, передаточная функция группы параллельно соединенных звеньев, образующих прямую связь, равна сумме передаточной функций отдельных звеньев.

Параллельное соединение звеньев, образующих замкнутый контур с обратной связью, показано на рис. 5.4, *в*.

Из схемы видно, что

$$x_{\text{вх1}} = x_{\text{вх}} \pm x_{\text{вых2}}, \quad (5.42)$$

$$x_{\text{вых1}} = x_{\text{вх2}} = x_{\text{вых}}. \quad (5.43)$$

В формуле (5.42) знак минус соответствует так называемой отрицательной обратной связи, а знак плюс – так называемой положительной обратной связи.

Если передаточные функции звеньев $W_1(p)$ и $W_2(p)$, то

$$\left.\begin{array}{c} x_{\text{вых1}} = W_1(p)\ x_{\text{вх1}} = x_{\text{вых}} \\ x_{\text{вых2}} = W_2(p)x_{\text{вх2}} \end{array}\right\} \tag{5.44}$$

и

$$x_{\text{вх1}} = x_{\text{вх1}} \pm x_{\text{вых2}} = \frac{x_{\text{вых}}}{W_1(p)} \pm W_2(p)x_{\text{вых}},$$

Откуда

$$x_{\text{вх}} = x_{\text{вых}} = \left[\frac{1 \pm W_1(p)W_2(p)}{W_2(p)}\right]. \tag{5.45}$$

Окончательно для передаточной функции двух элементов, образующих замкнутый контур с обратной связью, получаем выражение

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{W_2(p)}{1 \pm W_1(p)W_2(p)}. \tag{5.46}$$

В формуле (5.46) знак минус в знаменателе соответствует положительной обратной связи, а знак плюс- отрицательной обратной связи.

Полученные выше формулы для передаточных функций групп элементов в различных случаях их соединения позволяют любую сложную многоконтурную САР свести к простой одноконтурной системе.

Контрольные вопросы:

1. Каково отличие статической характеристики системы (элемента системы) от динамической характеристики?
2. Дайте определение передаточной функции САР.
3. Как получить АФХ из передаточной функции?
4. Из каких частей состоит АФХ?
5. Что называют годографом АФХ САР?
6. Перечислите типовые возмущающие функции САР.
7. Объясните понятие *«переходная функция»* и *«переходной процесс»*.
8. Перечислите основные типовые звенья САР.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

6.1. Классификация методов определения динамической модели объекта управления

Объекты автоматического управления, средства управления и автоматизации являются динамическими частями замкнутых систем автоматического управления. Переходные процессы в таких системах определяются динамическими свойствами их компонентов.

Изучение динамических свойств системы может осуществляться либо путем первоначального исследования динамических свойств ее элементов и последующей разработки динамической модели всей системы, либо определением динамических характеристик всей сложной системы в целом. Возможны также комбинированные методы, при которых определяются динамические свойства элементов и более сложных частей системы.

Процесс определения математической модели объекта, отражающей основные динамические свойства элементов или всей системы в целом, называется *идентификацией объекта математической модели* или проще – *идентификацией объекта*.

Результаты воздействия входной величины на выходную в реальном объекте должны быть близки в определенном смысле (например, по минимуму среднеквадратичного отклонения) к расчетным результатам, полученным с помощью математической модели. Чем ближе расчетные данные к экспериментальным, тем математическая модель отражает динамические свойства исследуемого объекта.

Различают два основных вида математической модели: 1) структурную, отражающую внутреннюю структуру объекта, т. е. способ организации реальных процессов, протекающих в объекте; 2) функциональную, имитирующую поведение системы

независимо от ее действительной сущности.

То обстоятельство, что функциональная модель объекта не отражает реальной его сущности, позволяет представить объект в виде так называемого *«черного ящика»*, на вход которого действует ряд возмущающих и управляющих воздействий, а на выход появляются результаты этих воздействий в виде изменений выходных параметров объекта. В общем случае такая модель объекта представляет собой многомерную систему множеством взаимосвязанных входных и выходных величин.

Если исследуется реакция объекта только на одно входное действие, то остальные должны быть стабилизированы. Системы, в которых имеется только один вход и один выход, называют *одномерными*.

В дальнейшем будут рассматриваться преимущественно одномерные системы.

Задачей идентификации является определение оператора A, связывающего входную $x_{вх}$ и выходную x величины

$$\mathrm{x}(t) = A x_{\mathrm{вх}}(t). \tag{6.1}$$

Оператор однозначно характеризует статические и динамические свойства системы по данному каналу.

В случае линейного многомерного объекта с несколькими входами и одним выходом

$$\mathrm{x}(t) = \sum_{i=1}^{n} A_i \, x_{\mathrm{вх}}(t), \tag{6.2}$$

где A_i – оператор по данному входу; n – число входов.

Оператор связи, характеризующий динамические свойства элементов или объекта, может быть представлен в различной форме:

1) системой дифференциальных или дифференциально-интегральных уравнений;

2) передаточной функцией;

3) переходной функцией;

4) импульсной переходной функцией;

5) частотными характеристиками;

6) коэффициентами математической модели известной структуры;

7) статическими характеристиками связи входа и выход (автокорреляционной, взаимокорреляционной функциями и т. д.).

Классификация методов определения динамических характеристик объектов управления представлена на рис. 6.1.

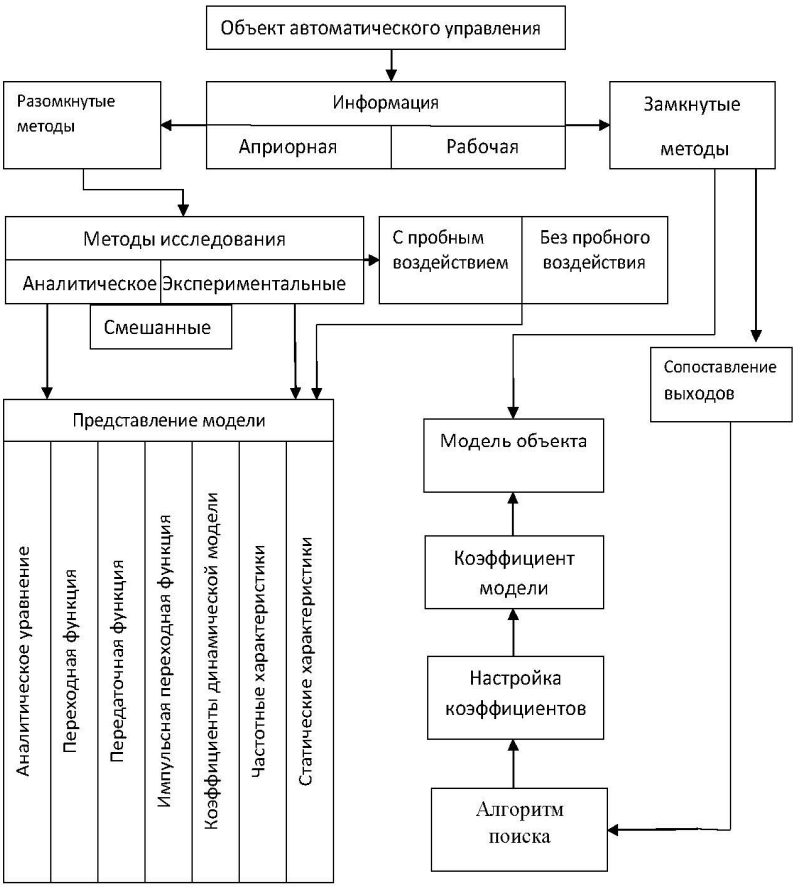


Рис. 6.1. Классификация методов определения
динамической модели объекта управления

Информация, получаемая от объекта, может быть использована для построения моделей двух типов: разомкнутых и замкнутых.

В разомкнутых моделях оператор связи между входными и выходными величинами определяется по данным некоторых исследований и в дальнейшим не корректируется.

В замкнутых моделях происходит непрерывное или периодическое сопоставление реакции объекта и модели на один и те же входные воздействия, и в случае расхождения результатов работы объекта и модели в последнюю вносится определенная коррекция.

При экспериментальных и смешанных методах исследования могут быть использованы два способа: 1) с нанесением пробных возмущений и определением реакции объекта на эти возмущения; 2) без нанесения пробного возмущения по данным нормальной эксплуатации объекта.

При использовании замкнутых методов коэффициент математической модели может быть детерминированным (без поиска) или поисковым, при котором автоматически находится оптимальный способ коррекции работы модели. Коррекция коэффициентов начинается при условии, если нарушается заданная степень близости реакции объекта и модели на одни и те же входные сигналы. Для определения рассогласований выходных величин объекта и модели используется устройство сравнения этих величин, которое дает сигнал для начала коррекции коэффициентов модели. Замкнутые модели принципиально более точны, но требуют применения сложных и надежных средств вычислительной техники, действующих в темпе с исследуемым процессом.

Выбор метода идентификации определяется следующими факторами:

1. Возможностью нанесения специальных возмущений достаточной величины.

2. Уровнем шумов (помех), влияющих на результат эксперимента.

3. Характером процесса (стационарный, квазистационарный, нестационарный).

4. Временем, которым располагает исследователь для проведения эксперимента.

5. Разрешающей способностью аппаратуры.

6. Характеристиками электронной вычислительной техники, которую может использовать экспериментатор для сбора и обработки информации.

В некоторых случаях хорошие результаты дает аппроксимация динамических характеристик системой функции, т. е. аппроксимация объекта некоторой предполагаемой структурой, которая в общем случае может отличаться от реальной структуры объекта. При этом задача идентификации сводится к определению коэффициентов этих функций.

Все указанные выше методы идентификации позволяют получить приближенное математическое описание объекта, которое затем используется при определении алгоритмов оптимального регулирования и управления производственными процессами.

6.2. Определение динамических характеристик объекта способом нанесения пробных возмущений

Определение динамических параметров по кривой разгона

Временная зависимость выходной величины объекта от ступенчатого возмущения получила название кривой разгона. На рис. 2 приведены кривые разгона статических и астатических объектов.

Для определения динамических параметров статического объекта первого порядка (запаздывания $\tau_{об}$, постоянной времени $T_{об}$, коэффициента передачи $K_{об}$) в точке максимальной скорости изменения выходной величины проводят касательную к кривой разгона и продолжают ее до пересечения с линией начального значения выходной величины (осью абсцисс). Отрезок времени

от момента внесения возмущения до точки пересечения касательной с осью определит запаздывание объекта $\tau_{об}$, которое складывается из чистого (транспортного) запаздывания и емкостного запаздывания.

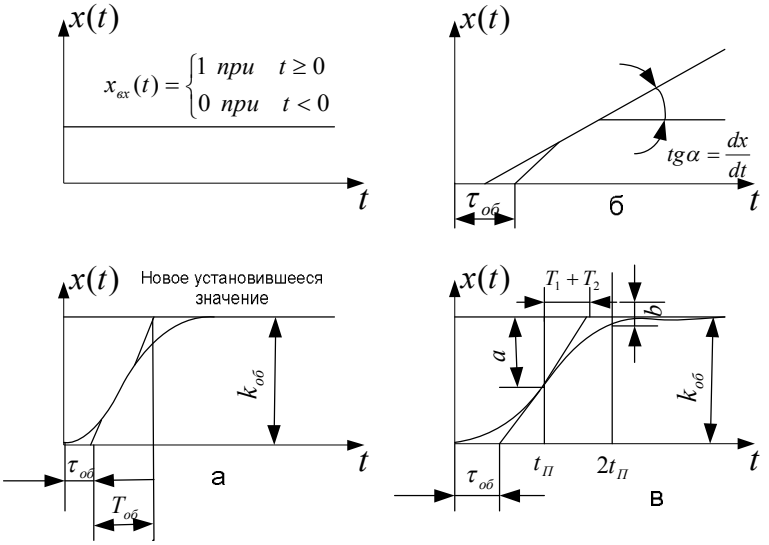


Рис. 6.2. Кривые разгона и динамические параметры объекта:
а – статический объект первого порядка; б – астатический объект; в – статический объект второго порядка

Для статических объектов первого порядка, обладающих самовыравниванием, отрезок времени от момента пересечения касательной с линией начального установившегося значения выходной величины до момента ее пересечения с линией нового установившегося значения определит постоянную времени объекта $T_{об}$.

Коэффициент передачи статического объекта представляет собой изменение выходной величины объекта при переходе из начального в новое установившееся состояние, отнесенное к изменению возмущения на входе

$$k_{об} = \frac{x_\infty - x_0}{\Delta x_{вх}}, \qquad (6.1)$$

где x_0 – значение выходной величины в начальном установившемся состоянии; x_∞ – то же, для нового установившегося состояния; $\Delta x_{вх}$ – величина вносимого возмущения.

Для астатических объектов пользуются условной постоянной времени $\overline{T_{об}}$, которую определяют как время изменения выходной величины на единицу ее измерения.

Запаздывание астатического объекта равно отрезку времени между моментом внесения возмущения и точкой пересечения касательной к кривой изменения выходной величины.

Коэффициент передачи астатического объекта определяется по кривой разгона как установившееся значение скорости изменения выходной величины

$$\overline{k} = \frac{x'_\infty}{\Delta x_{вх}}, \qquad (6.2)$$

где x'_∞ – скорость изменения выходной величины; Δx – величина вносимого возмущения.

В ряде случаев объекты управления в черной металлургии описываются дифференциальным уравнением второго порядка. Для таких объектов при внесении возмущения в виде единичного скачка может получиться переходная функция, показанная на рис. 6.2, *в*. Она представляет собой монотонную кривую, характерной точкой которой является точка перегиба, соответствующая моменту изменения знака второй производной.

Передаточная функция такого объекта может рассматриваться как произведение передаточных функций двух апериодических объектов с постоянными времени $T_{об1}$ и $T_{об2}$. Переходная функция определяется выражением

$$x = 1 - \frac{T_{об1}}{T_{об1} - T_{об2}} e^{\frac{t}{T_{об1}}} + \frac{T_{об2}}{T_{об1} - T_{об2}} e^{-\frac{t}{T_{об2}}}. \qquad (6.3)$$

Изменение знака второй производной происходит в момент времени

$$t_{\text{П}} = \frac{\text{Т}_{\text{об1}}\text{Т}_{\text{об2}}}{\text{Т}_{\text{об1}} - \text{Т}_{\text{об2}}} \ln\left(\frac{\text{Т}_{\text{об1}}}{\text{Т}_{\text{об2}}}\right).$$

Значение выходной координаты в точке перегиба определяется соотношением

$$x_{\text{П}} = 1 - \frac{\text{Т}_{\text{об1}} + \text{Т}_{\text{об2}}}{\text{Т}_{\text{об1}}} \text{e}^{-\frac{t_{\text{П}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}}. \quad (6.4)$$

При определении динамических параметров такого объекта по кривой разгона используют равенство величины подкасательной функции $1 - x$ в точке ее перегиба $t_{\text{П}}$ сумме постоянных времени $\text{Т}_{\text{об1}} + \text{Т}_{\text{об2}}$ апериодических объектов.

Действительно,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\text{e}^{-\frac{t_{\text{П}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}} - \text{e}^{-\frac{t}{\text{Т}_{\text{об2}}}}}{\text{Т}_{\text{об1}} - \text{Т}_{\text{об2}}} \quad (6.5)$$

Пользуясь соотношением

$$\text{Т}_{\text{об1}}\text{e}^{-\frac{t}{\text{Т}_{\text{об2}}}} = \text{Т}_{\text{об2}}\text{e}^{-\frac{t_{\text{П}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}}, \quad (6.6)$$

определенным из уравнения $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$, получаем

$$1 - x = \frac{\text{Т}_{\text{об1}} + \text{Т}_{\text{об2}}}{\text{Т}_{\text{об1}}} \text{e}^{-\frac{t_{\text{П}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}} \quad (6.7)$$

и

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) t_{\text{П}} = \frac{\text{e}^{-\frac{t_{\text{П}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}. \quad (6.8)$$

Из уравнения подкасательной (2. 7) находим

$$t_{\text{П}.k} = \frac{1-x_{\text{П}}}{\left(\frac{dx}{dt}\right)t_{\text{П}}} = \text{Т}_{\text{об1}} + \text{Т}_{\text{об2}}, \qquad (6.9)$$

что и следовало доказать.

Для определения значений постоянных времени напишем уравнение подкасательной в точке $2t_{\text{П}}$

$$1 - x(2t_{\text{П}}) = \frac{T_{\text{об1}}^2 + \text{Т}_{\text{об1}}\,\text{Т}_{\text{об2}} + T_{\text{об2}}^2}{T_{\text{об1}}^2}\,\text{e}^{-2\frac{t_{\text{П}}}{\text{Т}_{\text{об1}}}}. \qquad (6.10)$$

Введем обозначения: $a = 1 - x_{\text{П}}$ и $b = 1 - x(2t_{\text{П}})$. Из выражения (6.7) и (6.10) получаем (принимая, что $\text{Т}_{\text{об1}} > \text{Т}_{\text{об2}}$)

$$\frac{\text{Т}_{\text{об1}}}{\text{Т}_{\text{об1}} + \text{Т}_{\text{об2}}} = 0{,}5 + \sqrt{\frac{b}{a^2} - 0{,}75}. \qquad (6.11)$$

Таким образом, определить постоянные времени объекта второго порядка по кривой разгона можно следующим способом. Проводят касательную в точке перегиба кривой разгона и определяют сумму постоянных времени. Далее находят величину b в момент времени $t = 2t_{\text{П}}$, где $t_{\text{П}}$ – абсцисса точки перегиба, и величину a в момент времени $t = t_{\text{П}}$. Отношение большей постоянной времени к сумме постоянных времени находят по формуле (6.11).

Если переходная функция объекта второго порядка монотонная, но при рассмотрении протекающих в этом объекте физических процессов делается вывод о невозможности его расчленения на два объекта первого порядка, то величины $\text{Т}_{\text{об1}}$ и $\text{Т}_{\text{об2}}$, найденные описанным выше способом, подставляются непосредственно в уравнение объекта

$$T_{\text{об20}}^2 \frac{d^2x}{dt^2} + \text{Т}_{\text{об10}} \frac{dx}{dt} + x = x_{\text{вх}}, \qquad (6.12)$$

где

$$T_{об20}^2 = T_{об1} T_{об2} \text{ и } T_{об10} = T_{об1} + T_{об2}.$$

6.3. Определение динамических характеристик объекта по данным его нормальной эксплуатации

Сложные металлургические процессы и ограниченные возможности определения их динамических характеристик путем внесения пробных воздействий вызывают необходимость использовать методы идентификации, позволяющие определять статические и динамические характеристики по данным, полученным в процессе нормальной эксплуатации металлургических агрегатов.

Для этой цели в настоящее время широко используются методы математической статистики и статистической динамики, которые позволяют найти соотношения между выходными и входными координатами объекта и некоторыми статическими характеристиками исследуемых случайных процессов.

Рассмотрим одномерный объект, на вход которого поступает случайная функция $x_{вх}(t)$, которой на выходе соответствует случайная функция *x(t)*. Уравнение связи между выходной и входной функциями имеет вид

$$x(t) = \int_0^t x_{вх}(t - \theta)h(\theta)d\theta, \qquad (6.13)$$

где $h(\theta)$– импульсная переходная (весовая) функция; $x_{вх}(t - \theta)h(\theta)$ – вклад сигнала, полученного в момент времени $(t - \theta)$, в образование выходной координаты $x(t)$.

Объект управления, идентифицированный уравнением (6.13), должен удовлетворять следующим условиям

1. Реакция объекта на входной импульс не зависит от момента приложения этого импульса, а зависит только от времени,

прошедшего после его подачи, т. е. объект должен быть стационарным, а уровень внутренних шумов пренебрежимо мал по сравнению с влиянием входных воздействий.

2. Если на вход подается несколько импульсов в различные моменты времени, то каждый из них вносит свой вклад в формирование выходной координаты, причем этот вклад пропорционален амплитуде импульса и времени, прошедшему от момента его приложения (т. е. должен быть справедлив принцип суперпозиции реакции объекта на ряд входных сигналов). Это условие определяет класс линейных объектов.

Только в том случае, если исследуемый объект удовлетворяет приведенным выше условиям, уравнение (6.13) может быть принято в качестве его математической модели.

В реальных производственных условиях часто оказывается невозможным подавать на вход объекта пробные сигналы. В этих случаях удобно использовать методы определения импульсной переходной функции по статическим характеристикам входной и выходной случайных функций при условии стационарности этих функций.

Взаимокорреляционная функция двух случайных стационарных процессов по определению равна

$$R_{x,x_{\text{вх}}}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T x(t+\tau)x_{\text{вх}}(t)dt. \qquad (6.14)$$

Если подставить в уравнение (6.14) значение $x(t)$, полученное из уравнения (6.13), то

$$6.\ R_{x,x_{\text{вх}}}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T \int_0^\infty x_{\text{вх}}(t-\theta+\tau)h(\theta)d\theta\, x_{\text{вх}}(t)dt\,. \qquad (6.15)$$

Изменим порядок интегрирования

$$R_{x,x_{\text{вх}}}(\tau) = \int_0^\infty \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T x_{\text{вх}}(t-\theta+\tau)x_{\text{вх}}(t)dt\ h(\theta)d\theta. \qquad (6.16)$$

Выражение

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T x_{\text{вх}}(t-\theta+\tau)x_{\text{вх}}(t)dt \qquad (6.17)$$

представляет собой автокорреляционную функцию входного сигнала, так как вследствие стационарности входной функции это значение не зависит от момента начала отсчета времени, поэтому

$$R_{x,x_{\text{вх}}}(\tau)=\int_0^\infty Rx_{\text{вх}}(\tau-\theta)h(\theta)d\theta. \qquad (6.18)$$

Зависимость (6.18) представляет основное уравнение идентификации объекта с помощью его статических характеристик. Из допущений, сделанных при выводе этого уравнения, следует, что оно справедливо для линейных, стационарных объектов, при эргодическом характере входного сигнала, что, строго говоря, на практике может встретиться достаточно редко.

Основное уравнение идентификации было предложено Винером и Хопфом, и поэтому в литературе его части называют *уравнением Винера-Хопфа*.

Решить уравнение (6.18) относительно импульсной переходной функции можно различными методами. В частности, его можно решить с помощью интеграла Фурье, алгебраических методов и численных методов с использованием ЭЦВМ.

Известны достаточно простые методы анализа и синтеза систем автоматической стабилизации и управления, основанные на использовании частотных характеристик, поэтому представляет определенный интерес решение уравнения идентификации в частотной области.

Контрольные вопросы:

1. В чем отличие одномерных систем от многомерных?
2. В чем отличие активного эксперимента от пассивного при исследовании системы?
3. Что такое *«кривая разгона»?*
4. Назовите динамические параметры статического объекта первого порядка.
5. Понятие автокорреляционной функции входного сигнала.

7. СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В практике конструирования и эксплуатации САР встречаются два основных типа задач:

1) задача синтеза САР, состоящая в выборе аппаратуры – измерительного элемента, регулятора, исполнительного механизма, регулирующего органа на основе известного уравнения объекта регулирования;

2) задача анализа САР, состоящая в определении переходных процессов и качества регулирования для заданной САР.

Обе задачи тесно связаны между собой и имеют много общего в методах решения. Однако задача синтеза является более сложной из-за многочисленности и неоднозначности требований, предъявляемых к САР, которые могут удовлетворяться различными способами.

Синтез промышленных САР несколько упрощается тем, что, как правило, хотя бы приближенно известны статические и динамические свойства объектов управления и применительно к ним разработана целая гамма приборов и регулирующих устройств, реализующих различные законы регулирования. При этих условиях задача синтеза САР сводится к выбору приборов и регуляторов из имеющейся номенклатуры и к определению настроек регуляторов. После синтеза выполняют анализ САР с целью проверки правильности проведенных решений.

Может иметь место вариант, когда ни один из серийно выпускаемых регуляторов не удовлетворяет требуемому качеству регулирования на заданном объекте. В этом случае в задачи синтеза входит определение вида и параметров корректирующих элементов или новых регуляторов, которые обеспечат реализацию поставленной задачи.

Вся совокупность средств измерительной и регулирующей техники объединена государственной системой приборов (ГСП), при помощи которой упорядочивается номенклатура выпускаемых приборов. В общую ГСП входят ГСП контроля и регулирования технологических процессов, ГСП контроля времени и др.

В ГСП контроля и регулирования технологических процессов входят:

1) система электрических, пневматических и гидравлических приборов со сквозным унифицированным сигналом;

2) нормализованные ряды приборов и устройств локального применения, в том числе регуляторы прямого действия, датчики релейного типа и сигнализаторы;

По функциональному признаку приборы с унифицированным сигналом делятся на:

– устройства для получения и первичной обработки информации (датчики);

– устройства для преобразования и дистанционной передачи контрольной информации;

– устройства для обработки, хранения и сравнения контрольной информации и выработки командной информации (в том числе регуляторы);

– устройства для преобразования и дистанционной передачи командной информации;

– устройства, воздействующие на технологический процесс в соответствии с полученной командной информации (исполнительные механизмы);

В качестве унифицированных служат сигналы: переменного тока напряжением 1 – 0 – 1 или 0–2 В (50 Гц); постоянного тока силой 0–5 мА; частотной с частотой 4–8 кГц; пневматическим давлением 20–100 кН/м^2(0, 2–1 кг/см^2).

7.1. Регуляторы и законы регулирования

Основные структуры аналоговых и цифровых регуляторов. Рассмотрим теорию и практику проектирования структуры регуляторов и их компьютерную реализацию, обеспечивающую решение поставленных задач управления.

Регуляторы можно строить на основе как аналоговой, так и цифровой техники. Для проектирования цифрового и аналогового регуляторов требуются разные математические методы.

При цифровом управлении сигнал аналогового датчика должен быть представлен в цифровом виде с помощью процедуры

квантования и аналогово-цифрового преобразования. Этот процесс называется *оцифровкой*. Ввод аналоговых сигналов в компьютер осуществляется через мультиплексор. Это устройство, которое имеет несколько входов и один выход. Мультиплексирование позволяет компьютеру в любой момент времени выбирать, сигнал какого датчика необходимо считать.

Иначе говоря, мультиплексор можно рассматривать как переключатель, соединяющий компьютер в каждый момент времени только с одним датчиком (рис. 7.1). Мультиплексор может быть либо электромеханическим, либо электронным.

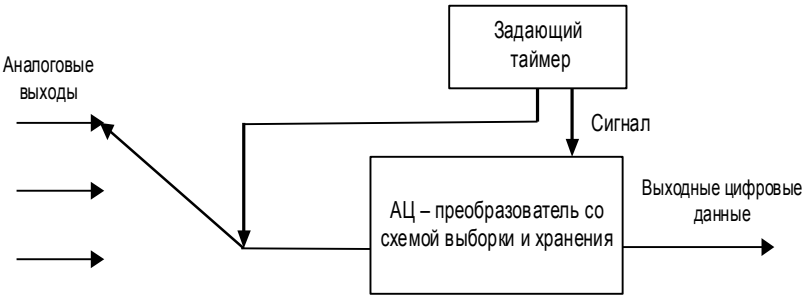


Рис. 7.1. Мультиплексирование сигнала вычислительной информации

Проектирование аналоговых и дискретных регуляторов. Регулятор в составе цифровой системы управления является дискретным. Однако большинство динамических систем описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, которые выводятся из физических и других законов, например, сохранение массы и энергии. Аналоговый регулятор можно спроектировать на основе описания непрерывной системы с помощью передаточной функции или в пространстве состояний.

Для того чтобы аналоговый регулятор реализовать компьютерными средствами, его модель необходимо подвергнуть процедуре квантования. При цифровом управлении можно идти другим путем, а именно: использовать в качестве исходной дискретную динамическую модель процесса, а затем спроектировать регулятор непосредственно на этой модели.

Анализ непрерывных и дискретных линейных систем выполняется сходным образом.

В данном параграфе предполагается, что все линейные регуляторы с одним входом и одним выходом можно представить в обобщенном виде

$$U(kh) = -r_1 U[(k-1)h] - \ldots - r_n U[(k-1)h] + t_0 U_c(kh) + t_1 U_c(kh) + t_1 U_c[(k-1)h] + \ldots$$
$$\ldots + t_n U_c[(k-n)h] - S_0 y(kh) - S_1 y[(k-1)h] - \ldots - S_n y[()k-n]h \quad ,$$

где U – выход регулятора (управляющая переменная процесса);

U_C – заданное (опорное) значение;

У – выходной сигнал технологического процесса;

n – порядок регулятора (обычно не превышает 2);

r_i, t_t, S_i – коэффициенты регулятора.

Автоматические регуляторы, применяемые в системах автоматического регулирования классифицируется по следующим признакам:

1. По параметру регулирования – регуляторы температуры, давления, расхода, соотношения потоков и т. п.

2. По характеру воспроизведения регулируемой величины – стабилизирующие, программные, следящие и самонастраивающиеся.

3. По способу действия – прямого и непрямого действия.

4. По виду энергии, используемой для создания управляющего воздействия, – электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные.

5. По характеру изменения управляющего сигнала во времени- регуляторы непрерывного действия, релейные и импульсные.

6. По закону регулирования, т. е. по виду уравнения, связывающего отклонение регулируемого параметра с перемещением регулирующего органа.

Выбор конкретного вида регулятора определяется:

1) статическим и динамическими свойствами объекта регулирования;

2) требуемым качеством регулирования;

3) условиями согласования регулятора со смежной аппаратурой;

4) параметрами окружающей среды – температурой, влажностью, вибрацией, наличием магнитных полей, химической агрессивностью, взрывоопасностью и т. п;

5) надежностью;

6) условиями обслуживания и ремонта;

7) экономическими показателями;

8) номенклатурой выпускаемых приборов.

Например, если требуется дополнительно оснастить узлом автоматического регулирования давления существующий автоматизированный агрегат, расположенный во взрывоопасном помещении, то в этом случае применяют пневматические или гидравлические приборы, причем в целях унификации аппаратуры целесообразно применять приборы такого же типа, как и установленные для других узлов регулирования данного агрегата. При создании новой системы автоматического регулирования желательно комплектовать ее приборами агрегатных унифицированных систем, которые включают в себя отдельные типовые блоки со стандартизированными входными и выходными сигналами, позволяющие составлять разнообразные варианты схем регулирования. Такой подход облегчает проектирование, монтаж, наладку и эксплуатацию систем автоматики и предопределяет их экономическую эффективность.

При выборе приборов по виду используемой для создания управляющего воздействия энергии можно руководствоваться следующим сравнительным анализом преимуществ и недостатков различных регуляторов.

Гидравлические регуляторы

Преимущества:

1) большая надежность;

2) большие диапазоны плавного регулирования скоростей исполнительных механизмов;

3) большие перестановочные усилия при малых габаритах;

4) простата эксплуатации;

5) высокий к. п. д.

Недостатки:

1) сравнительно небольшой радиус действия;

2) огнеопасность (если рабочая среда – масло);

3) зависимость рабочих характеристик от температуры;

4) необходимость иметь рабочие и резервные насосы;

5) возможность загрязнения системы из-за отложений примесей;

6) повышенная инерционность регуляторов при длинных соединительных линиях.

Пневматические регуляторы

Преимущества:

1) большие диапазоны плавного регулирования скоростей исполнительных механизмов;

2) упрощенные по сравнению с гидравлическими системами командные линии, так как не требуются обратные трубопроводы;

3) относительно большой радиус действия;

4) пожаробезопасность.

Недостатки:

1) необходимость установки фильтров и влагопоглощающих устройств для тщательной очистки воздуха;

2) зависимость рабочих характеристик от колебаний температуры и давления внешней среды;

3) необходимо иметь рабочие и резервные компрессоры при отсутствии централизованных линий сжатого воздуха;

4) нечувствительность к небольшим импульсам из- за сжимаемости воздуха как рабочей среды.

Электрические регуляторы

Преимущества:

1) питание от централизованных электрических сетей без специальных источников электроснабжения;

2) практически неограниченный радиус действия;

3) независимость рабочих характеристик от температуры и давления окружающей среды;

4) легкость монтажа и демонтажа;

5) значительная стандартизация и легкая заменяемость деталей;

6) возможность создания систем регулирования без подвижных частей.

Недостатки:

1) меньшая возможность плавного регулирования скоростей исполнительных механизмов;

2) пониженная надежность аппаратуры из-за наличия контактов в ряде элементов и хрупкости реле, ламп и т. п.;

3) сравнительная сложность наладки и эксплуатации, требующая высокой квалификации обслуживающего персонала;

4) относительно низкий к. п. д.

Комбинированные регуляторы сочетают в себе свойства объединяемых систем.

Одним из основных условий, предъявляемых к регулятору, является обеспечение требуемого качества регулирования. Независимо от конструктивного выполнения регулятора качество осуществляемого им процесса регулирования определяется законом регулирования.

Регуляторы непрерывного действия в соответствии с законами регулирования делятся на следующие типы:

1. Пропорциональный (П) регулятор, выходная величина $x_{\text{вых.р}}$ которого связана с входной величиной $x_{\text{вх.р}}$ соотношением

$$x_{\text{вых.р}} = k_p x_{\text{вх.р}}, \tag{7.1}$$

где k_p – коэффициент передачи (усиления) П-регулятора, определяющий его единственную настройку.

2. Интегральный (И) регулятор с законом регулирования:

$$x_{\text{вых.р}} = k_p \int_{t_1}^{t_2} x_{\text{вх.р}} dt. \tag{7.2}$$

где k_p – коэффициент передачи И-регулятора, характеризующий скорость движения исполнительного механизма при отклонении входной величины, так как из уравнения (7. 2) следует

$$\frac{dx_{\text{вых.р}}}{dt} = k_p x_{\text{вх.р}} \,. \tag{7.3}$$

Коэффициентом передачи k_p определяется единственная настройка И-регулятора. Скорость перемещения исполнительного механизма практически ограниченна, и поэтому соотношение (7. 3) справедливо лишь при отклонениях входной величины, меньших некоторых максимального уровня. При нормальных условиях работы контура регулирования это условие соблюдается, и соблюдается закон больше предельного значения. Такой регулятор следует рассматривать как релейный с постоянной скоростью перемещения исполнительного механизма, что приведено далее.

3. Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, который называется также *изодромным*, действующий по следующему закону регулирования:

$$x_{\text{вых.р}} = k_p x_{\text{вх.р}} + k_{p.\text{и}} \int_{t_1}^{t_2} x_{\text{вх.р}} dt = k_p \left(x_{\text{вх.р}} + \frac{1}{\text{Т}_\text{и}} \int_{t_1}^{t_2} x_{\text{вх.р}} dt \right), \tag{7.4}$$

где k_p – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора; $k_{p.\text{и}}$ – коэффициент передачи интегральной части; $\text{Т}_\text{и}$ – время удвоения (изодрома), равное $\dfrac{k_p}{k_{p.\text{и}}}$.

4. Пропорционально-интегральный-дифференциальный (ПИД) регулятор, который называется также *изодромным* с предварением, имеющий закон регулирования

5.

$$x_{\text{вых.р}} = k_p x_{\text{вх.р}} + k_{p.\text{и}} \int_{t_1}^{t_2} x_{\text{вх.р}} dt + k_{\text{р.Д}} \frac{dx_{\text{вх.р}}}{dt} =$$

$$= k_p \left(x_{\text{вх.р}} + \frac{1}{\text{Т}_\text{и}} \int_{t_1}^{t_2} x_{\text{вх.р}} dt + \text{Т}_\text{П} \frac{dx}{dt} \right), \tag{7.5}$$

где k_p – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора; $k_{p.\text{Д}}$ – коэффициент передачи дифференциальной части;

$T_и$ – время удвоения, равное $\frac{k_p}{k_{p.и}}$; $T_Д$ – время предварения, равное $\frac{k_{p.Д}}{k_p}$.

Данные регуляторы имеют три настройки, определяемые величинами k_p, $T_и$, $T_П$.

Графическое изображение рассмотренных законов регулирования показано на рис. 7. 2.

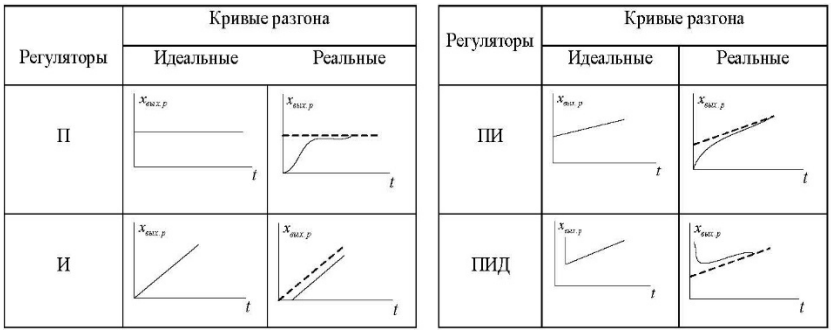


Рис. 7.2. Графики непрерывных законов регулирования

Переходные функции регуляторов представляют перемещение во времени вала исполнительного механизма и регулирующего органа после приложения ко входу регулятора ступенчатого возмущения. Нетрудно видеть, что перемещение регулирующего органа ПИ-регулятором складывается из перемещении, обусловливаемых его пропорциональной и интегральной частями (7.1), (7.2), (7.4), а перемещение регулирующего органа ПИД-регулятором может быть разложено на три составляющих в соответствии с уравнением (7.5).

Как следует из уравнений законов регулирования, передаточные функции регуляторов имеют вид:

П-регулятора

$$W_П(p) = k_p; \tag{7.6}$$

И-регулятора

$$W_{\text{И}}(p) = \frac{k_p}{p}. \qquad (7.7)$$

ПИ- регулятора

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{k_p(\text{Т}_{\text{И}}p+1)}{\text{Т}_{\text{И}}p}; \qquad (7.8)$$

ПИД- регулятора

$$W_{\text{ПИД}}(p) = \frac{k_p(\text{Т}_{\text{ПР}}\text{Т}_{\text{И}}p^2+\text{Т}_{\text{П}}p+1)}{\text{Т}_{\text{И}}p}. \qquad (7.9)$$

Регуляторы релейного действия подразделяются на:

1) Двухпозиционные и трехпозиционные ($\text{Р}_{\text{П}}$);

2) Регуляторы с постоянной скоростью исполнительного механизма ($\text{Р}_{\text{с}}$).

Характер изменения стабилизируемой величины $x_{вых.\ об}$ около заданного значения $x_з$ и управляющего воздействия $x_{вх.\ р}$ во времени иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 7.3.

Соответственно законы регулирования выражаются следующими соотношениями:

При двухпозиционном регулировании без зоны нечувствительности (рис. 7. 3, *а*)

$$\begin{cases} x_p = x_{p\,min} \text{ при } x > x_{\text{з}} \\ x_p = x_{p\,max} \text{ при } x < x_{\text{з}} \end{cases}. \qquad (7.10)$$

В частном случае $x_{p\,min} = 0$.

При двухпозиционном регулировании с зоной нечувствительности *2b* (рис. 7. 3, *б*)

$$\begin{cases} x_p = x_{p\,min} \text{ при } x > x_{\text{з}} + b \\ x_p = x_{p\,max} \text{ при } x < x_{\text{з}} - b \end{cases}. \qquad (7.11)$$

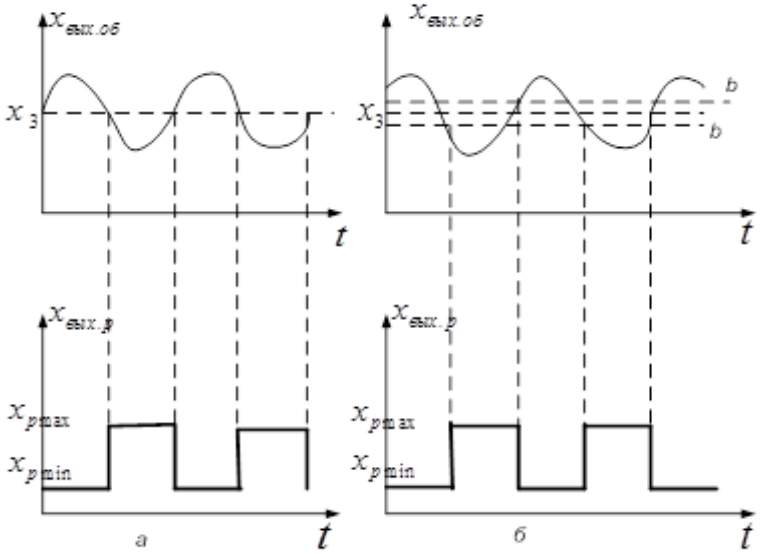


Рис. 7.3. Графики релейных законов регулирования

7.2. Показатели качества регулирования

Условиями работоспособности системы автоматического регулирования являются ее устойчивость и обеспечение необходимого качества регулирования. Устойчивость конкретной системы с заданным объектом регулирования и выбранным регулятором определяется на основе критериев устойчивости или путем моделирования. Анализ устойчивости является первым этапом исследования системы и выполняется обычно для вновь проектируемых систем регулирования, динамические свойства которых недостаточно изучены.

Для хорошо изученных систем автоматического регулирования промышленных объектов анализ устойчивости исключается, если заранее известно, что эти системы принадлежат к классу устойчивых. В таких случаях анализ работоспособности системы исчерпывается определением качества регулирования.

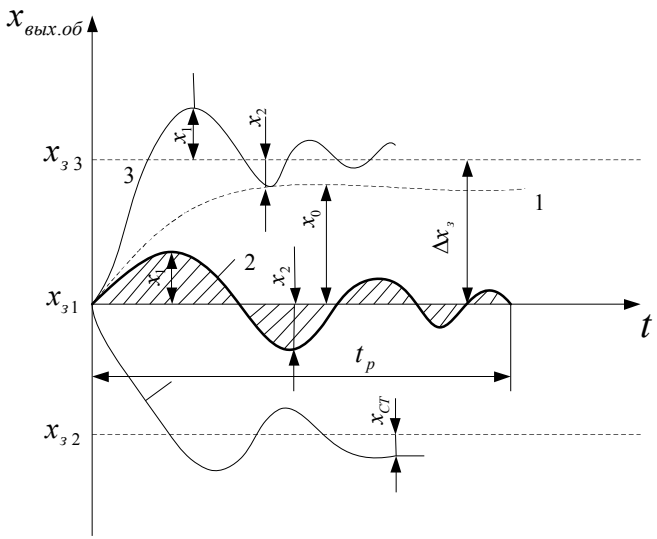


Рис. 7. 4. Показатели качества регулирования:
1 – кривая разгона; 2 – процесс регулирования при нанесении возмущения по нагрузке; 3 – процесс регулирования при нанесении возмущения по заданию без статической ошибки;
4 – процесс регулирования при нанесении возмущения по заданию со статической ошибкой

Основные показатели качества регулирования приведены на рис. 7.4, ими являются:

1. *Статическая ошибка* или остаточное отклонение x_{CT} – это отклонение регулируемой величины от заданного значения, которое остается после окончания процесса регулирования. Кривая *4* на рис. 7.4 соответствует процессу регулирования при возмущении по заданию. Первоначальное заданное значение регулируемой величины $x_{з1}$ в момент $t = 0$ было изменено на $x_{з2}$. Остаточное отклонение характерно для регуляторов пропорционального действия.

2. *Максимальное динамическое отклонение* x_1, равное первому выбегу регулируемой величины, обычно бывает максимальным. Оно зависит от динамических свойств объекта, вида возмущения, закона регулирования и настроек регулятора.

Степень воздействия регулятора на отклонение регулируемой величины при нанесении возмущения оценивается динамическим коэффициентом регулирования $R_Д$, который для статических объектов равен

$$R_Д = \frac{x_1}{x_0} = \frac{x_1}{k_{об}\Delta x_{вх.об}}, \quad (7.12)$$

где x_0 – отклонение регулируемой величины при внесении равноценного возмущения и при отсутствии регулятора; $k_{об}$ – коэффициент передачи объекта; $\Delta x_{вх.об}$ – возмущение.

Для астатических объектов, не обладающих свойством самовыравнивания, установившееся значение x_0 отсутствует и динамический коэффициент регулирования определяется выражением

$$R_Д = \frac{x_1 T_{об}}{\tau_{об}\Delta x_{вх.об}}. \quad (7.13)$$

где $\Delta x_{вх.об}$ – ступенчатое возмущение; $\tau_{об}$ – запаздывание астатического объекта; $T_{об}$ – условная постоянная времени астатического объекта.

3. *Перерегулирование* η – это отношение амплитуд двух последующих выбегов регулируемой величины при возмущении по заданию, которое характеризует колебательность переходного процесса при регулировании

$$\eta = \frac{x_2}{x_1} \quad (7.14)$$

или отношения амплитуды первого выбега к изменению задания при возмущении по заданию

$$\eta = \frac{x_1}{\Delta x_3}. \quad (7.15)$$

Очевидно, что в случае возмущения по нагрузке $\eta = 0$ при апериодическом процессе регулирования; $0 < \eta < 1$ при колебательном затухающем переходном процессе; $\eta = 1$ при колебательном незатухающем процессе; $\eta > 1$ при расходящихся колебаниях.

Величина перерегулирования зависит от динамических свойств объекта и регулятора, т. е. от закона регулирования и настроек регулятора.

4. *Время регулирования* $t_{p,}$ численно равное продолжительности переходного процесса, т. е. времени от момента внесения возмущения, приводящего к отклонению регулируемой величины от задания, до ее возвращения к заданному значению с точностью, определяемой зоной нечувствительности измерительного и регулирующего комплектов аппаратуры.

Время регулирования зависит от динамических свойств объекта, закона регулирования и настроек регулятора. Однако оно не может быть меньше некоторого минимального значения, зависящего в первую очередь от динамических свойств объекта.

5. *Интегральные показатели* качества регулирования, которые численно равны определенным интегралам во времени от некоторых функций отклонений регулируемой величины

$$I_n = \int_0^\infty x_{\text{вых.об}}^n \, dt \,, \qquad (7.16)$$

где n – показатель степени функции отклонений.

Интегралы такого вида численно равны площади, заключенной между функцией x^n и осью времени (заштрихована на рис. 7.4) и могут быть потому оценкой отклонений величины в процессе регулирования. Интегральный показатель качества при $n = 1$ может быть применим только для апериодических процессов регулирования, так как при колебательных процессах площади, расположенные выше и ниже оси времени, взаимно уничтожаются и интеграл не отражает величины отклонений. Наиболее распространенным является квадратичный интегральный показатель

$$I_2 = \int_0^{\infty} x^2_{\text{вых.об}}\, dt, \qquad (7.17)$$

который характеризует отклонения при любом виде переходного процесса.

6. Показатели качества при позиционном регулировании, сопровождающемся автоколебательном характером изменения регулируемой величины. Ими являются амплитуда и период автоколебаний. При несимметричном харатере колебаний регулируемой величины относительно заданного значения $x_з$ дополнительным показателем качества регулирования служит отклонение среднего значения x от $x_з$.

Требуемое качество регулирования зависит от условий протекания технологического процесса и работы агрегата. В каждом конкретном случае выявляются наиболее существенные показатели качества регулирования, соблюдение которых обеспечивает рациональное функционирование производственного процесса. В некоторых случаях решающее значение имеет максимальное динамическое отклонение параметра, в других – интегральный показатель или время регулирования.

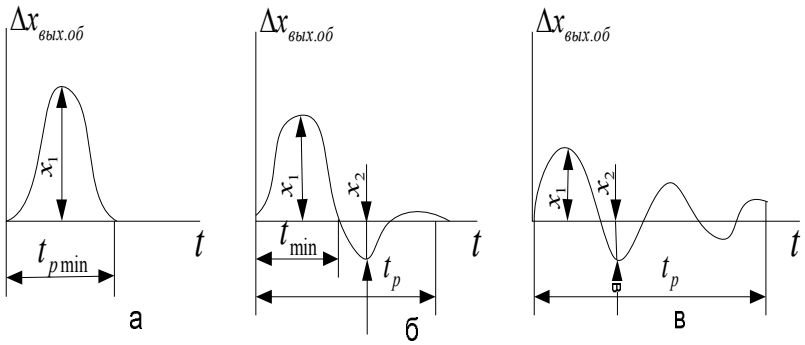


Рис. 7. 5. Типовые переходные процессы

Качество регулирования определяется видом переходного процесса. Можно рекомендовать три типа процессов регулирования, показанных на рис. 7.5, один из которых, как правило, удовлетворяет конкретным требованиям регулирования промышленного объекта:

1. Апериодический процесс с минимальным временем регулирования, (рис. 7. 5, *а)*;

2. Процесс с 20 %-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода колебаний (рис. 7. 5, *б)*;

3. Процесс с минимальным квадратичным интегральным показателем, см. формулы (7.17) и рис. 7.5, *в*, что соответствует 40– 45 % перерегулированию.

Апериодический процесс с минимальным временем регулирования характеризуется минимальным регулирующим воздействием и сравнительно большим отклонением x_1. Процесс с 20 %-ным перерегулированием имеет меньшее значение x_1, а процесс с минимальным квадратичным интегральным показателем имеет наименьшее динамическое отклонение x_1 при наибольшем перерегулировании и времени регулирования.

Показатели качества регулирования типовых переходных процессов при использовании серийных регуляторов на объектах с различными динамическими свойствами детально изучены. На рис. 7. 6 приведены графики для определения остаточного отклонения x_{CT} , свойственного П-регулятором, на статических объектах при различных переходных процессах.

Остаточное отклонение увеличивается с увеличением чистого запаздывания объекта $\tau_{об}$, а для одного и того же объекта оно максимально при апериодическом переходном процессе (кривая *1*).

Графики рис. 7.7 показывают, как изменяется динамический коэффициент регулирования в функции инерционных свойств статических объектов и закона регулирования для типовых переходных процессов.

Макисамальные значения динамического коэффициента получаются при использовании И-регулятора (кривая *1*), минимальные – при использовании ПИД-регулятора (кривая *4*). Значения динамического коэффициента для астатических объектов приведены в табл. 7.2.

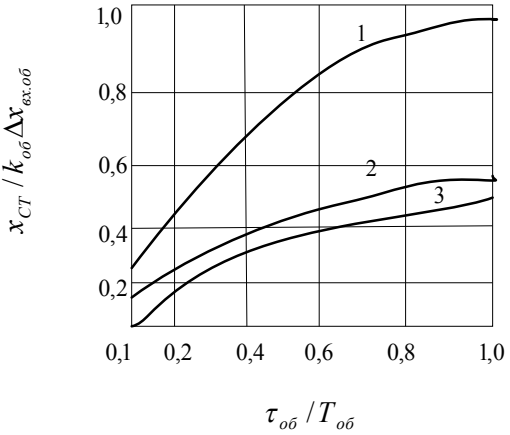


Рис. 7. 6. Остаточное отклонение, свойственное П-регуляторам на статических объектах при:
1– апериодическом переходном процессе; 2 – процессе с 20 %-ным перерегулированием; 3 – процессе с минимумом квадратичного интегрального критерия

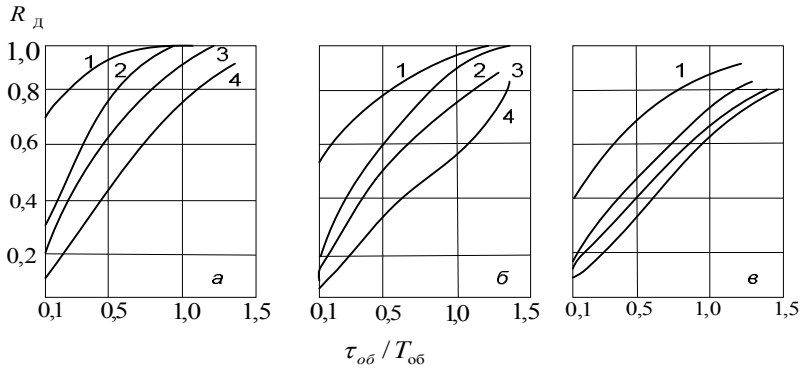


Рис. 7.7. Динамические коэффициенты регулирования на статических объектах:
1– 4 соответственно для И, П, ПИ, ПИД- регуляторов; а – при апериодическом переходном процессе; б – при 20 %-ном перерегулировании; в – при минимуме квадратичного интегрального критерия

На рис. 7.8 представлены графики, показывающие зависимость между динамическими свойствами объекта и временем регулирования для статических объектов и различных переходных процессов.

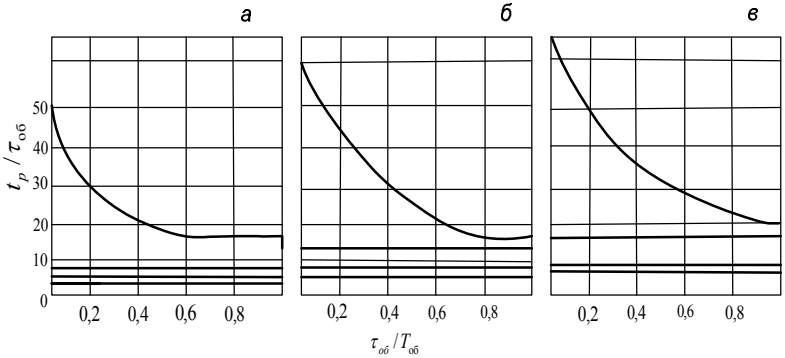


Рис. 7.8. Время регулирования на статических объектах (обозначения смотрим на рис. 7.7)

При использовании И-регулятора время регулирования уменьшается с увеличением чистого запаздывания в объекте (кривая *1*); при использовании П, ПИ, ПИД-регуляторов оно практически не меняется в указанных пределах изменения отношения $\frac{\tau_{об}}{T_{об}}$. Наименьшее время регулирования получают при применении П-регулятора. Относительное время регулирования на астатических объектах приведено в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Динамический коэффициент (числитель) и относительное время регулирования (знаменатель) на астатических объектах

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	Апериодический	20 %-ным перерегулирование	$\min\int x^2_{\text{вых.об}}\, dt$
П	2, 9/6	1,4/8	–
ПИ	1,4/14	1,3/16	0,9/18
ПИД	1,3/9	1,1/12	0,8/13

7.3. Выбор регулятора (закона регулирования) и определение его настроек

Основными исходными данными для выбора регулятора и определения его настроек являются характеристики объекта регулирования и требуемое качество регулирования. Для выбора регулятора необходимо знать:

1) Статические и динамические параметры объекта: коэффициент передачи объекта $k_{об}$; чистое запаздывание $\tau_{об}$; постоянную времени $T_{об}$; если $k_{об}$ меняется в пределах эксплуатационных режимов агрегата, то следует брать его максимальное значение;

2) Максимально возможное значение возмущения $\Delta x_{вх.об}$, выраженное в прцентах хода регулирующего органа;

3) Допустимое динамическое отклонение x_1;

4) Допустимое или желательное перерегулирование $\frac{x_2}{x_1}$;

5) Допустимую статическую ошибку (остаточное отклонение) $x_{СТ}$;

6) Допустимое время регулирования t_p.

Параметры объекта определяют экспериментально на данном или аналогичном агрегате или ориентировочно методом расчета. Допустимые значения показателей качества регулирования определяются требованиями технологического процесса.

Тип регулятора ориентировочно можно выбрать из следующих рекомендаций

Величина $\frac{\tau_{об}}{T_{об}}$	Регулятор
<0, 2	Релейный
<1, 0	Непрерывный
>1, 0	Импульсный или непрерывный

Регуляторы непрерывного действия

Выбор закона регулирования для непрерывных регуляторов состоит в следующем:

а) рассчитывают динамический коэффициент регулирования $R_Д$ по формулам (7. 12) или (7. 13);

б) по графикам, приведенным на рис. 7.6 и в табл. 7.2, выбирают простейший регулятор, обеспечивающий расчетное значение динамического коэффициента при заданных параметрах $\frac{\tau_{об}}{T_{об}}$;

в) по графикам, приведенным на рис. 7.5 и в табл. 7.2, проверяют, обеспечивается ли заданное время регулирования; если это требование не соблюдается, то выбирают более сложный регулятор, добиваясь обеспечения заданного времени регулирования;

г) для П-регулятора по графику, приведенному на рис. 7.5, *а*, определяют статическую ошибку, и если она больше допустимой, то вместо П-регулятора выбирают ПИ-регулятор и повторяют проверку времени регулирования.

Таблица 7.3

Формулы для определения настроек регуляторов на статических объектах

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	Апериодический	20 %-ным перерегулирование	$\text{in}\int x^2_{\text{вых.об}}\,dt$
И	$k_{p1} = \frac{1}{4,5k_{об}T_{об}}$	$k_{p1} = \frac{1}{1,7k_{об}T_{об}}$	$k_{p1} = \frac{1}{1,7k_{об}\tau_{об}}$
П	$k_p = \frac{0,3}{k_{об}\tau_{об}\ /T_{об}}$	$k_p = \frac{0,7}{k_{об}\tau_{об}\ /T_{об}}$	$k_p = \frac{0,9}{k_{об}\tau_{об}\ /T_{об}}$
ПИ	$k_p = \frac{0,6}{k_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_И = 0,6T_{об}$	$k_p = \frac{0,7}{k_{об}\tau_{об}\ /T_{об}}$ $T_И = 0,7T_{об}$	$k_p = \frac{1,0}{k_{об}\tau_{об}\ /T_{об}}$ $T_И = T_{об}$
ПИД	$k_p = \frac{0,95}{k_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_И = 2,4\tau_{об}$ $T_{пр} = 0,4\tau_{об}$	$k_p = \frac{1,2}{k_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_И = 2,0\tau_{об}$ $T_{пр} = 0,4\tau_{об}$	$k_p = \frac{1,4}{k_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_И = 1,3\tau_{об}$ $T_{пр} = 0,5\tau_{об}$

Приведенные выше характеристики процессов регулирования позволяют выбрать регулятор и без предварительного задания типа переходного процесса, лишь по значениям x_1, $x_{СТ}$, $t_р$. При этом по графикам (см. рис. 7.5) выбирают тип регулятора и переходный процесс, удовлетворяющие исходным требованиям, и выполняют проверки по другим показателям.

Таблица 7.4

Формулы для определения настроек регуляторов на астатических объектах

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	Апериодический	20 %-ным перерегулирование	$\min\int x^2_{\text{вых.об}}\,dt$
И	$k_p = \dfrac{0{,}4}{k_{\text{об}}/T_{\text{об}}}$	$k_p = \dfrac{0{,}7}{k_{\text{об}}/T_{\text{об}}}$	-
ПИ	$k_p = \dfrac{0{,}4}{\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}$ $T_{\text{И}} = 6\tau_{\text{об}}$	$k_p = \dfrac{0{,}7}{\tau_{\text{об}}\ /T_{\text{об}}}$ $T_{\text{И}} = 3\tau_{\text{об}}$	$k_p = \dfrac{1}{\tau_{\text{об}}\ /T_{\text{об}}}$ $T_{\text{И}} = 4\tau_{\text{об}}$
ПИД	$k_p = \dfrac{0{,}6}{\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}$ $T_{\text{И}} = 5\tau_{\text{об}}$ $T_{\text{пр}} = 0{,}2\tau_{\text{об}}$	$k_p = \dfrac{1{,}2}{k_{\text{об}}\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}$ $T_{\text{И}} = 2\tau_{\text{об}}$ $T_{\text{пр}} = 0{,}4\tau_{\text{об}}$	$k_p = \dfrac{1{,}4}{k_{\text{об}}\tau_{\text{об}}/T_{\text{об}}}$ $T_{\text{И}} = 1{,}6\tau_{\text{об}}$ $T_{\text{пр}} = 0{,}5\tau_{\text{об}}$

После выбора регулятора (закона регулирования) необходимо определить его параметры настройки, обеспечивающие требуемое качество регулирования: k_p – для П-регулятора; k_p и $T_{\text{И}}$ – для ПИ-регулятора; k_p, $T_{\text{И}}$, $T_{\text{П}}$ – для ПИД- регулятора.

Для приближенных расчетов настроек применительно к типовым переходным процессам для статических и астатических объектов служат формулы, представленные в табл. 7.3 и 7.4. В соответствующей справочной литературе имеются также графики для определения настроек, дающие аналогичные результаты.

Более строгое определение настроек регуляторов может быть выполнено графо- аналитическим способом на основе амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) и М-критерия (показателя колебательности).

Значения М- критерия обычно выбирают в пределах от 1, 1 до 2, 4. Для типового переходного процесса с 20 %-м перерегулированием М= 1,3, а для процесса с минимальным квадратичным интегральным показателем М= 2, 1.

Существо способа графического построения, примеры которого приведены на рис. 7.9, состоит в том, что АФХ разомкнутой системы регулирования

$$W(j\omega) = W_{об}(j\omega)W_{р}(j\omega) \qquad (7.18)$$

должна касаться вспомогательной окружности, центр которой лежит на отрицательной вещественной полуоси и радиус *r* связан с показателем колебательности соотношением

$$r = \frac{M^2}{M^2-1}. \qquad (7.19)$$

Методика определения настроек для различных регуляторов состоит в следующем:

1. Для нахождения коэффициента передачи П-регулятора, его единственной настройки, строят АФХ разомкнутой системы (см. рис. 7.9, *а*), принимая коэффициент передачи регулятора равным единице. При этом АФХ системы совпадает с АФХ объекта. Затем из начала координат под углом $\beta = \arcsin 1/M$ к отрицательной вещественной полуоси проводят прямую и циркулем из

центра, расположенного на отрицательной вещественной полуоси, строят окружность, касающуюся одновременно АФХ и проведенной прямой. Коэффициент передачи регулятора определяется величиной радиуса окружности *r*

$$k_p = \frac{M}{M^2-1} \cdot \frac{1}{r} . \qquad (7.20)$$

При М= 1, 62, что соответствует перерегулированию $\eta \approx$ 34 %,

$$k_p = \frac{1}{r}; \ \beta = 38°.$$

2. Для определения коэффициента передачи И-регулятора строят АФХ объекта и затем АФХ разомкнутой системы при $k_p = 1$

$$W(j\omega) = W_{об}(j\omega)W_р(j\omega) = W_{об}(j\omega)\frac{k_p}{j\omega} = \frac{W_{об}(j\omega)}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}}, \qquad (7.21)$$

т. е. АФХ разомкнутой системы получают, поворачивая каждый вектор АФХ объекта на 90° по часовой стрелке и уменьшая его в ω раз, как это показано на рис. 7.9, *б*. проводят прямую под углом $\beta = \arcsin 1/M$ к вещественной отрицательной полуоси и чертят окружность с центром на этой полуоси, касающуюся одновременно проведенной прямой и АФХ системы. Настройку регулятора (коэффициент передачи) определяют из соотношения (7. 20).

3. Для определения настроек ПИ-регулятора по АФХ объекта строят АФХ разомкнутой системы регулирования при $k_p =$ 1 и нескольких значениях $T_И$, учитывая, что

$$W(j\omega) = W_{об}(j\omega)W_р(j\omega) = W_{об}(j\omega)k_p\left(1 + \frac{1}{j\omega T_И}\right) =$$
$$= W_{об}(j\omega)\left(1 + \frac{1}{j\omega T_И}\right) = W_{об}(j\omega) + \frac{W_{об}(j\omega)}{\omega T_И} e^{-j\frac{\pi}{2}}, \qquad (7.22)$$

т. е. каждому вектору АФХ разомкнутой системы при $k_p = 1$ и одном из значений $T_{\text{И}}$ прибавляют вектор с модулем $\Delta A = \frac{A_{\text{об}}}{\omega T_{\text{И}}}$ и повернутый на 90° по часовой стрелке, как это показано на рис. 7.9, *в*. Проводят прямую под углом $\beta = \arcsin 1/M$ к вещественной отрицательной полуоси и чертят окружность с центрами на отрицательной полуоси, касающиеся одновременно проведенной прямой и АФХ системы при выбранных значениях $T_{\text{И}}$. Коэффициенты передачи регулятора определяются величинами радиусов r из соотношения (7.20). Полученные пары значений $k_p - T_{\text{И}}$ позволяют построить график, показанный на рис. 7.9, *г*, на котором формируется граница, соответствующая заданному значению показателя колебательности М. Настройки регулятора, обеспечивающие процесс регулирования с минимумом интегрального квадратичного критерия, соответствуют точке с максимальным отношением $k_p/T_{\text{И}}$, которая получается в месте касания прямой, проходящей из начала координат, и построенной кривой (граница).

4. Определение настроек ПИД- регулятора осуществляется аналогичным образом. Строят АФХ разомкнутой системы $W(j\omega)$ при которых $k_p = 1$ для нескольких значений $T_{\text{И}}$, принимая время предварения $T_{\text{пр}} = 0,5\, T_{\text{И}}$ и учитывая соотношения

$$W(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega)W_{\text{р}}(j\omega) = W_{\text{об}}(j\omega)k_p\left(1 + \frac{1}{j\omega T_{\text{И}}} + j\omega T_{\text{пр}}\right) =$$

$$= W_{\text{об}}(j\omega)\left(1 + \frac{1}{j\omega T_{\text{И}}} + j\omega T_{\text{пр}}\right) = W_{\text{об}}(j\omega) +$$

$$+ W_{\text{об}}(j\omega)\left(\frac{1}{\omega T_{\text{И}}} - \omega T_{\text{пр}}\right)e^{-j\frac{\pi}{2}}, \tag{7.23}$$

откуда следует, что для построения вектора АФХ разомкнутой системы(см. рис. 7.9, *в*) к каждому вектору АФХ объекта с модулем $A_{\text{об}}$ следует прибавить вектор с модулем $\Delta A = A_{\text{об}}(\frac{1}{\omega T_{\text{И}}} +$

$\omega T_{\text{пр}}$) , повернутый на 90° по часовой стрелке. Последующие операции аналогичны описанным в п. 3 и приводят к построению графика, показанного на рис. 7.9, *г* с определением настроек, обеспечивающих процесс регулирования с минимумом интегрального квадратичного критерия.

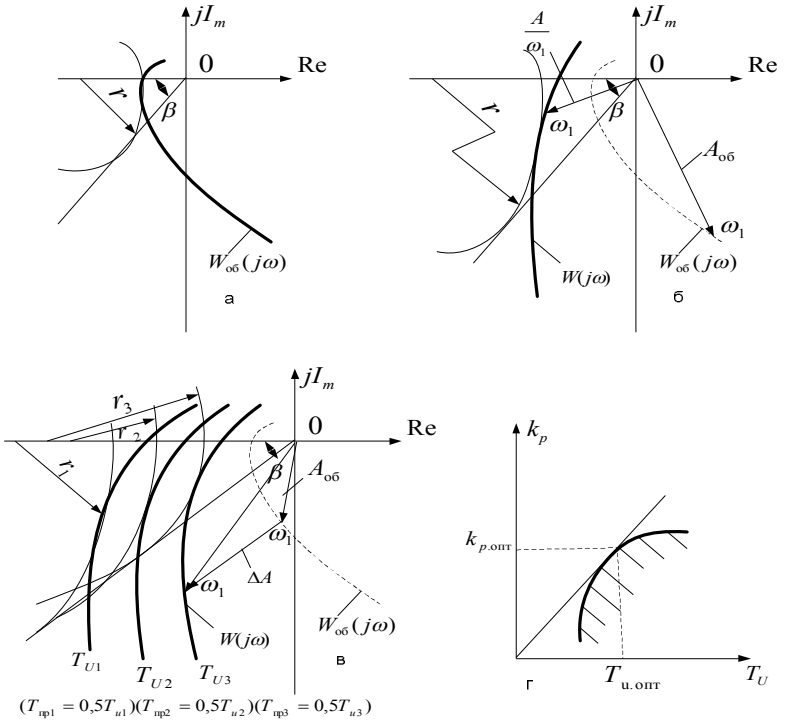


Рис. 7.9. Графическое определение коэффициента передачи регуляторов по амплитудно-фазовой характеристике объекта регулирования:
а, б, в – соответственно для П, И, ПИ-регуляторов;
г – определение оптимальных настроек

Влияние настроек ПИ-регулятора на характер регулирования показано на рис. 7.10.

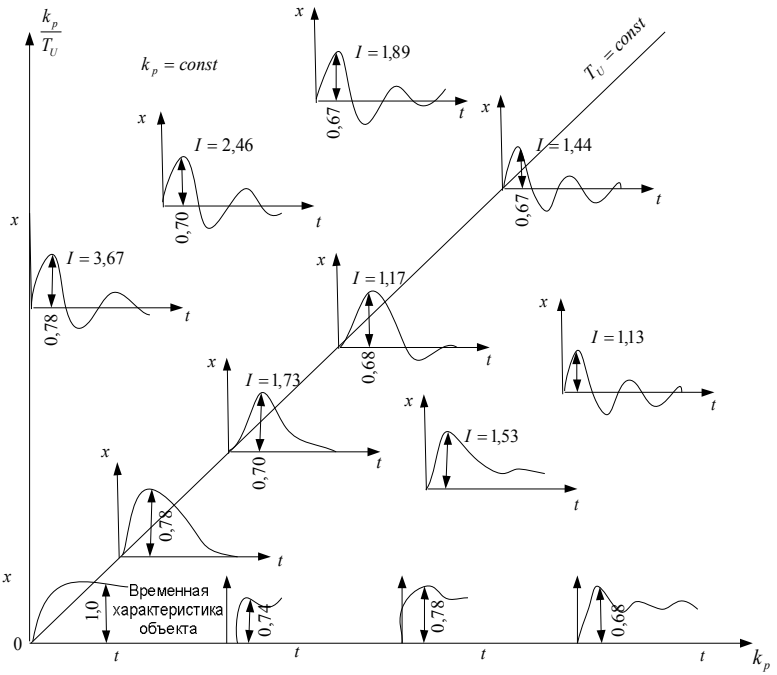


Рис. 7.10. Влияние настроек ПИ-регулятора на качестве процесса регулирования

7.4. Анализ качества регулирования

Изложенные выше распространенные методики синтеза систем автоматического регулирования не являются строго аналитическими. В них используются графические построения, табличный материал и формулы, представляющие собой приближенные количественные характеристики и рекомендации. Поэтому синтез промышленных систем автоматики завершается, как правило, анализом качества регулирования, осуществляемого системой.

Все методы анализа качества переходных процессов в системах автоматического регулирования можно разделить на две основные группы.

К первой группе относятся так называемые прямые методы анализа, сущность которых заключается в непосредственном решении (интегрировании) тем или иным способом дифференциальных уравнений системы автоматического управления, что дает аналитическое выражение переходного процесса. Достоинством прямых методов является высокая точность определения вида переходного процесса. Существенный недостаток этих методов заключается в чрезвычайной трудоемкости и даже невозможности расчетов для систем автоматического регулирования, описываемых дифференциальными уравнениями высоких порядков. В последнем случае существенную помощь в применении прямых методов оказывают современные ЭВМ.

Ко второй группе относятся так называемые косвенные методы анализа. Их достоинством является возможность в значительной степени обойти громоздкие вычислительные операции. Среди косвенных методов анализа качества переходных процессов наибольшее распространение получил частотный метод, хотя достаточно широко используются и другие методы, например метод определения показателей качества по распределению корней характеристического уравнения системы и интегральной метод.

Рассмотренные выше методы анализа качества процессов регулирования являются теоретическими и рассматриваются в теории автоматического регулирования. В большинстве случаев они позволяют осуществить анализ характера переходных процессов. Быстрое развитие техники в современных условиях, ведущее к усложнению САР и повышению требований к качеству регулирования, делает часто теоретический анализ чрезмерно сложным, а иногда и невозможным.

Поэтому в последнее время все более широкое применение получают методы экспериментального исследования систем регулирования, в частности методы динамического моделирования. Сущность этих методов заключается в том, что САР или отдельные ее элементы заменяются тем или иным способом моделями, имеющими динамические свойства, не отличающиеся от аналогичных свойств оригиналов.

7.5. Пример расчета САР

Задание. Выбрать закон регулирования и настройки регулятора стабилизации температуры в томильной зоне нагревательной методической печи.

Технологические требования: статическая ошибка – не более 10 ℃; динамическая ошибка – не более 20 ℃; время регулирования- не более 500 с; колебательность – не более 20 %.

Экспериментальные данные: коэффициент передачи объекта $k_{об} = 2,8 \frac{℃}{\%\text{ хода ИМ}}$; постоянная времени объекта $T_{об}$ = 200 с; чистое запаздывание $\tau_{об}$= 40 с; максимальное возмущающее воздействие $\Delta x_{вх.об}$= 25 % хода ИМ; шкала электронного потенциометра 0–1000 ℃.

Выбор закона регулирования

В соответствии с методикой, изложенной выше, определяем коэффициент регулирования

$$R_Д = \frac{x_1}{k_{об}\Delta x_{вх.об}} = \frac{20}{2,8 \cdot 25} = 0,29.$$

По графику рис. 7.7 для 20 % колебательности определяем, что для данных условий подходят П, ПИ и ПИД- регуляторы. Простейшим является П-регулятор. Однако следует проверить статическую ошибку, неизбежную при П-регулировании.

В соответствии с графиком рис. 7.6 для $\tau_{об}/ T_{об}$= 40/ 200 = 0, 2 находим

$$\frac{x_{СТ}}{k_{об}\Delta x_{вх.об}} = 0,22,$$

Откуда

$$x_{СТ} = 0,22\ k_{об}\Delta x_{вх.об} = 0,22 \cdot 2,8 \cdot\ 25 = 15,4\ ℃.$$

Следовательно, П- регулятор не обеспечивает заданной статической ошибки $\delta = 10℃$ и не может быть использован.

Проверим применимость ПИ- закона регулирования. Из графика рис. 7.8 следует, что для наших условий $t_p/\ \tau_{об} =$ 12, 0, поэтому время регулирования $t_p = 12 \cdot 40 = 480$ с не превышает допустимого времени регулирования $t_p = 500$ с. Окончательно выбираем ПИ-регулятор.

Выбор настроек регулятора

Приближенные значения настроек ПИ-регулятора для типового переходного процесса с 20 %-м перерегулированием можно подсчитать по формулам, приведенным в табл. 7.3:

$$K_p = ,$$
$$T_И = 0,7\ T_{об}.$$

Для условий данной задачи получим

$$k_p = \frac{0,7}{2,8 \cdot 0,2} = 1,25\% \frac{\text{хода}}{°C} \approx 1,3\% — °C$$

и $T_И = 0,7 \cdot 200 = 140$ с.

Уточненный расчет настроек регулятора

Более точно настройки регулятора могут быть рассчитаны по АФХ объекта регулирования. Частотные характеристики объекта получают либо из эксперимента, либо построением по данным кривой разгона, переходной или передаточных функций объекта.

Выбор настроек по АФХ объекта регулирования позволяет достигнуть заданного затухания переходного процесса в САР, который, как известно, характеризуется показателем колебательности М.

Произведем расчет настроек ПИ-регулятора для условий примера, имея в виду, что для типового переходного процесса с 20%-ным перерегулированием $M \approx 1,4$. Расчет осуществляют графически. Сначала строят АФХ объекта регулирования без учета запаздывания, для чего придают ряд значений частоте ω рад/с и по формулам

$$\varphi = arctg\omega T;$$

$$|W(j\omega)| = \left|\frac{k_{об}}{T_{об}j\omega + 1}\right|$$

вычисляют значения фазового угла φ и модуля частотной характеристики объекта без учета запаздывания.

Затем строят частотную характеристику объекта с учетом запаздывания, причем угловой сдвиг, определяемый запаздыванием сигнала в объекте, находят из соотношения

$$\psi = 57\ \omega\tau,$$

где 57 – коэффициент перевода радианной меры в градусы.

Расчет настроек регулятора по *М*-критерию для заданного значения последнего осуществляют по изложенной выше методике для трех значений времени изодрома $T_{И_i}(130, 150, 170\ c)$. Результаты расчета сведены в табл. 7.4. Графические построения приведены на рис. 7.11, *а*.

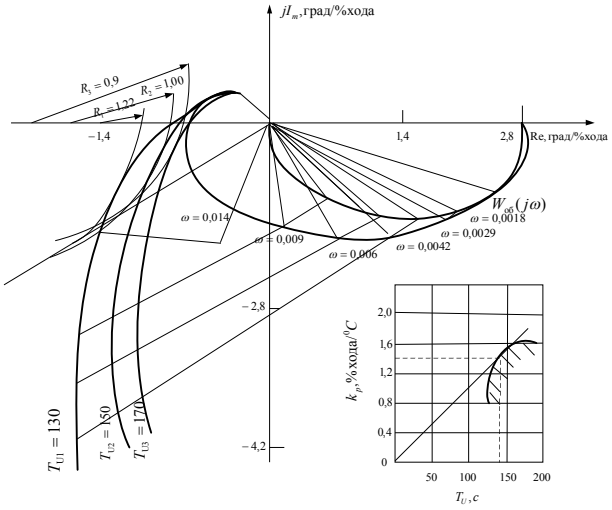


Рис. 7.11. Графическое определение настроек ПИ-регулятора

Таблица 7.5

Расчет настроек регулятора по *М*-критерию

φ, град	tg φ	ω, рад/с	ψ,град	$\lvert W(j\omega)\rvert$	$\frac{\lvert W(j\omega)\rvert}{T_{И1}\omega}$	$\frac{\lvert W(j\omega)\rvert}{T_{И2}\omega}$	$\frac{\lvert W(j\omega)\rvert}{T_{И3}\omega}$
0	0	0	0	$\frac{2,8}{70}$	∞	∞	∞
10	0,176	0,0009	2,1	$\frac{2,77}{69}$	$\frac{2,7}{589}$	$\frac{20,5}{511}$	$\frac{18,1}{451}$
20	0,364	0,0019	4,1	$\frac{2,63}{66}$	$\frac{11,2}{282}$	$\frac{9,7}{244}$	$\frac{8,6}{216}$
30	0,577	0,0029	6,6	$\frac{2,44}{61}$	$\frac{6,5}{162}$	$\frac{5,6}{140}$	$\frac{5,1}{126}$
40	0,839	0,0042	9,6	$\frac{2,16}{54}$	$\frac{4,0}{99}$	$\frac{3,4}{86}$	$\frac{3,0}{76}$
50	1,192	0,006	13,7	$\frac{1,80}{45}$	$\frac{2,3}{58}$	$\frac{2,0}{50}$	$\frac{1,76}{44}$
60	1,732	0,009	20,5	$\frac{1,40}{35}$	$\frac{1,2}{30}$	$\frac{1,0}{26}$	$\frac{0,92}{23}$
70	2,747	0,014	31,9	$\frac{0,92}{23}$	$\frac{0,51}{13}$	$\frac{0,43}{11}$	$\frac{0,39}{10}$
80	5,671	0,028	63,8	$\frac{0,44}{11}$	$\frac{0,12}{3}$	$\frac{0,1}{2,6}$	$\frac{0,09}{2,3}$
85	11,643	0,057	130,0	$\frac{0,2}{5}$	$\frac{0,03}{1,0}$	$\frac{0,02}{1,0}$	$\frac{0,01}{1,0}$

В результате расчета получены три значения коэффициента передачи регулятора, соответствующие трем значениям времени изодрома:

$T_{И}$, с ……	130	150	170
$\frac{R}{\frac{°C/\%хода}{мм}}$ ……	$\frac{1,22}{30,5}$	$\frac{1,00}{2\,5}$	$\frac{0,9}{22,5}$
K_p, % хода /°С ……..1, 19		1, 45	1, 61

Затем из этих значений K_p находят оптимальные настройки, обеспечивающие максимальное значение квадратичного интегрального критерия качества $\int x^2_{\text{вых.об}} dt$, для чего в координатах K_p и $T_и$ строят зависимость $K_p = f(T_и)$ и находят точку с наибольшим отношением $K_p / T_и$, которой является точка касания прямой, проведенной из начала координат, с кривой $K_p = f(T_и)$. из графика, приведенного на рис. 7.7, *б*, определяют настройки ПИ-регулятора для рассматриваемого примера: $K_p = 1,35 \frac{\%\text{ хода}}{°\text{C}}$ и $T_и$=145 с.

7.6. Система автоматического регулирования газоперекачивающего агрегата

Рассмотрим решение задачи синтеза регулятора системы промышленного назначения. Газ должен быть доставлен потребителям самым оптимальным и экономически эффективным путем с соблюдением все возрастающих требований по повышению надежности и безопасности поставок. Он транспортируется по магистральным газопроводам под высоким давлением (от 50 до 75 кг/см^2). Для этого на расстоянии 100–150 км устанавливаются промежуточные компрессорные станции (рис. 7.12), которые восстанавливают давление газа на участке газопровода до расчетного значения. При этом пропускная способность газопровода возрастает в несколько раз, а капитальные затраты увеличиваются лишь на 25–30 %.

Каждая станция содержит комплекс технических средств, обеспечивающих надежную и экономичную работу основного оборудования: нагнетателей природного газа- устройства, которые создают степень давления от 1,1 до 1,8 π. Они являются основным энергетическим элементом компрессорных станций магистральных газопроводов. Нагнетатель представляет собой лопаточную машину сжатия, в которой энергия внешнего источника (привода) сообщается газу, за счет чего и повышается давление. Привод и нагнетатель представляют собой газоперекачивающий агрегат (ГПА) (рис. 7.13). В ГПА в качестве привода используются газотурбинные установки (ГТУ).

Рис.7.12. Установка промежуточных компрессорных станций

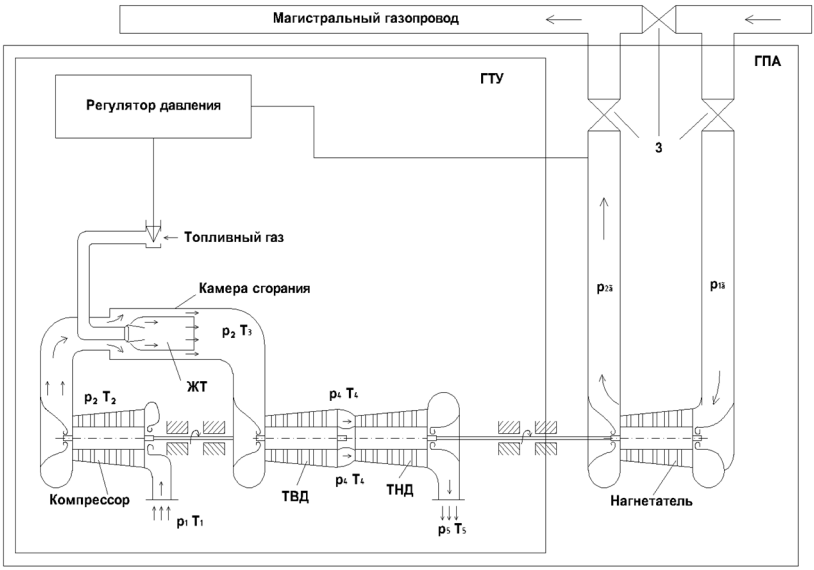


Рис.7.13. Газоперекачивающий агрегат

Эффективная эксплуатация этого комплекса возможно при безотказном функционировании автоматизированной си-

стемы управления технологическими процессами компрессорной станции, в состав которой входит и система автоматического регулирования ГПА. Задачей системы регулирования является поддержание одного или нескольких параметров на требуемом уровне. В ГПА регулируемыми параметрами являются либо частота вращения нагнетателя, либо давление газа на выходе из КС.

Рассмотрим принцип работы ГПА с двухвальной ГТУ и регулятором давления (рис. 7.12).

Двухвальная газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора, камеры сгорания и газовой турбины, которая состоит из двух частей: турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД). Компрессор состоит из ротора, укрепленного на одной оси с ТВД, и неподвижного направляющего аппарата. При работе турбины ротор компрессора вращается. Лопатки ротора имеют такую форму, что при их вращении давление перед компрессором понижается, а за компрессором повышается. Атмосферный воздух с давлением p_1 и температурой T_1 засасывается в компрессор, несколько ступеней лопаток компрессора повышают давление воздуха в 5–7 раз. Процесс сжатия протекает адиабатно, поэтому температура воздуха до температуры 200 ºС и более.

Сжатый воздух с давлением p_2 и температурой T_2 поступает в камеру сгорания. Одновременно через форсунку в нее впрыскивается топливо. В камере сгорания воздух разделяется на два потока: один поток в количество, необходимом для сгорания топлива, поступает внутрь жаровой трубы (ЖТ); второй поток обтекает жаровую трубу снаружи и подмешивается к продуктам сгорания для понижения их температуры. Этим достигается уменьшение начальной температуры газа перед турбиной до значений, приемлемых с точки зрения длительной и надежной работы вращающихся горячих элементов газовой турбины (рабочие лопатки, диски и др.). При горении топлива воздух, служащий рабочим телом, получает некоторое количество тепла и нагревается до температуры 1500–2200 ºС. Нагревание воздуха происходит при постоянном давлении, поэтому воздух расширяется и скорость его движения увеличивается.

Движущийся с огромной скоростью воздух и продукты горения с давлением p_2 и температурой T_3 направляются в турбину. Переходя от ступени к ступени, они отдают свою кинетическую энергию сначала лопаткам ТВД, передавая ее валу механическую энергию для привода компрессора, а затем лопаткам ТНД, которая является приводом нагнетателя. Часть полученной турбиной энергии расходуется на вращение компрессора, а остальная часть используется для вращения винта самолета, винта морского корабля или колес автомобиля. После ТНД газ с давлением p_5 и температурой T_5 выбрасывается в атмосферу.

К нагнетателю от входного участка магистрального газопровода с помощью запорных органов 3 подаются природный газ с давлением $p_{1г}$. Рабочее колесо нагнетателя имеет определенное количество лопаток, загнутых в сторону, противоположную вращению колеса. С помощью их происходит передача механической энергии от колеса газу, что сопровождается повышением давления до $p_{2г}$ и скоростного напора.

Увеличением (уменьшением) числа оборотов нагнетателя n_2 можно добиться расчетного давления $p_{2г0}$. Дальше газ с $p_{2г0}$ возвращается в газопровод, к потребителям. Расчетное значение $p_{2г0}$ достигается с помощью регулятора давления, который изменяет подачу топлива в камеру сгорания, тем самым увеличивая или уменьшая частоту вращения нагнетателя.

В системе регулирования ГПА используется непрямое регулирование (рис. 7.3): в цепь чувствительный элемент – регулируемый объект вводят усилительные устройства, работающие, как правило, на энергии жидкости (масла), получаемой от системы маслоснабжения. Такие усилительные устройства, имеющие выходной координатой механическое перемещение, применительно к энергетическим объектам называют *сервомоторами*. Заданный режим работы объекта нарушается вследствие возмущающих воздействий. Для ГПА это в основном изменение потребления газа, приводящее к изменениям крутящего момента нагнетателя и связанной с ним турбины. К возмущающим воздействиям для ГПА следует отнести и изменения температуры и давления окружающей среды. Возмущением системы является относительное

изменение давления газа на выходе нагнетателя $\delta_{2г}$, а регулирующим воздействием является относительное открытие топливного клапана μ.

Несмотря на конструктивные различия, у сервомоторов всех типов можно выделить два элемента: 1) устройство, вырабатывающее силовое воздействие за счет энергии постороннего источника; 2) устройство управления (золотник), воспринимающее сигнал от чувствительного элемента или предшествующего характеристикой сервомотора является коэффициент усиления по мощности, определяемый отношением выходной мощности к входной. Поскольку перестановочные силы регулирующих органов турбин значительны и могут достигать десятков тысяч ньютонов, в схемах регулирования ГТУ обычно используют несколько каскадов усиления.

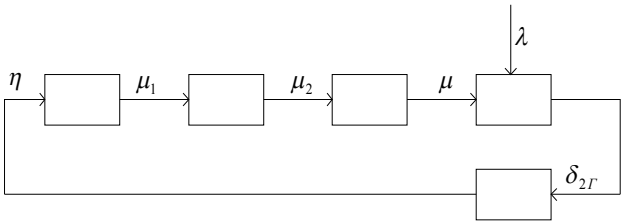


Рис. 7.14. Функциональная схема автоматического регулирования:
1 – чувствительный элемент; 2 – промежуточный усилитель;
3 – промежуточный сервомотор; 4 – главный сервомотор; 5 – ГПА

В ГТУ для перемещения регулирующего и стопорного клапанов в основном применяют сервомоторы с поступательными движением поршня и отсечными золотниками (рис. 7.15).

Принцип действия сервомотора заключается в следующем. Точка *C* получает перемещение *z* от чувствительного элемента или промежуточного усилителя. В камеру *A* золотника (см. рис. 7.15) подается жидкость, которая может поступать в полости под поршнем *5* и под поршнем *4* попеременно, при этом если одна полость соединяется с напорной камерой *A*, то другая – со сливной *B*. Равновесие системы возможно только в одном положении, когда зо-

лотник перекрывает напорную и сливную линии, т. е. при неизменном положении точки *a*. перемещаясь, поршень *2* меняет проходное сечение регулирующего клапана *3*, чем определяет подачу топлива и соответственно режим работы ГТУ.

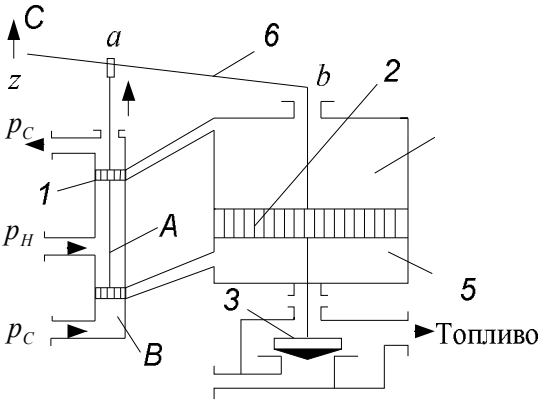


Рис. 7.15. Схема секрвомотора двойного действия:
1 – золотник; 2 – поршень; 3 – регулирующий клапан;
4 – полость над поршнем; 5 – полость под поршнем; 6 – рычаг

Хотя точка *a* в равновесных состояниях неподвижна, точки *c* и *b* могут занимать различные положения в соответствии с требуемой нагрузкой турбины. Обратная связь осуществляется с помощью рычага *6*, обеспечивая выключающее воздействие на сервомотор.

Газотурбинная установка с нагнетателем и газопровод представляет собой динамическую систему (объект регулирования), которую можно представить в виде отдельных элементов или звеньев. Уравнения движения элементов ГПА составляют, исходя из условий баланса мощности (моментов) и законов сохранения массы, энергии или других свойств. Основными характеристиками любого звена являются динамические константы, определяемые расчетным или экспериментальным способом.

Применительно к решению задач устойчивости и определения качества переходного процесса на первом этапе будем рассматривать только малые колебания динамической системы около равновесного положения. Это означает, что математическая модель включает только линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, или, что то же самое, из-за малости отклонений параметров от состояния равновесия нелинейную зависимость при разложении в ряд Тейлора представляют только первыми членами разложения (учитываются только линейные члены). Например, при известной зависимости мощности турбины низкого давления от давления и температуры газов перед ней приращение мощности при малых приращениях температуры и давления перед турбиной определяется зависимостью

$$\Delta N_2 = \left(\frac{\partial N_2}{\partial T_4}\right)\Delta T_4 + \left(\frac{\partial N_2}{\partial p_4}\right)\Delta p_4,$$

а сама мощность

$$N_2(p, T) = N_{20}(p_{40}, T_{40}) + \Delta N_2,$$

где T_{40}, p_{40} – значения температуры и давления перед турбиной в равновесном состоянии.

Изменение искомых величин и независимых параметров удобно представить в безразмерном виде в относительных координатах. В качестве масштабов приведения величин к безразмерному виду целесообразно принимать их значения в равновесном состоянии. При таком подходе, например, уравнение для мощности ТНД запишется как

$$\frac{\Delta N_2}{N_{20}} = 1 + a_1\tau_4 + a_2\delta_4,$$

где

$$a_1 = \left(\frac{\partial N_2}{\partial T_4}\right)\frac{T_{40}}{N_{20}}, a_2 = \left(\frac{\partial N_2}{\partial p_4}\right)\frac{p_{40}}{N_{20}},$$

– безразмерные постоянные;

$$\tau_4 = \frac{\Delta T_4}{T_{40}}, \delta_4 = \frac{\Delta p_4}{p_{40}},$$

– относительные координаты.

Основные элементы ГТУ как динамической системы можно разделить на две группы. Равновесный режим работы элементов первой группы обеспечивается равенством крутящих моментов или балансом мощностей машин- двигателей и машин-потребителей. Объекты второй группы представляют собой ресивер с коммуникациями подвода и отвода теплоты или массы (в качестве ресивера могут выступать камера сгорания, переходный патрубок между ТВД и ТНД и др.) в равновесном состоянии скорости подвода и отвода массы газа его энергия и теплота равны. Из этих условий и получается уравнения движения элементов ГПА.

- уравнения движения ротора ТВД и компрессора

$$T_{a_1}\dot{\varphi_1} + a_{11}\varphi_1 = a_{12}\delta_2 - a_{13}\delta_4 + a_{14}\tau_3;$$

- уравнение движения ротора ТНД и нагнетателя

$$T_{a_2}\dot{\varphi_2} + a_{21}\varphi_2 = a_{22}\delta_4 - a_{23}\delta_{2г} + a_{24}\delta_{1г} + a_{25}\tau_4;$$

- уравнение процессов в камере сгорания

$$a_{31}\tau_3 = a_{32}\varphi_2 + a_{33}\delta_2 + a_{34}\tau_2 + a_{35}\mu + a_{36}\delta_4;$$

- уравнение для объема компрессор-турбина

$$T_T\dot{\delta_2} + a_{41}\delta_2 = a_{42}\varphi_1 + a_{43}\tau_3 + a_{44}\delta_4 + a_{45}\dot{\tau_3} + a_{46}\dot{\tau_2};$$

- уравнение для объема между турбинами высокого и низкого давления

$$T_П\dot{\delta_4} + a_{51}\delta_4 = a_{52}\delta_2 - a_{53}\tau_3 + a_{54}\tau_4;$$

- уравнение объема между газопроводом и нагнетателем на входе

$$A_3\dot{\delta_{1г}} + a_{61}\delta_{1г} = -a_{62}\delta_{2г} - a_{63}\varphi_2;$$

- уравнение объема между газопроводом и нагнетателем на выходе

$$A_4\dot{\delta_{2г}} + a_{71}\delta_{2г} = -a_{72}\delta_{1г} + a_{73}\varphi_2 - \lambda,$$

$$\tau_4 = \tau_3 - b_{21}(\delta_2 - \delta_4); \quad \tau_2 = b_{11}\delta_2,$$

где изменение искомых величин удобно представлены в безразмерном виде в относительных координатах:

$$\delta_1 = \frac{p_{10} - p_1}{p_{10}};\ \delta_2 = \frac{p_{20} - p_2}{p_{20}};\ \delta_{1г} = \frac{p_{1г0} - p_{1г}}{p_{1г0}};$$

$$\delta_{2г} = \frac{p_{2г0} - p_{2г}}{p_{2г0}};$$

– относительные изменения давления на входе и выходе из компрессора (или нагнетателя). Индекс «0» обозначает значение параметра в установившемся режиме.

$$\delta_4 = \frac{p_{40} - p_4}{p_{40}};\ \delta_5 = \frac{p_{50} - p_5}{p_{50}},$$

– относительные изменения температур перед ТВД и на выходе ТНД.

Коэффициенты a_{ij} – безразмерные величины; T_{a_1}, T_{a_2} – постоянные времени ТВД и ТНД, которые зависят от размеров и форм роторов, их мощностей и угловых скоростей вращения; A_3, A_4 – постоянные времени в подводящей и отводящей ветках газопровода; $T_T, T_П$- постоянные времени, зависящие от объема патрубков между камерой сгорания и ТВД, между ТВД и ТНД.

Уравнения регулятора давления газа для компрессорной станции:

- уравнение измерительного органа регулятора $\delta_p\eta = -\delta_{2г}$;
- уравнение промежуточного усилителя $(T_{s1}s + 1)\mu_1 = \eta$;
- уравнение сервомотора регулятора $(T_{s2}s + 1)\mu_2 = \mu_1$;

- уравнение главного сервомотора $(T_{s3}s + 1)\mu_3 = \mu_2,$

где δ_p – степень неравномерности чувствительного органа; η- относительное смещение чувствительного элемента; μ_1 – относительное смещение промежуточного усилителя; μ_2 – относительное смещение сервомотора регулятора; μ_3 – относительное смещение главного сервомотора; T_{s1}, T_{s2}, T_{s3} – постоянные времени усилителя, сервомотора регулятора и главного сервомотора.

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p(s) = \frac{\mu(s)}{\delta_{2г}(s)} = \frac{-1}{T_{s1}\,T_{s2}\,T_{s3}\delta_p s^2 + (T_{s1} + \,T_{s2} + T_{s3})\delta_p s + \delta_p}.$$

Структурная схема системы представлена на рис. 7.5.

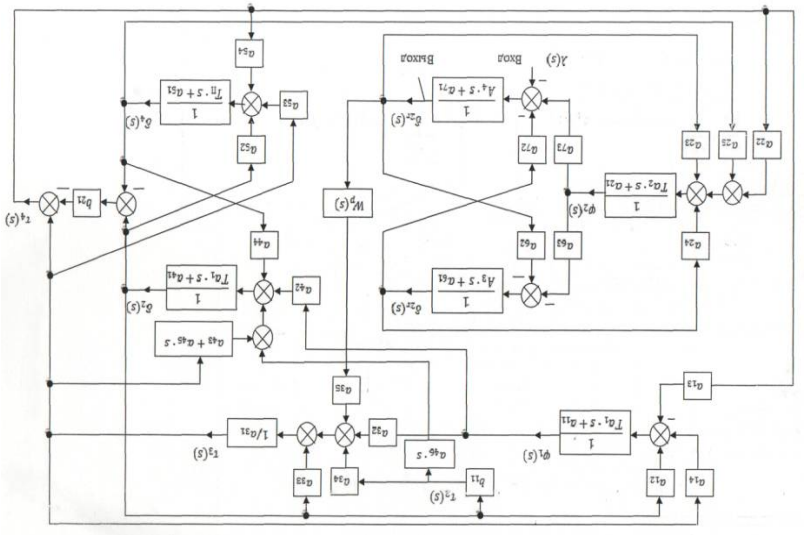


Рис. 7.16. Структурная схема ГПА

Контрольные вопросы:

1. Какие задачи решаются при синтезе САР и анализа САР?
2. Какие функции выполняет мультиплексор?

3. По каким признакам классифицируется автоматические регуляторы?

4. Какими законами регулирования осуществляется качество процесса автоматического регулирования?

5. Какие настроечные параметры имеет регулятор с ПИД-законом регулирования?

6. Какие основные показатели качества регулирования?

7. Какие переходные процессы относятся к типовым?

8. Какие показатели нужны для осуществления выбора регулятора?

8. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

8.1. Основные типовые узлы регулирования

Несмотря на большое разнообразие конструкций металлургических печей и видов тепловой обработки материалов, общность главных назначений печей (получение тепла и его передача материалу) приводит к тому, что ряд узлов систем автоматического регулирования различных печей служит для выполнения одинаковых функций. Общность функций вызывает единообразие структурного, а часто и аппаратурного построения узлов регулирования. Наиболее распространенными в системах автоматизации металлургических печей являются узлы:

1) регулирования температуры;

2) регулирования расхода и давления газа;

3) регулирования горения топлива, т. е. соотношение топливо- воздух (кислород);

4) регулирования давления в печи;

5) автоматической блокировки и сигнализации падения давления топлива, воздуха, кислорода, воды.

Основой построения всех этих узлов являются системы автоматической стабилизации, т. е поддержания регулируемой величины (температуры, расхода, соотношения, давления) на заданном уровне. Структурная схема системы автоматической стабилизации приведена на рис. 8.1.

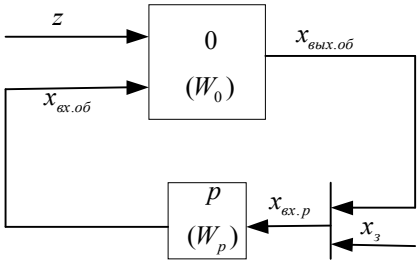


Рис. 8.1. Структурная схема системы автоматической стабилизации

Регулируемая величина $x_{вых.об}$, являющаяся выходной величиной объекта регулирования *О*, сравнивается с заданием x_3 регулятору *Р* и их разность *x* поступает на вход регулятора. Управляющий сигнал регулятора воздействует на вход объекта. На объект действуют также неконтролируемые возмущения, которые изменяют регулируемую величину, вызывая ее отклонения от заданного значения. Регулятор, являющийся автоматическим стабилизатором, устраняет эти отклонения, т. е. поддерживает соотношение $x_{вх.об} = x_{вых.об} - x_3 = 0$. Выполнение этого условия обеспечивает компенсацию возмущений *z*, приложенных к объекту, и компенсацию возмущений, приложенных к регулятору и связанных с целенаправленным периодическим изменением задания регулятору.

Статические и динамические свойства металлургической печи как объекта регулирования по каналам температура – расход топлива, соотношение топливо – воздух – расход воздуха, давление в печи – разрежение в дымопроводе и т. п. могут быть аппроксимированы одним из следующих звеньев:

а) инерционным (апериодическим) звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_0(p) = W_1(p) = \frac{k}{T_p + 1}; \qquad (8.1)$$

б) звеном чистого запаздывания с передаточной функцией

$$W_0(p) = W_2(p) = e^{-p\tau}; \qquad (8.2)$$

в) системой из последовательного соединенных инерционного звена первого порядка и звена чистого запаздывания с передаточной функцией

$$W_0(p) = W_3(p) = W_1(p)W_2(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{T_p + 1}. \qquad (8.3)$$

При такой аппроксимации всегда следует иметь в виду, что она допустима лишь для определенных режимах работы агрегата, характеризующихся некоторыми значениями регулируемой величины, управляющего воздействия и возмещений. Значения параметров *k, T,* τ по всем рассматриваемым каналам зависят от многих факторов. На рис. 8.2 представлены статические характеристики нагревательной печи со стационарным подом площадью 5 м^2 по каналу температура в печи (^{0}C) – расход топлива *B* (в долях от максимального). Нетрудно видеть, что коэффициент передачи объекта по рассматриваемому каналу, численно равный тангенсу угла канала касательной к кривой в соответствующей точке: $k_i = tg\alpha_i$, существенно зависит от абсолютного значения расхода топлива (кривая *1*, $k_1 \neq k_2$), теплового состояния (кривые *1* и *2*, $k_3 \neq k_1, k_2$) и массы садки (кривая *3*, $k_4 \neq k_1, k_2, k_3$).

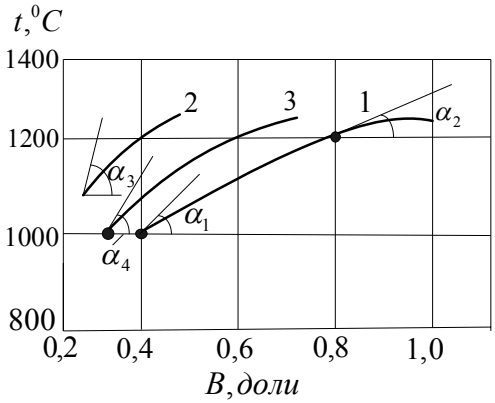


Рис. 8.2. Статические характеристики нагревательной печи:
1 – нагрев садки массой 10 т в первый час обработки;
2 – то же, в десятый час обработки; 3 – нагрев садки массой 2,5 т в первый час обработки

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что параметры τ и T существенно зависят от режимных факторов печи.

Работа системы автоматической стабилизации в значительной мере зависит от вида возмущений. Как уже оказывалось, возмущения различаются по месту их приложения; при этом различают возмущения, приложенные к объекту, так называемые возмущения, приложенные к регулятору, так называемые по заданию. Кроме того, возмущения могут различаться величиной и характером изменения во времени, т. е. могут быть ступенчатыми, монотонно увеличивающимися или уменьшающимися, периодическими регулярными и нерегулярными, случайными.

Место приложения возмущения определяет вид передаточной функции системы стабилизации. При возмущении по нагрузке (см. рис. 8.1) $x_3 = 0$ и $x_{вх.р} = x_{вых.об}$ можно записать соотношения:

$$x_{вых.об} = W_0(p)(z - x_{вх.об});$$

$$x_{вх.об} = W_p(p)x_{вх.р}.$$

Решая эти уравнения, получаем передаточную функцию системы возмущений по нагрузке в виде

$$W_C^H = \frac{x_{вых.об}}{z} = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)W_p(p)}. \qquad (8.4)$$

При возмущении по заданию $z = 0$ и можно записать

$$x_{вх.об} = W_0(p)(x_3 - x_{вых.об});$$

$$x_{вых.об} = W_0(p)x_{вх.об}.$$

Решение этих уравнений дает выражение передаточной функции системы возмущении по заданию

$$W_C^3 = \frac{x_{вых.об}}{x_3} = \frac{W_0(p)W_p(p)}{1 + W_0(p)W_p(p)} \ . \qquad (8.5)$$

Сравнение выражений (8.4) и (8.5) показывает, что передаточные функции замкнутой системы при возмущении по нагрузке и заданию различны. Это необходимо учитывать при синтезе системы расчетном анализе качества регулирования.

В нагревательных печах периодического действия возмущения по температуре, давлению и условиями горения топлива возникают при нагрузке и выгрузке заготовок. Поступление новых холодных масс металла при загрузке и воздуха и при открывании заслонок при этом могут вызвать падение температуры на несколько десятков градусов с одновременным изменением давления в рабочем пространстве. Подсосы воздуха в печь и выбивание газов из нее вызывают также изменения условий горения топлива. В зависимости от вида и емкости печи периодические возмущения такого характера могут возникать с интервалом от 5–7 до 40–60 мин.

В крупных нагревательных печах для обработки единичных изделий и в термических печах отсутствуют кратковременные возмущения, связанные с загрузкой и выгрузкой заготовок, но имеют место ступенчатые или монотонные возмущения, связанные с изменением задания регулятору в соответствии с определенной программой температурного режима нагрева. В нагревательных печах монотонные возмущения температуры могут достигать 2–2,5 град/ мин, а в термических – 1–1,5 град/ мин.

В нагревательных и термических печах непрерывного действия возмущающие воздействия возникают из-за открытия окон при загрузке и выгрузке металла, изменения производительности печи, т. е. скорости продвижения металла через печь, и изменения сортамента обрабатываемого металла.

Случайные возмущения при работе печей вызываются колебаниями состава, теплоты сгорания и давления топлива, влажности и давления воздуха и т. п., медленно меняющиеся и случайные возмущения связаны с износом и старением конструктивных элементов печи. Прогар кладки, например, сопровождается увеличением тепловых потерь теплопроводностью через нее и увеличением выбивания или подсосов газов в зависимости от режима давления в печи.

Статические и динамические характеристики металлургической печи как объекта регулирования существенно различаются по каналам температура – расход топлива, соотношение топливо – воздух – расход воздуха, давление в печи – разрежение в борове, а следовательно, различаются и передаточные функции объекта W_0 по соответствующим каналам. В результате различия передаточных функций объекта, вида возмущений и заданного качества регулирования необходимо использовать регуляторы с различными и соответствующими объекту передаточными функциями $W_\text{р}$, что обеспечивается выбором закона регулирования и настроек регуляторов. Если в объекте регулирования допускаются остаточные отклонения регулируемой величины от задания в определенных пределах, то применяют П-регулятор. При допустимости колебательных изменений регулируемой величины с максимальными отклонениями в определенных пределах применяют релейные (двух- и трехпозиционные) регуляторы. Если остаточные отклонения недопустимы, то в зависимости от инерционных свойств объекта и возможных динамических отклонений регулируемой величины применяют И, ПИ, ПИД-регуляторы.

8.2. Автоматическое регулирование температуры в печи

Автоматическое регулирование температурного режима является, как правило, основной задачей системы автоматики металлургической печи. Температурный режим, уровень температуры в печи определяет теплопередачу к металлу и, следовательно, скорость его нагрева, распределение температуры в массе металла, интенсивность окалинообразования, износ кладки печи и другие важнейшие параметры, характеризующие процесс тепловой обработки материала и работу самого агрегата.

Температура в печи определяется интенсивностью подвода и сжигания топлива и в этом смысле она является регулируемым параметром. Однако температура в печи может рассматриваться и как регулирующее воздействие по отношению, например, к температуре металла или температуре кладки.

Узлы регулирования обеспечивают поддержание заданной температуры в рабочем пространстве нагревательных колодцев, методических, колпаковых, башенных и других печей; они стабилизируют температуру в камере зажигания агломерационной машины и температуру дутья, подаваемого в доменную печь, и т. д.

Качественное регулирование температуры в рабочем пространстве печи предполагает выбор представительной точки контроля, правильную установку датчика температуры, правильный выбор типа регулятора и соответствующую настройку его, правильный выбор регулирующего органа.

Датчиками температуры чаще всего являются термопары или пирометры, пределы измерений которых соответствуют значениям контролируемых температур. Термопару или пирометр устанавливают в своде или стене печи в специальной арматуре; пирометр визируют на дно огнеупорного стакана. Термопара или огнеупорный стакан пирометра, погруженные в рабочее пространство печи, в результате теплообмена с факелом, горячими газами и нагретыми поверхностями кладки и металла приобретают температуру, соответствующую некоторой средней температуре в рабочее пространстве или в данной зоне рабочего пространство печи.

Для высокотемпературных печей теплообмен между поверхностью металла и рабочим пространством печи в целом (факелом, горячими газами и кладкой) может быть представлен уравнением

$$Q_{М} = c_0 \varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_{П}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{М}}{100} \right)^4 \right] F_{М}, \qquad (8.6)$$

где $Q_{М}$ – тепловой поток, передаваемый металлу;

$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты газов, кладки, металла;

c_0 – коэффициент излучения абсолютного черного тела;

$T_П$ – температура печи;

$T_М$ – температура поверхности металла;

$F_М$ – площадь поверхности металла.

Температура печи $T_П$ выражении (8.6) представляет собой некоторую усредненную характеристику температурного потенциала рабочего пространства и именно она является параметром, определяющим величину теплового потока $Q_М$, передаваемого металлу. Следовательно, для управления нагревом металла необходимо так располагать датчик температуры, чтобы он измерял температуру, возможно более близкую к величине $T_П$. Исследования и опыт эксплуатации позволили определить места установок датчиков температуры в существующих агрегатах. При конструировании новых печей этот вопрос должен решаться, исходя из имеющегося опыта, данных расчетов, моделирования и предварительных исследований.

В качестве регуляторов температуры используют самые разнообразные модификации регулирующих устройств: электрические, пневматические, гидравлические; наиболее распространенными из них являются первые.

Тип исполнительного механизма зависит от типа выбранного регулятора (электрический, пневматический, гидравлический) и вида регулирующего органа.

В пламенных печах регулирующими органами, изменяющими расход газообразного или жидкого топлива, обычно являются поворотные заслонки, регулировочные клапаны различных конструкций.

При регулировании температуры в электрических печах исполнительными органами служат реле, контакторы или устройства трансформаторного типа для плавного изменения мощности.

Металлургическая печь с точки зрения динамических свойств по каналу топливо – температура представляет собой весьма инерционный и нестационарный объект.

В определенном режиме работы печи передаточная функция по этому каналу может быть, как правило, представлена выражением вида

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{Tp+1}, \qquad (8.7)$$

т. е. металлургическая печь аппроксимируется последовательно соединенными апериодическим звеном и звеном чистого запаздывания.

Динамические характеристики объекта регулирования зависят от способа измерения температуры. Можно выделить два основных способа контроля температуры в печи:

1) термопарой или радиационным пирометром, визированным на дно огнеупорного стакана;

2) радиационным пирометром, визированным непосредственно на факел или через факел на стенку печи или металл;

Кривые разгона, характерные для этих двух случаев измерения температуры, приведены на рис. 8.3. Можно видеть, что чистое запаздывание τ и постоянная времени T при измерении температуры термопарой в защитной арматуре (рис. 8.3, *а*), пирометром, визированным на стенку печи (рис. 8.3, *б*), и пирометром, визированным на светящийся факел (рис. 8.3, *в*), составляют соответственно:

$$\tau_1 = 24\,c;\ \tau_2 = 4\,c;\ \tau_3 = 1\,c;\ T_1 = 86\,c;$$

$$T_2 = 50\,c; \qquad T_3 = 4\,c.$$

Выбор того или иного способа измерения температуры определяется теплотехническими, метрологическими и конструктивными требованиями.

Чистые запаздывания и постоянные во времени в контурах регулирования температуры различных печей могут достигать нескольких минут. Большая инерционность связана с тепловой

инерцией, как самих печей, так и датчиков температуры, имеющих, как правило, достаточно массивные огнеупорные защитные чехлы.

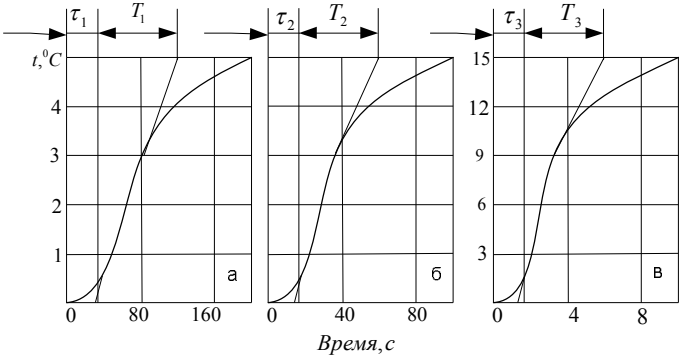


Рис. 8.3. Кривые разгона температуры в печи

Количественные характеристики переходных кривых существенно зависят от режима работы печи. Для печей непрерывного действия (методических, проходных, протяжных) статические и динамические характеристики меняются с изменением производительности, т. е. при возмущениях по нагрузке. В печах периодического действия статические и динамические свойства контура регулирования температуры сильно меняются со временем внутри цикла нагрева. В начале нагрева, когда металл и кладка печи имеют сравнительно низкую температуру, их аккумулирующая способность по теплу велика и коэффициент передачи объекта значителен. По мере прогрева металла и кладки их способность поглощать тепло уменьшается и коэффициент передачи объекта падает, например для нагревательных колодцев в начале периода выдержки коэффициент передачи по каналу температура в ячейке – расход топлива составляет 70, а в конце периода 15 град / тыс. $м^3$ газа в час.

Нестационарность статических и динамических характеристик печей в контуре регулирования температуры требует особого внимания при выборе и настройке регуляторов. В этих кон-

турах применяют регуляторы непрерывного действия, работающие по П, ПИ, ПИД-законом регулирования, а также релейные (двух- и трехпозиционные) и импульсные регуляторы. Хорошее качество регулирования обеспечивается обычно применением регуляторов, работающих по ПИ-закону регулирования, с настройкой степени неравномерности и времени удвоения регулятора по кривой разгона, характерной для преимущественного режима работы печи. Однако в каждом конкретном случае закон регулирования необходимо определять по индивидуальным показателям объекта. Улучшенными динамическими свойствами обладают системы с коррекцией настроек регулятора при изменении режима работы печи.

8.3. Автоматическое регулирование соотношения топливо – воздух

Автоматическое регулирования соотношения расходов топлива и воздуха, подаваемых в печь, должно обеспечивать необходимые условия сжигания топлива. Эти условия различаются для печей того или иного назначения, но в целом их можно сформулировать следующим образом:

1) топливо должно сжигаться экономично;

2) сжигание топлива должно быть организовано так, чтобы в печь сохранялись наилучшие условия теплообмена факела с металлом и кладкой;

3) сжигание топлива должно быть организовано так, чтобы в печи поддерживалась газовая атмосфера определенного состава.

В зависимости от типа печи перед системой автоматического регулирования ставится задача выполнения одного из перечисленных требований или определенной их совокупности.

Численно соотношение топливо – воздух определяется так называемым *коэффициентом расхода воздуха*, обычно обозначаемым буквой α. Часто встречающееся название ‹‹*коэффициент избытка воздуха*›› сложилось исторически и является менее точным, так как в ряде современных металлургических печей топ-

ливо сжигается в определенных зонах не при избытке, а при недостатке воздуха.

Коэффициент расхода воздуха равен

$$\alpha = \frac{B_B}{B_B^0} = \frac{B_B}{V_B^0 B_T}, \qquad (8.8)$$

где B_B – действительный расход воздуха;

B_B^0 – теоретический расход воздуха, необходимый для полного сжигания топлива;

V_B^0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сжигания единицы топлива;

B_T – расход топлива;

При отоплении печи топливом нескольких видов, например природным газом и мазутом, и при использовании для формирования факела и сжигания этих топлив вентиляторного воздуха, сжатого воздуха и кислорода числитель и знаменатель выражения (8.8) представляют собой соответственно суммы расходов кислородоносителей и топлив.

Рассмотрение формулы (8.8) показывает, что для точного определения коэффициента расхода воздуха необходимо точное значение расходов топлива и воздуха и состава топлива, так как от последнего зависит величина V_B^0.

Если топливо сжигается с $\alpha = 1$ и при идеальном смешении с воздухом, то развивается максимальная калориметрическая температура горения. При $\alpha < 1$ часть топлива не сгорает из-за недостатка кислорода и максимальная температура не достигается. При $\alpha > 1$ топливо сгорает полностью, но часть выделяющегося при этом тепла идет на нагрев излишнего воздуха и максимальной температура горения также не достигается. Справедливость рассуждений о качественных изменениях теоретической калориметрической температуры горения, т. е. температуры, развиваемой при полном сгорании топлива и без теплообмена про-

дуктов сгорания с окружающей средой, сохраняется и для реальных температур, получаемых в рабочих пространствах металлургических печей.

На рис. 8.5, *а* и *б* показаны графики зависимостей калориметрической t_k^0 и реальной $t_П^0$ температур от коэффициента расхода воздуха. Максимум реальной температуры имеет место при значениях α, несколько больших единицы, из- за того, что в условиях не идеального, а реального смешения топлива и воздуха полное сгорание требует некоторого избытка воздуха. Уровень реальных температур несколько ниже из-за теплообмена факела с окружающей средой. Из графиков также следует, что изменением коэффициента расхода воздуха можно регулировать температуру горения; последняя уменьшается (правая ветвь кривой) с увеличением α.

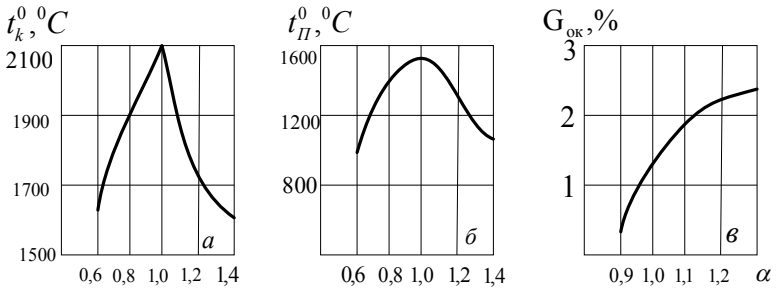


Рис. 8.5. Зависимости температуры горения и окалинообразования от величины коэффициента расхода воздуха

Как показывают исследования, при сжигании газообразного топлива в различных реальных печах максимальная температура достигается при $\alpha = 1{,}05 \div 1{,}15$, а при сжигании жидкого топлива – при $\alpha = 1{,}15 \div 1{,}25$.

Таким образом, если требуется получить наибольшую скорость нагрева металла и экономичное сжигание топлива, то в печи нужно иметь максимальную температуру и, следовательно, система автоматического регулирования должна поддерживать

коэффициент расхода воздуха на соответствующем уровне. В термических печах часто следует подавать с избытком его длины и формы с целью предотвращения перегрева изделий и кладки и обеспечения равномерного нагрева садки.

Коэффициент расхода воздуха влияет не только на теплообмен, но и на массообмен в печах. Очевидно, что изменения коэффициента α сопровождаются изменениями состава печной атмосферы. При $\alpha < 1$ в печи создается восстановительная атмосфера, а при $\alpha > 1$ – окислительная. Влияние коэффициента расхода воздуха на угар металла из-за окислительного воздействия кислорода печной атмосферы иллюстрирует на рис. 8.5, *в*. По оси ординат на этом графике отложено количество образующейся окалины $G_{ок}$ в процентах от массы металла. Неправильное регулирование расхода воздуха может привести к повышенному окислению металла и существенному ухудшению экономических показателей агрегата. В печах безокислительного нагрева, работающих с недостатком воздуха в зоне высокотемпературного нагрева, регулирование коэффициента расхода воздуха обеспечивает печную атмосферу оптимального состава и исключает сильное окалинообразование. В таких печах коэффициент α поддерживается на уровне 0,45–0,55.

Сказанное выше позволяет сделать вывод, что системы автоматического регулирования соотношения топливо – воздух решают важные задачи, обеспечивающие производительную и экономичную работу металлургических печей.

Автоматическое регулирование соотношения расходов топлива и воздуха на большинстве печей осуществляется при помощи регуляторов соотношения. Чаще всего ведущим потоком в схеме отопления и автоматического пропорционирования является топливо, расход которого задается регулятором температуры. Регулятор соотношения получает информацию о расходах топлива и воздуха и управляет расходом воздуха, который является, таким образом, ведомым потоком. В некоторых случаях применяется обратная схема, где ведущим потоком служит воздух, а ведомым – топливо. Расходы газообразного топлива и воздуха измеряются обычно дросселирующими устройствами: диафрагмами, соплами, трубами Вентури. Расход мазута измеряется

расходомерами постоянного перепада или объемными расходомерами.

Регулирование соотношения по расходам топлива и воздуха, подводимых к печи, имеет ряд недостатков.

Во-первых, на участках воздухопровода, расположенных после измерительного устройства, могут иметь место потери воздуха выбиванием, особенно через неплотности в кладке рекуператоров, регенераторов, каналов и рабочего пространства, которые нарушают отрегулированный коэффициент расхода воздуха. По существу объектом регулирования соотношения является участок трубопровода между дросселирующим измерительным устройством и регулировочным клапаном, а не рабочее пространство печи, в котором должно происходить сжигание топлива при заданном расходе воздуха.

Во-вторых, коэффициент расхода воздуха может искажаться за счет погрешностей в измерении расходов топлива и воздуха и из-за колебаний состава топлива. Погрешности измерения возникают в результате отклонений температуры, давления, вязкости и т. д. измеряемых сред от значений, принятых при расчете дросселирующих устройств. Например, подогрев воздуха меняется в процессе эксплуатации печи из-за износа рекуператора, и если не применяется расходомер с автоматической компенсацией, то изменения температуры воздуха будут вызывать ошибки в измерении его расхода. Колебания в составе топлива, например смешанного газа, могут возникать из-за колебаний состава и количества газа, поступающего с кокосовых батарей, а состав мазута может отличаться в различных партиях этого топлива. Качественная работа системы регулирования соотношения требует точного измерения расходов и стабилизации характеристик топлива.

В-третьих, все применяемые системы регулирования системы регулирования соотношения достаточно точно поддерживают заданный коэффициент расхода воздуха при изменениях расходов сред в пределах 100–35 % от максимальных значений. При работе печей могут иметь место гораздо более глубокие, например 5–6-кратные, изменения расходов топлива и воздуха. При этом перепады статических давлений на дросселирующих органах, являющиеся мерой расходов, изменяются в

25–36 раз, что приводит к потере чувствительности измерительной аппаратуры на малых расходах и к большим ошибкам измерений и регулирования коэффициента расхода воздуха. Помимо рассмотренного, влияния на сгорание топлива в рабочем пространстве печи оказывают также подсосы воздуха из окружающего пространства. Для ряда конструкций печей указанные недостатки могут не иметь существенного значения, и регулирование коэффициента расхода воздуха на подводе к печи является удовлетворительным. Во многих же случаях желательно осуществлять процесс регулирования на основе контроля процесса сжигания топлива.

Контроль процесса сжигания может осуществляться по результатам анализа продуктов сгорания. Коэффициент расхода воздуха для бессернистого топлива вычисляют по формуле

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3{,}76\dfrac{O_2 - 0{,}5(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}, \tag{8.9}$$

где O_2, CO, H_2, CH_4, N_2 – соответственно содержание газов в продуктах сгорания;

3, 76 – коэффициент, равный отношению азота и кислорода в воздухе.

При полном сгорании топлива формула (8.9) преобразуется в выражение вида

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3{,}76\dfrac{O_2}{N_2}}. \tag{8.10}$$

Анализ формул показывает, что для контроля коэффициента расхода воздуха при неполном сгорании топлива необходимо проводить анализ покидающих печь продуктов сгорания на O_2, CO, H_2, CH_4, CO_2 (для того, чтобы определить N_2 как остаток). При полном сгорании достаточно осуществлять анализ

лишь на O_2 и CO_2. Применение автоматических газоанализаторов и вычислительных устройств для расчетов коэффициента расхода воздуха по приведенным формулам позволяет непрерывно контролировать качество сжигания топлива.

На основе этого создаются системы регулирования с коррекцией задания регулятору соотношения по составу продуктов сгорания. Успешная работа таких систем во многом зависит от представительности проб газа, отбираемых для автоматического анализа, т. е. от того, насколько состав продуктов сгорания в месте отсоса газозаборной фурмой соответствует среднему их составу на выходе из рабочего пространства печи. Неправильная установка газозаборной фурмы, например, с малым заглублением в дымовой канал, после шибера, поворота или расширения канала может привести к тому, что продукты сгорания будут отбираться из объема, в который подсасывается воздух, или из застойных зон, где состав газа отличается от состава основного потока. Помимо получения представительной пробы, сведения к минимуму транспортного запаздывания по трассе импульсной линии и запаздываний в собственно газоанализаторах.

Поскольку объектом регулирования соотношения, как уже указывалось, является участок трубопровода между измерителем расхода воздуха и регулировочным органом, то запаздывания в системе невелики. Например, при аппроксимации переходной характеристики, снятой на нагревательном колодце, кривой первого порядка с чистым запаздыванием параметры имеют следующие значения: чистое запаздывание $\tau = 0{,}2 \div 0{,}3\ c$, постоянная времени $T = 0{,}6 \div 0{,}7\ c$. Удовлетворительное качество регулирования соотношения получают обычно при использовании И-регуляторов различных конструкций.

8.4. Автоматическое регулирование давления в печи

Режим давления в рабочем пространстве печи во многом определяет качество нагрева металла и экономичность работы агрегата. Системами регулирования давления оснащают как негерметичные пламенные печи, так и герметичные печи для термообработки металла.

Излишне высокое давление в пламенной печи приводит к тому, что через неплотности в кладке, загрузочных окнах и гляделки из рабочего пространства в окружающую среду выбиваются продукты сгорания, несгоревший газ и воздух, унося тепло, вызывая ускоренный износ внешних конструкций печи, затрудняя визуальный контроль и обслуживание агрегата и загрязняя атмосферу цеха. Если в рабочем пространстве создается разрежение, то через неплотности засасывается холодный атмосферный воздух, понижая температуру в печи, неравномерно охлаждая кладку, металл и вызывая дополнительное окалинообразование на последнем. Таким образом, как завышение, так и занижение давления приводит к перерасходу топлива и ухудшению работы агрегата.

Наиболее рациональным для негерметичных пламенных печей является такой режим, при котором на уровне пода поддерживается нулевое давление, а, следовательно, подсосы холодного воздуха отсутствуют, и наблюдается лишь слабое выбивание газов в связи с ростом геометрического напора по высоте рабочего пространства. Для мартеновских печей, имеющих подину ванной образной формы, это означает, что нулевое давление должно поддерживаться на уровне порогов завалочных окон.

В термических печах с защитными и специальными атмосферами, в которых происходит безокислительная и термохимическая обработка металла, давление должно поддерживаться таким, чтобы свести к минимуму потери через затворы и уплотнения заполняющих печь специальных газов и исключить подсосы окружающего воздуха, которые могут исказить атмосферу внутри печи и повлиять на качество обработки изделий.

Отбор импульса давления обычно осуществляется из пространства под сводом печи. При этом следует учитывать, что в

печах периодического действия из-за изменения температуры газов в течение цикла нагрева изменяется величина геометрического напора, обусловленного разностью плотностей высокотемпературного газа в печи и холодного окружающего воздуха. Численно геометрический напор определяется выражением

$$h = H\left(\rho_0^{B}\frac{1}{1+\alpha t_B^0} - \rho_0^{Г}\frac{1}{1+\alpha t_Г^0}\right), \qquad (8.11)$$

где H – высота печи;

ρ_0^{B}, $\rho_0^{Г}$ – плотность воздуха и печных газов при нормальных условиях;

t_B^0, $t_Г^0$ – температура воздуха и печных газов;

α – температурный коэффициент расширения газов, равный 1/ 273.

Из выражения (8. 11) видно, что чем выше печь и чем больше колебания температуры печных газов, тем значительнее колебания давления под сводом при его изменении на уровне пода.

Для того чтобы исключить этот эффект, в таких печах предпочтительнее отбирать импульс давления на уровне пода. Однако следует учитывать, что при расположении отборного устройства внизу печи может иметь место динамическое воздействие струй горелочных газов на место отбора и искажение величины статического давления. Динамическое воздействие газов должно исключаться при выборе места расположения отборного устройства. Конструкция отборного устройства и его расположение должны также исключать занос и засорение мусорной трубки, вероятность которых значительно больше при установке трубки на уровне пода.

Абсолютные величины давлений в рабочих пространствах пламенных печей невелики и составляют в среднем 40–100 Н/ м^2 (4–10 мм вод. ст.). при измерении таких небольших давлений вдоль импульсной линии, идущей из рабочего пространства к

дифманометру, прокладывается компенсационная линия, начинающаяся от свода или стены печи. Компенсационная линия служит для устранения ошибок измерения давления в печи, связанных с возникновением геометрического напора в импульсном трубопроводе из-за возможного его нагрева на некоторых участках трассы и соизмеримого по своей величине с измеряемым давлением. Импульсная и компенсационная линии подключаются к различным камерам дифманометра, и влияния геометрических напоров, возникающих по трассе, взаимно уничтожаются.

Динамические свойства печей по каналу регулирования давления существенно отличаются от динамических свойств по каналу регулирования температуры. На рис. 8.7 приведена характерная кривая разгона по каналу давления в печи – положение дымового клапана, снятое на нагревательном колодце. Чистое запаздывание в контуре составляет 0,25 с, постоянная времени 4 с, т. е. печь является по этому каналу весьма малоинерционным объектом.

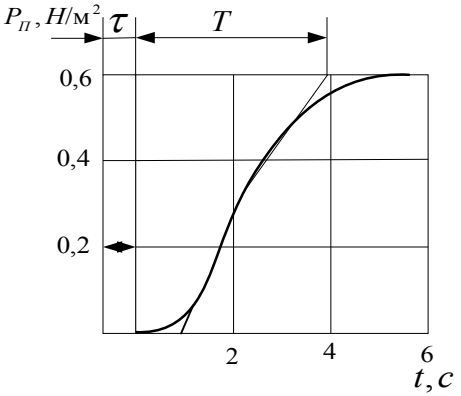


Рис. 8.7. Кривая разгона давления в печи

Как показывают аэродинамические расчеты и результаты экспериментов, вышеприведенные цифры, иллюстрирующие инерционность объекта, обусловлены в основном запаздываниями в измерительной линии и приборах. Инерционность соб-

ственно печи значительно меньше; переходный процесс изменения давления в рабочем пространстве при мгновенном перемещении дымового клапана заканчивается за сотые или десятые доли секунды. Если принять справедливое утверждение о том, что при небольших абсолютных значениях давлений, характерных для рабочих пространств металлургических печей, не происходит сжатия газов, то распространение возмущения от места установки регулирующего органа до камеры измерительного датчика должно происходить со скоростью звука, т. е. малоинерционно. Однако аппаратура является непременной составной частью системы измерения и, следовательно, объекта; ее динамические свойства входят в динамические свойства объекта в целом.

Малая инерционность изменений давления в рабочих пространствах металлургических печей приводит к тому, что даже больше печи не имеет смысла делить на зоны регулирования давления. Большая скорость выравнивания обеспечивает одинаковое давление во всех точках рабочего пространства. Необходимость деления на ряд зон регулирования давления возникает в некоторых протяжных термических печах, состоящих из отдельных зон (камер) термообработки, разделенных специальными тамбурами. В зонах таких печей поддерживается различная газовая атмосфера и не должно быть перетоков газа из камеры в камеру. Это достигается раздельным регулированием давления в камерах.

8.5. Автоматическое регулирование расхода и давления газа

Широко распространены в системах автоматики металлургических печей узлы автоматической стабилизации расхода и давления газа. Необходимость автоматической стабилизации расхода газообразного топлива возникает, например, при регулировании тепловой нагрузки мартеновской печи; на доменных печах регулируется расход дутья; в термических печах автоматически дозируется расход защитного газа и т. д. Стабилизация давления газообразного топлива, воздуха, кислорода обеспечивает нормальную работу горелочных устройств; без поддержания за-

данного давления газообразной среды невозможно точное измерение ее расхода, так как показания автоматических расходомеров зависят, как правило, от давления, измеряемого газа.

Контрольные вопросы:

1. От чего в основном зависит работа системы автоматической стабилизации?
2. Какие имеются способы контроля температуры в металлургических печах?
3. Какие регуляторы обеспечивают регулирование соотношение расхода топлива и воздуха?
4. Что чаще всего влияет на изменения давления в металлургическом регулировании?

9. ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В этом разделе изучаются цифровые системы управления, особенности их функционирования, описания и синтеза алгоритмов, а также обсуждаются проблемы, возникающие при дискретизации непрерывных моделей регуляторов и объектов управления.

Цифровая система автоматического управления – это система, в состав которой входит ЭВМ или иное устройство, осуществляющее обработку цифровой информации.

Форма представления и способ обработки информации определяют основную особенность работы цифровых систем и методов синтеза регуляторов. Дискретный характер сигналов в управляющей ЭВМ вызывает необходимость использования дискретных алгоритмов управления, которые могут быть построены преобразованием соответствующих непрерывных регуляторов или с использованием теории дискретных систем. В обоих случаях возникают проблемы дискретизации непрерывных динамических моделей и оптимального выбора интервала квантования, обсуждающиеся в п. 9.2.

Вместе с тем использование ЭВМ в контуре обратной связи приводит к целому ряду модельных особенностей цифровой системы, обусловленных спецификой взаимодействия ее функциональных (аппаратных) элементов. Для построения адекватной аналитической модели цифровой системы, как системы дискретно-непрерывного типа необходимо рассмотреть аппаратные средства и процессы обмена информацией между ними

9.1. Цифровые системы

Укрупненная схема цифровой системы управления приведена на рис. 9.1. Она содержит управляющую ЭВМ, объект управления ОУ и специализированные устройства ввода/вывода информации УВВ, предназначенные для сопряжения ЭВМ с объектом и поэтому получившие название *устройств сопряжения с объектом* (УСО).

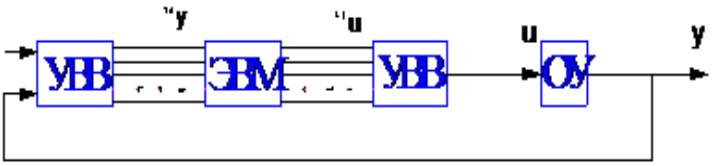


Рис. 9.1. Цифровая система управления

Управляемый процесс (объект), как правило, имеет аналоговую природу, и связанные с ними сигналы (в частности *y* и *u)* являются аналоговыми. В то же время управляющая ЭВМ (как и ряд других элементов рассматриваемого класса) имеет дело только с цифровой информацией, и сигналы на ее входах и выходах представлены цифровым кодом. Тем не менее, с точки зрения модельных свойств цифровой системы основным является не способ представления информации, а эффекты квантования сигналов.

9.1.1. Аппаратура цифровых систем

Рассмотрим основные блоки цифровых систем и их характеристики, определяющие особенности функционирования систем, специфику их математических моделей и методов исследования процессов управления.

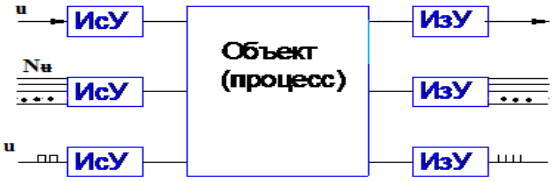


Рис. 9.2. Объект управления цифровой системы

В состав современного объекта управления входят разнообразные исполнительные (ИсУ) и измерительные устройства

(ИзУ) аналогового и цифрового типа (рис. 9.2). Так, в системах управления механическими объектами непрерывного действия (роботами, станками, транспортными средствами и другими устройствами аналоговой природы) используются:

- традиционные аналоговые исполнительные устройства, например, электроприводы), рассчитанные на аналоговые входные сигналы постоянного или переменного тока *u(t),* а *также* широтно-модулированные сигналы $u_n(t)$,
- цифровые устройства (шаговые и цифровые электроприводы), способные воспринимать цифровую информацию – параллельный код N_u.

Применение цифровых исполнительных устройств позволяет избежать необходимости преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал и упростить структуру УВВ.

К современным измерительным устройствам относятся разнообразные датчики аналоговой природы, выходом которых являются электрические сигналы постоянного или переменного тока *y(t),* кодовые датчики, обеспечивающие получение параллельного цифрового кода N_y, а также импульсные (инкрементные) измерительные устройства, на выходе которых получается импульсная последовательность n_y. Очевидно, что цифровые измерительные устройства указанных типов в наибольшей степени совместимы с цифровыми процессами в управляющей ЭВМ, что обусловливает возможность упрощения УВВ.

Центральным элементом цифровой системы является управляющая ЭВМ, которая по заданному алгоритму осуществляет обработку информации, поступающей от измерительных устройств, и выполняет функции устройства управления (цифрового регулятора). Укрупненный алгоритм работы ЭВМ, включающий процедуры обмена информацией с УСО, представлен на рис. 9.3. Циклический характер обработки информации в отличие от последовательного вычислительного процесса, реализуемого обычными компьютерами общего пользования, является важной функциональной особенностью *управляющих* ЭВМ.

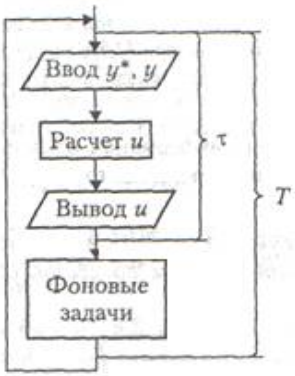


Рис. 9.3. Алгоритм работы управляющей ЭВМ

Важнейшими модельными особенностями управляющей ЭВМ как цифрового регулятора являются ее дискретность и наличие запаздывания в процессе обработки сигналов. Дискретность обусловлена квантованием по уровню и времени всех вычислительных процессов, а, следовательно, и дискретным характером сигналов на входе $N_y(kT)$ и выходе ЭВМ $N_u(kT)$. Интервал квантования по времени T задается с помощью таймера, а приращение по уровню зависит от разрядности ЭВМ. Для ЭВМ с достаточно большой разрядной сеткой квантованием по уровню обычно пренебрегают. Тогда сигналы $N_y(kT)$ и $N_u(kT)$ рассматриваются как стандартные амплитудно-модулированные импульсные последовательности (решетчатые функции).

Запаздывание, вносимое управляющей ЭВМ, вызвано потерями времени на основные операции, связанные с расчетом управления, ввод–вывод информации и вычисление управления по заданному алгоритму. Так как кроме основной задачи (управления) ЭВМ обеспечивает решение целого ряда вспомогательных (фоновых) задач, то это время обычно меньше интервала дискретности: $\tau < T$. *С* учетом указанного явления выходом управляющей ЭВМ следует считать дискретный сигнал $N_u(kT- \tau)$, смещенный относительно идеального сигнала $N_u(kT)$ на величину τ. В ряде случаев для упрощения модельного представления цифрового регулятора запаздыванием пренебрегают. В иных случаях

считают, что $\tau = T$, и, следовательно, выходом регулятора считают сигнал $N_u(kT - 1)T)$. При этом в состав цифровой системы вводится дополнительный элемент – звено чистого запаздывания.

В дальнейшем будем полагать, что работа всех устройств цифровой системы синхронизирована и происходит с интервалом дискретности T, а их разрядные сетки одинаковы.

В функции устройств сопряжения с объектом (специализированных УВВ, рис. 9.4) входит промежуточное хранение цифровой информации и (при необходимости) преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно. УСО содержат устройства аналогового ввода–вывода (АВВ) и цифрового ввода–вывода (ЦВВ), предназначенные, соответственно, для ввода–вывода аналоговых и цифровых сигналов.

Отметим, что функция хранения информации обычно связана с преобразованием импульсных сигналов $N(kT)$ в кусочно-постоянные. Для последних введем обозначение $\overline{N}(kT)$.

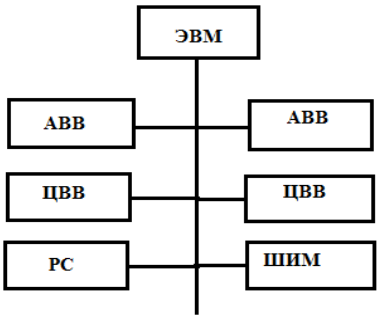


Рис. 9.4**.** Устройства сопряжения с объектом

Рассмотрим обобщенную структуру типовых устройств сопряжения, уделяя основное внимание модельным особенностям процессов обработки информации (данных) и опуская многие технические детали, связанные с особенностями организации процессов обмена информацией конкретных типов управляющих ЭВМ.

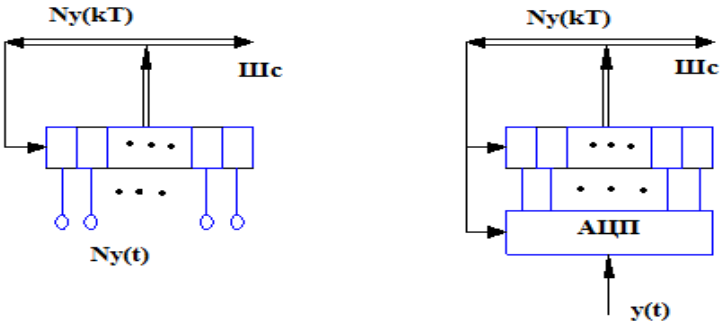


Рис. 9.5. УСО: устройства цифрового
(а) и аналогового (б) ввода

Устройства ввода (рис. 9.5) обеспечивают временное хранение и преобразование к цифровой форме информации, полученной от измерительных устройств аналогового и цифрового типа. Они содержат аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и управляемые буферные регистры – входные порты. Простейшим является *устройство цифрового ввода,* представляющее собой входной регистр, на который поступает непрерывно обновляющаяся информация от цифровых измерительных устройств – параллельный цифровой код $N_y(kT)$ (рис. 9.5, *а*). Периодически (с тактом Т) содержание входного регистра $\overline{N_y}(kT)$ обновляется и через шину ЭВМ (Шс) пересылается в центральный процессор, где используется для выполнения необходимых вычислений. Тем самым на выходе устройства (или входе ЭВМ) формируется импульсный (квантованный по времени и уровню) цифровой сигнал

$$N(kt) = N_y(t)\big|_{t=kT}.$$

Последнее выражение характеризует эффект временного квантования, происходящего в рассматриваемом устройстве благодаря периодическим обращениям процессора к буферному регистру.

Устройства аналогового ввода (рис. 9.5, *б)* кроме входных портов включают аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Тем самым обеспечивается преобразование аналогового сигнала *y(t)* в периодически обновляемый цифровой код кусочно-постоянный сигнал $\overline{N_y}(kT)$ с последующей пересылкой последнего в процессор. С точки зрения обработки информации (данных) устройство осуществляет преобразование непрерывного сигнала *y(t)* в дискретный (квантованный по уровню и времени) сигнал $N_y(kT)$. В предположении, что число разрядов входного регистра (и ЭВМ) достаточно велико, квантованием по уровню (а также эффектами переполнения), как правило, пренебрегают. Тогда характеристика устройства аналогового ввода принимает вид

$$N_y(kt) \sim y(t)\big|_{t=kT}$$

и отражает основное свойство этого блока как *квантователя* аналоговых сигналов, обусловленное циклическим характером работы АЦП или периодическим обращением центрального процесса к буферному регистру.

При необходимости в состав устройств ввода включаются также *реверсивные счетчики,* осуществляющие преобразование последовательного кода n_y в параллельный код N_y (см. рис. 9.4).

Устройства вывода информации обеспечивают временное хранение и преобразование информации, полученной от ЭВМ и поступающей далее на исполнительные устройства. Они содержат цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) и управляемые буферные регистры – выходные порты.

Устройство цифрового вывода (рис. 9.6, *а*) представляет собой выходной регистр, на который в фиксированные моменты времени $t = k$Г через шину Шс поступает информация с центрального процессора – квантованный по времени (импульсный) цифровой сигнал $N_u(kT)$, предназначенный для цифровых исполнительных устройств. Регистр обеспечивает временное хранение полученной информации в промежутке между поступлением импульсов, т. е. на его выходе формируется кусочно-постоянный сигнал $\overline{N_y}(kT)$.

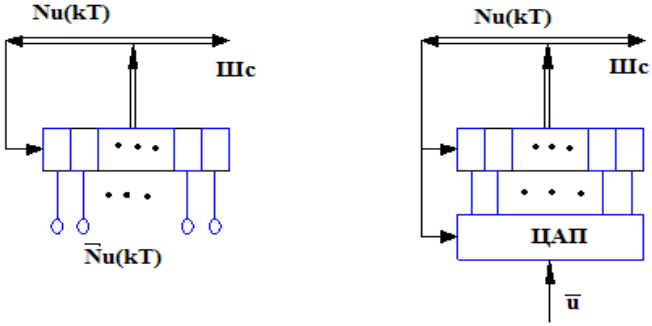


Рис. 9.6. УСО: устройства цифрового (*а*) и аналогового (*б*) вывода

Устройства аналогового вывода (рис. 9.6, *б)* кроме выходных портов содержат цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). С их помощью обеспечивается преобразование поступающего от ЭВМ цифровой кода $N_u(kT)$ в аналоговый управляющий сигнал, предназначенный для аналоговых исполнительных устройств. На входы ЦАП с буферного регистра поступает кусочно-постоянный квантованный по уровню цифровой сигнал $\overline{N_y}(kT)$, а на его выходе формируется аналоговый сигнал $\bar{u}(kГ)$. Последний по информационному содержанию повторяет сигнал на выходе регистра и также является кусочно-постоянным квантованным по уровню. Таким образом, ЦАП не вносит информационных изменений в преобразуемые сигналы и является пассивным элементом. В предположении, что число разрядов выходного регистра и ЦАП достаточно велико, квантованием по уровню пренебрегают. Тогда характеристика устройства аналогового вывода в целом принимает вид

$$u(t) = \bar{u}(kT) \sim \overline{N_u}(kT)$$

и отражает основную особенность этого блока как *фиксатора* дискретных сигналов (экстраполятора нулевого порядка), обусловленную свойством выходного регистра сохранять информацию в течение одного цикла работы.

В состав устройства вывода часто включаются также *широтно-импульсные модуляторы* (ШИМ, рис. 9.4), обеспечивающие преобразование цифрового кода $N_u(kT)$ в широтно-модулированный сигнал $u_П(t) = \bar{u}_П(kT)$ без промежуточного преобразования к аналоговой форме.

9.1.2. Прохождение сигналов и эквивалентная схема цифровой системы управления

Для построения математической модели цифровой системы как системы дискретно-непрерывного типа введем в рассмотрение некоторые специальные блоки, отражающие модельные особенности отдельных элементов системы, рассмотренных в 9.1.1.

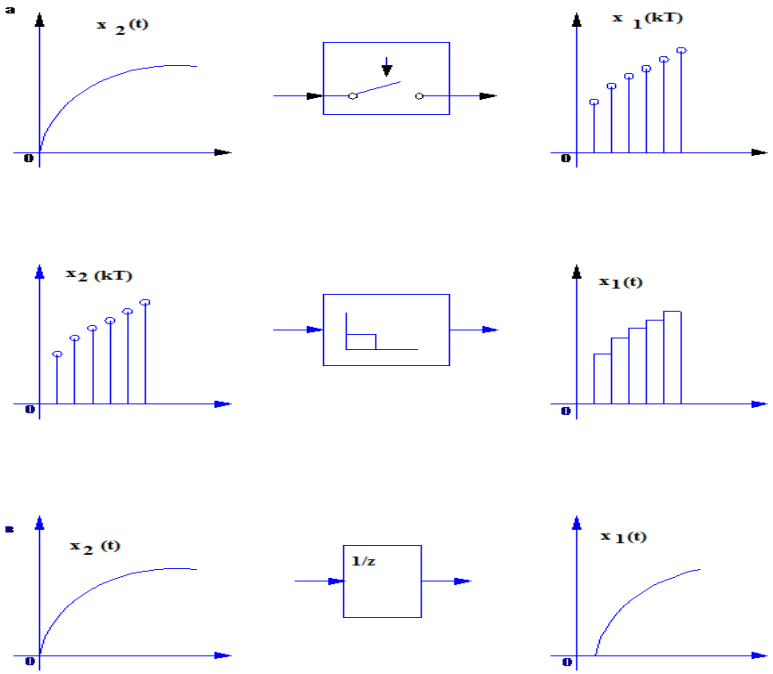


Рис. 9.7. Квантователь (*а*), экстраполятор (*б*) и элемент задержки (*в*)

К таким блокам относятся

- *квантователь* непрерывных сигналов (рис. 9.7, *а*), имеющий характеристику

$$x_1(kT) = x_2(t) \text{ при } t = kT;$$

- *фиксатор или экстраполятор нулевого порядка* (рис. 9.7, *б*), описываемый выражением

$$x_1(t) = x_2(kT) \text{ при } t \in [kT\ (k+1)T] \qquad (9.2)$$

- звено *чистого запаздывания (элемент задержки,* см. 8.1.4) с характеристикой

$$x_1(t) = x_2(t - \tau), \qquad (9.3)$$

где τ – время задержки (рис. 9.7, *в*)

Теперь рассмотрим функциональную схему цифровой системы с объектом управления аналоговой природы (рис. 9.8) и сигналы в различных ее точках (рис. 9.9 и 9.10). Схема представлена самим ОУ с аналоговыми измерительными и исполнительными устройствами, управляющей ЭВМ, таймером *Т,* обеспечивающим тактирование процессов с интервалом *Т,* и устройствами аналогового ввода–вывода. В предположении достаточной разрядности цифровых элементов пренебрежем эффектом квантования сигналов по уровню и отвлечемся от различия между аналоговыми и цифровыми сигналами, принимая во внимание, что в рамках указанного предположения способ кодирования информации не влияет на информационное содержание сигналов.

Отметим, что (при тех же предположениях) работа цифровых систем управления аналоговыми процессами с цифровыми измерительными и исполнительными устройствами, а также систем с инкрементными датчиками и иными типами цифровых устройств может быть рассмотрена по той же схеме и приводит к идентичной математической модели.

Функциональная схема типовой цифровой системы содержит АЦП, входным сигналом которого является непрерывный (неквантованный) сигнал *y(t)* (точка А), а выходным – кусочно-

постоянный сигнал $\bar{y}(t) = \bar{y}(kT)$ (точка В), который поступает на вход следующего блока – входного регистра ВхР. Выходом последнего служит шина управляющей ЭВМ (точка С), на которой в моменты ввода информации $t = kT$ появляется импульсный сигнал $y(kT)$. Таким образом, первые два блока системы преобразуют непрерывный сигнал $y(t)$ в квантованный по времени дискретный сигнал $y(kT)$ (решетчатую функцию), т. е. представляют собой квантователь

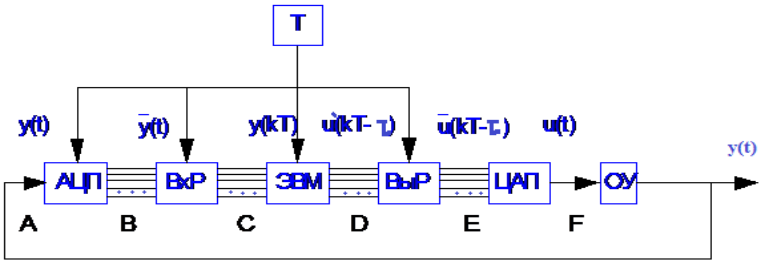


Рис. 9.8. Функциональная схема цифровой системы

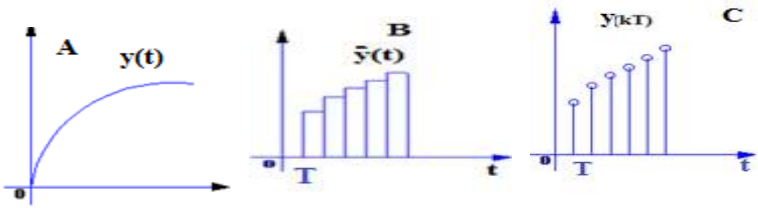


Рис. 9.9. Прохождение сигналов: точки А, В, С

(см. рис. 9.7, а). При этом, как отмечалось ранее, эффект квантования вызван периодическими кратковременными обращениями ЭВМ к входному регистру.

Дискретный сигнал $y(kT)$ поступает в процессор ЭВМ, где производится расчет текущих значений управляющего воздействия. В идеальном случае на выходе ЭВМ (точка О) мгновенно формируется дискретный сигнал $u'(kT)$ (KT). Однако с учетом эффектов запаздывания выходом данного блока следует считать

смещенную импульсную последовательность *u'(kt - τ),* где $\tau \leq T$ или, полагая для простоты $\tau = T$, сигнал *u'(k-1)T)*. Таким образом, в состав модели цифровой системы вводится элемент задержки (см. рис. 9.7, *в)*.

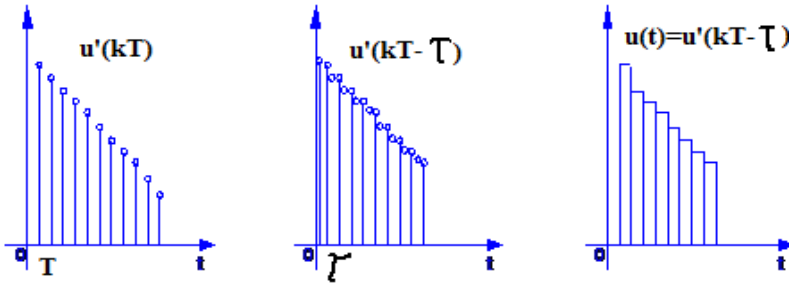


Рис. 9.10. Прохождение сигналов: точки О, Е, Р

В моменты времени $t = kt - \tau$ сигнал с выхода ЭВМ *u'(kt - τ)* поступает на выходной регистр ВыР, который обеспечивает его сохранение в течение интервала *T*. Тем самым обеспечивается преобразование импульсной последовательности *u'(kt - τ)* в кусочно-непрерывный сигнал $\bar{u}'(kt-\tau)$ (точка Е). Рассматриваемый элемент схемы является фиксатором (см. рис. 9.7, *б*).

Цифро-аналоговый преобразователь, как уже отмечалось, является пассивным элементом, и поэтому сигнал на его выходе (точка Р) по информационному содержанию совпадает с входным сигналом. Указанный сигнал является входом объекта управления и, следовательно, $u(t) = \bar{u}'(kt-\tau)$.

С учетом вышеизложенного может быть построена эквивалентная схема цифровой системы управления, представленная на рис. 9.11 и соответствующая ее математической модели для случая линейного объекта управления, линейного регулятора и запаздывания ЭВМ $\tau = T$. В состав схемы входит ОУ с передаточной функцией $W_0(p)$, цифровой регулятор с передаточной функцией *K(z),* квантователь *К*, элемент задержки 1/z и экстраполятор

Э. В более общем случае модель может включать каналы задающих воздействий и множественные обратные связи по различным переменным системы.

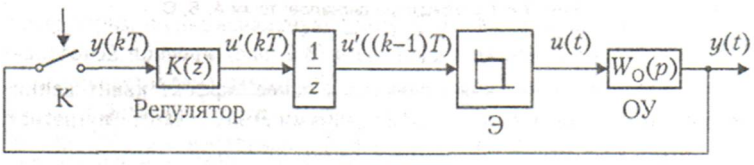


Рис. 9.11. Эквивалентная схема цифровой системы

9.1.3. Особенности цифровых систем

Основной особенностью функционирования цифровой системы является цифровой способ обработки информации в регуляторе (управляющей ЭВМ). Такой способ предусматривает использование только арифметических операций и позволяет легко реализовывать алгебраические алгоритмы управления и сводящиеся к ним рекуррентные процедуры. Так как последние представляют собой решения разностных уравнений, то можно сказать, что цифровая обработка информации и ориентирована на решение уравнений такого типа. При этом возможность непосредственной реализации динамических алгоритмов управления записанных в виде дифференциальных либо интегральных уравнений, исключается, и поэтому подобные алгоритмы также должны быть приведены к рекуррентной форме.

Пример 9.1. Простейший пропорциональный алгоритм управления имеет вид

$$u = K\varepsilon, \tag{9.4}$$

$$\varepsilon = \dot{y} - y. \tag{9.5}$$

Выражения содержат только операции сложения и умножения и поэтому легко реализуются на управляющей ЭВМ (рис. 9.12, *а*).

Пример 9.2. Наиболее распространенным элементом динамических регуляторов является интегрирующее звено, описываемое дифференциальным уравнением

$$\dot{u}(t) = Ky(t), \quad u(0) = u_0. \tag{9.6}$$

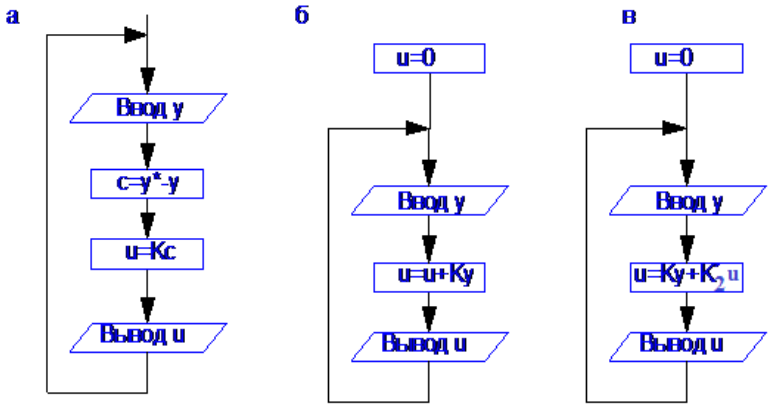


Рис. 9.12. Цифровые алгоритмы управления

или, в интегральной форме

$$u(t) = u_0 + K\int_0^t y(\tau)d\tau. \tag{9.7}$$

Так как операции дифференцирования и интегрирования не могут быть реализованы на цифровых вычислительных устройствах, то их необходимо привести к рекуррентной форме.

Приближенное решение дифференциального уравнения (9.6) получается с помощью метода Эйлера

$$u(kT) = u_0 + KT\sum_{t=0}^{k-1} y(iT) \tag{9.8}$$

и требует вычисления на каждом шаге суммы $k + 1$ слагаемого. Для получения рекуррентной формы по формуле (9.8) найдем

значение u в момент времени $(k + 1)$T и запишем

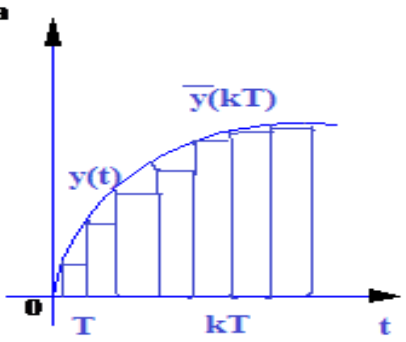
$$u((k+1)T) = u_0 + KT\sum_{t=0}^{k-1} y(iT) = u(kT) + KTy(kT). \quad (9.9)$$

Таким образом, получена формула

$$u((k+1T) = u(kT) + K_d y(kT), \quad u(0) = u_0, \quad (9.10)$$

где $K_d = KT$, описывающая дискретный интегратор или, в частном случае, дискретную версию интегрального закона управления (И-регулятора). Рекуррентное выражение (9.10) легко реализуется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 9.12, *б*.

Замечание 9.1. Вывод основной формулы (9.8) предусматривает замену непрерывной функции *y(t)* кусочно-постоянной функцией $\overline{y}(KT)$. *Такая* замена (аппроксимация нулевого порядка) и вызывает *методическую ошибку* расчетов по рекуррентной формуле (9.10).



Для повышение точности требуется уменьшение интервала дискретности *T*, что связано с ускорением вычислений. Использование более точных приемов аппроксимации функции *y(t)*, характерное для более совершенных методов цифрового интегрирования (например, методов Рунге-Кутта, Адамса и др.) и, следовательно, более сложных вычислительных процедур позволяет также уменьшить методическую ошибку интегрирования.

Во всех случаях уменьшение ошибки связано с необходимостью ускорения вычислений и использованием более быстродействующих ЭВМ.

Замечание 9.2. При условии, что сигнал *y* является кусочно-постоянным: $y = \overline{y}(kT)$, рассмотренный метод цифрового интегрирования позволяет получить абсолютно точные значения переменной *u(t)* в дискретные моменты времени $t = kT$ и не приводит к получению методической ошибки. Такая ситуация, нехарактерная для цифровых регуляторов, где сигнал *y* имеет непрерывную природу, наблюдается в объектах управления цифровых систем, на вход которых поступает кусочно-постоянный сигнал управления *u(t)*. Данное свойство используется при дискретизации непрерывных объектов и приводит к получению точных дискретных моделей линейных ОУ (см. 9.2.1).

Таким образом, цифровой способ обработки информации в цифровых САУ вызывает необходимость использования дискретных моделей регуляторов. Принимая во внимание непрерывную (неквантованную) природу большинства реальных управляемых процессов, приходим к следующему выводу.

Основная модельная особенность цифровой системы заключается в том, что она является дискретно-непрерывной и описывается как разностными, так и дифференциальными уравнениями.

Для линейного случая – это уравнения регулятора, например, дискретная операторная модель

$$u'(kT) = K(z)y(kT), \tag{9.11}$$

и непрерывные операторные уравнения ОУ типа

$$y(t) = W_0(p)y(t), \tag{9.12}$$

где $K(z)$ и $W_0(p)$ – соответствующие передаточные функции (9.12).

Сопряжение двух указанных частей модели осуществляется с помощью квантователя и экстраполятора нулевого порядка.

Кроме отмеченных выше особенностей функционирования цифровой системы, связанных с цифровым способом обработки информации, последний вызывает также временную задержку, обусловленную потерями времени на выполнение вычислений на каждом цикле работы ЭВМ. Это явление отражается в модели системы в виде звена чистого запаздывания, связывающего идеальный сигнал на выходе дискретного регулятора $u'(kГ)$ с реальным смещенным сигналом $u(kT) = u'(kT - \tau)$, поступающим после экстраполяции на вход ОУ.

Полагая $\tau = T$, запишем

$$u(kГ) = \frac{1}{z} u'(kT). \qquad (9.13)$$

При исследовании цифровой системы последнее уравнение может рассматриваться как описание дополнительного элемента регулятора или быть отнесено к модели ОУ.

Указанные выше особенности моделей цифровых систем и в первую очередь их дискретно-непрерывная природа обусловливают основные трудности анализа и проектирования. В связи с этим нашли распространение два подхода к исследованию цифровых систем:

- с использованием теории непрерывных систем;
- с использованием теории дискретных систем.

Первый подход предусматривает построение непрерывного регулятора, например,

$$u(t) = K(p)y(t), \qquad (9.14)$$

и его последующую дискретизацию, т. е. приведение к дискретной форме (9.11). Основной недостаток такого подхода заключается в наличии методической ошибки (см. замечание 9.1). Кроме того, подход не позволяет учесть эффекта запаздывания цифрового регулятора. Несмотря на это подход получил достаточно широкое распространение ввиду его простоты и возможности достижения приемлемого качества процессов при использовании быстродействующих вычислительных устройств, обеспечивающих возможность получения малого значения интервала квантования Т.

Второй подход предполагает дискретизацию самого объекта управления, т. е. его приведение к виду

$$y(kT) = W_d(z)u(kT), \tag{9.15}$$

а затем синтез дискретного регулятора. Подход лишен основной методической ошибки (см. замечание 9.2) и позволяет, кроме того, принять во внимание запаздывание ЭВМ путем соответствующего расширения дискретной модели объекта.

Пример 9.3. Рассмотрим простейший объект управления, представленный интегрирующим звеном

$$\dot{y}(t)K_0u(t) \tag{9.16}$$

или, в операторной форме

$$y(t) = \frac{K_0}{p}u(t), \tag{9.17}$$

где входной сигнал *u(t)* является выходом буферного регистра и поэтому является кусочно-постоянным.

В силу, последнего получаем точную дискретную модель объекта

$$y((k+1)T) = y(kT) + bu(kT), \tag{9.18}$$

где $b = K_0T$ или в операторной форме

$$y(kT) = \frac{b}{z-1}u(kT). \tag{9.19}$$

Принимая во внимание, что входной сигнал *u(kT)* является запаздывающим по сравнению с идеальным сигналом на выходе цифрового регулятора *u' (kT)* (см. 9.1.2), т. е.

$$u((k+1)T) = u'(kT), \tag{9.20}$$

введем в рассмотрение дополнительный динамический элемент – звено чистого запаздывания, и запишем

$$u(kT) = \frac{1}{z}u'(kT). \qquad (9.21)$$

Таким образом, расширенная модель ОУ с учетом запаздывания описывается разностными уравнениями (9.18), (9.20) или в операторном виде

$$y(kT) = \frac{b}{z(z-1)}u'(kT). \qquad (9.22)$$

Задачи управления дискретным объектом (9.18), (9.20) решаются стандартными методами теории дискретных динамических систем. Так, для решения задачи стабилизации нулевого значения выходной переменной *y* (или переменных состояния *(y, u)* расширенного ОУ) используется модальный регулятор

$$u'(kT) = K_1 y(kT) + K_2 u(kT). \qquad (9.23)$$

Контрольные вопросы:

1. Что входит в состав цифровой системы управления?
2. Чем отличаются устройства цифрового ввода–вывода от аналогового устройства ввода–вывода?
3. Каковы функции входного и выходного регистров?
4. Могут ли операции дифференцирования и интегрирования реализованы на цифровых вычислительных устройствах? Что нужно для этого сделать?
5. Каково различие при исследовании цифровых систем с использованием теории непрерывных систем от исследований с использованием теории дискретных систем?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бесекерский В. А., Герасимов А. Н. и др.* Лекции по теории автоматического управления. Министерство обороны СССР, 1968 – 582 с.

2. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического регулирования / *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* – СПб: Профессия, 2003. – 752 с.

3. *Воронов А. А.* Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы / *Воронов А. А.* – М.: Энергоиздат, 1981. –304 с.

4. Основы теории автоматического регулирования / Под ред. *В. И. Крутова*. – М.: Машиностроение, 1984. –368 с.

5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. *А. А. Красовского*. – М.: Наука, 1987. – 711 с.

6. *Васильев Д. Р., Чуич В. Г.* Системы автоматического управления (примеры работ). – М.: Высшая школа, 1967. – 420 с.

7. Автоматизация типовых технологических процессов и установок. Учебник для вузов / *А. М. Корытин, Н. К. Петров и др.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 432 с.

8. *Снателев Ю. М., Старосельский В. А.* Моделирование и управление в сложных системах / Под ред. *Н. П. Бусленко*. – М.: Сов. радио, 1974. – 264 с.

9. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.* Оптимизация в технике в 2-х книгах. – М.: Мир, 1986. – 350 с.

10. *Кремлевский П. П.* Расходомеры и счетчики количества. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1989. – 700 с.

11. *Олсон Г., Пиани Д.* Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб: Невский диалект, 2001. – 557 с.

12. *Харазов В. Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб: Профессия, 2009. – 592 с.

13. ГОСТ Р 8.585.–2001. Термометры. Номинальные статические характе-ристики преобразования.

14. ГОСТ 6651–94. Термометры сопротивления.

15. *Раннев Г. Г., Тарасенко А. П.* Методы и средства измерений. – М.: АСАДЕМА, 2004. – 330 с.

16. Информационно-измерительная техника и технологии / Под ред.
Г. Г. Раннева. – М.: Высшая школа, 2002. – 455 с.

17. *Глинников Г. М., Маковский В. А.* АСУТП в черной металлургии. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1999. – 310 с.

18. Теория автоматического управления. Курс лекций/образовательный сайт http://www.toehelp.ru/theory/tau/ contents.html. 2009.

19. *Мирошник Н. В.* Теория автоматического управления. Линейные системы: Учеб. пособие. – СПб: Питер. 2005. – 336 с.

20. *Малафеев С. И., Малафеева А. А.* Основы автоматики и систем автоматического управления: Учебник. – М.: Академия, 2010. – 384 с.

21. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы: Учеб. пособие / *Солодовников В. В., Коньков В. Г. и др.* / Под ред. *В. В. Солодовникова.* – М.: Высшая школа, 1991. – 255 с.

22. *Советов Б. Я., Яковлев С. А.* Моделирование систем. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.

23. *Лейзерович Г. Я., Бабина Н. В., Серебренникова Э. Я.* Обжиг цинковых концентратов в кипящем слое. – М.: НТИ по черной и цветной металлургии, 1959 – 222 с.

24. *Клюев А. С., Глазов Б. В., Дубровский А. Х.* Проектирование систем автоматизации технологических процессов (справочное пособие). – М.: Энергия, 1980. – 512 с.

25. *Ларионов А. М., Майоров С. А., Новиков Г. И.* Вычислительные комплексы системы и сети. Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 228.

26. *Растригин А. А.* Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974. – 632 с.

27. *Галкин М. Ф., Кроль Ю. С.* Кибернетические методы анализа электроплавки слали. – М.: Металлургия, 1971. – 304 с.

28. *Беленький А. М., Бердышев В. Ф. и др.* Автоматическое управление металлургическими процессами. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

29. *Васильков Ю. В., Василькова Н. Н.* Компьютерные технологии вычислений в металлургическом моделировании: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 256 с.

30. *Родионов В. Д., Терехов В. А., Яковлев В. Б.* Технологические средства АСУТП: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.

31. *Ярмухамедова З. М.* Моделирование химико-технологических объектов: Учеб. пособие. – Алматы, 2005. – 80 с.

32. *Цирлин А. М.* Оптимальное управление технологическими процессами: Учеб. пособие. – М.: Энергоиздат, 1986. – 400 с.

33. *Ципкин Я. З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1986. – 400 с.

34. *Чураков Е. П.* Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

35. *Полоцкий Л. М., Лапшенков Г. И.* Автоматизация химических процессов. – М.: Химия, 1982. – 296 с.

36. *Сулейменов Б. А., Мутанов Г. М., Сулейменов А. Б.* Интеллектуальные системы управления: Теория, методы, средства. – Алматы: Қазақ университеті. 2012. – 224 с.

37. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования. Учебное пособие для вузов / *Г. М. Глинков, В. А. Маковский и др.* – М.: Металлургия, 1986. – 352 .

38. *Попель С. И., Сотников А. И., Бороненков В. Н.* Теория металлургических процессов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.

39. *Ротач В. Я.* Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

40. *Стефани Е. П.* Основы построения АСУТП: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1983. – 376 с.

41. *Глинков Г. М., Климовицкий М. Д.* Теоритические основы автоматического управления металлургическими процессами: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 304 с.

42. Каганов В. Ю., Блинов О. М., Беленький А. М. Автоматизация управления металлургическими процессами: Учебник. – М.: Металлургия, 1974. – 416 с.

43. *Медведев Р. Б., Бондарь Ю. Д., Романенко Р. Д.* АСУТП в металлургии: Учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.

44. Современные методы идентификации систем / Под ред. *П. Эйкхоффа.* – М.: Мир, 1983. – 400 с.

45. *Сыздыков Д. Ж.* Идентификация в системах управления. – Алматы: Эверо, 2007. – 216 с.

46. *Кафаров В. В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии: Учеб. пособие для вузов. – М.: Химия, 1968. – 380 с.

47. *Бояринов А. И., Кафаров В. В.* Методы оптимизации в химической технологии: Учеб. пособие для вузов. – М.: Химия, 1969. – 566 с.

48. *Острем К., Виттермарк Б.* Системы управления с ЭВМ / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 480 с.

49. *Арефьев И. Б., Кезлинг Г. Б., Кукор Б .Л.* Интегрированные автоматизированные системы управления в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

50. *Шкатов Б. Ф., Шувалов В. В.* Основы автоматизации технологических процессов химических производств. Учебник для техникумов. – М.: Химия, 1988. – 304 с.

51. *Каганов В. И.* Радиоэлектронные системы автоматического управления. Компьютеризованный курс: Учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 432 с.

52. *Петрова А. М.* Автоматическое управление: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ, 2010. – 240 с.

53. *Шишмараев В. Ю.* Автоматика. Учебник для сред. проф. образования. – М.: Издательский центр Академия, 2010. – 288 с.

54. *Пантелев В. Н., Прошин В. М.* Основы автоматизации производства: Учеб. пособие для порофесс. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 192 с.

55. *Ицкович Э. Л.* Особенности современных коллекторов, предназначенных для автоматизации технологических процессов// Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 4.

56. ГОСТ 21.404–85 СПДС. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условных приборов и средств автоматизации в схемах.

57. Компоненты для комплексной автоматизации. Каталоги SIMATIC. – 2006. – 174 с.

58. *Матвейкин В. Г., Фролов С. В., Шехтман М. Б.* Применение SCADA – системы при автоматизации технологических процессов. – М.: Машиностроение, 2000. – 176 с.

59. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. – Т.3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. *К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2004. – 616 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение……..	3
1.	Современное промышленное производство и АСУТП……	5
	Основные понятия системы……	5
1.1.	Классификация и структура современных технологических объектов управления. Виды объектов технологии…….	5
1.2.	Классификация и структура технологических объектов управления……...	6
1.3.	Понятие системы. Системный подход к управлению системами……	9
1.4.	Системный подход к управлению сложными системами…….	12
2.	Переработка технологической информации. Состояния систем……	26
2.1.	Управляемость технологического процесса …….	26
2.2.	Уравнение состояния динамических систем……	35
2.3.	Описание линейной системы в пространстве состояния……..	36
3.	Технические средства автоматизации типовых технологических процессов……...	41
3.1.	Интерфейс между техническим процессом и системой управления……...	41
3.2.	Связь УВМ с технологическим объектом……	80
3.3.	программируемые логические контроллеры (ПЛК)……	84
3.3.1.	Общее описание и классификация ПЛК……...	84
3.3.2.	Контроллеры компании Advantech……	88
3.3.3.	Контроллеры компании Siemens……	95
3.3.4.	Контроллеры компании SMART2……	102
3.4.	Функциональные схемы систем измерения и автоматизации…….	104
3.4.1.	Условные обозначения приборов и средств автоматизации в системах……..	106
3.4.2.	Графическое оформление схем автоматизации...	122

4.	Автоматизация систем управления технологическими процессами……..	130
4.1.	Структура современной АСУТП, ее функции и основные разновидности…….	130
4.2.	Состав АСУТП…….	133
4.3.	Использование SCADA-систем при создании АСУТП…….	136
4.4.	Схемы автоматизации типовых технологических процессов……	138
4.4.1.	Управление процессом в реальном времени……	138
4.4.2.	Управление последовательностью событий и бинарное управление……...	141
4.4.3	Автоматизация процесса каталитического реформенного нефти……...	144
4.4.4.	Описание схемы автоматизации АСУТП реформенного нефти……...	148
5.	Автоматизация непрерывных и дискретных систем управления……...	153
5.1.	Статические и динамические характеристики. Дифференциальное уравнение САР……..	153
5.2.	Передаточные функции. Частотные характеристики……	155
5.3.	Типовые возмущающие функции……..	160
5.4.	Переходные функции……...	163
5.5.	Типовые звенья……	164
5.6.	Передаточные функции САР……..	169
6.	Экспериментальные методы определения динамических характеристик объектов управления……	173
6.1.	Классификация методов определения динамической модели объекта управления……	173
6.2.	Определение динамических объекта способом нанесения пробных возмущений……	177
6.3.	Определение динамических характеристик объекта по данным его нормальной эксплуатации……	182
7.	Синтез систем автоматического регулирования..	185

7.1.	Регуляторы и законы регулирования…….	186
7.2.	Показатели качества регулирования……..	195
7.3.	Выбор регулятора и определение его настроек…	203
7.4.	Анализ качества регулирования…….	210
7.5.	Пример расчета САР……...	212
7.6.	Система автоматического регулирования газоперекачивающего агрегата……..	216
8.	Типовые узлы систем автоматического регулирования и управления технологических процессов в металлургических печах……	227
8.1.	Основные типовые узлы регулирования……...	227
8.2.	Автоматическое регулирование температуры в печи……	232
8.3.	Автоматическое регулирование соотношения топливо-воздух……	237
8.4.	Автоматическое регулирование давления в печи…	244
8.5.	Автоматическое регулирование расхода и давления газа…….……..	247
9.	Цифровые системы……..	249
9.1.	Цифровые системы…….……	249
9.1.1.	Аппаратура цифровых систем……	250
9.1.2.	Прохождение сигналов и эквивалентная схема цифровой системы управления……..	257
9.1.3.	Особенности цифровых систем……	261
	Библиографический список……	368

Учебное издание

Кошимбаев Шамиль Кошимбаевич
Жусупбеков Сарсен Сейтбекович

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Нач. РО УИЦ *З. А. Губайдулина*
Редактор *З. А. Губайдулина*
Компьютерная верстка *Д. Ш. Тажиева*

Подписано в печать 29.02.2016 г.
Тираж 300 экз. Формат 60x84x 1/16. Бумага типогр. № 1.
Уч.-изд.л.17,2. Усл. п.л.16,0. Заказ №. 668. Цена договорная.

Издание Казахского национального исследовательского технического университета имени К. И. Сатпаева
г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

ISBN 978-601-228-930-5

