

АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебная программа дисциплины

➤ **Учебное пособие**

Методические указания по лабораторным работам

Методические указания по самостоятельной работе

Банк тестовых заданий в системе UniTest



УДК 669.2
ББК 34.3
О-74

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Автоматизация металлургических производств» подготовлен в рамках инновационной образовательной программы «Многоуровневая подготовка специалистов и инновационное обеспечение горно-металлургических предприятий по сертификации, управлению качеством, технологической и экономической оценке минерального, вторичного и техногенного сырья», реализованной в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;

Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

О-74 Автоматизация металлургических производств. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / В. А. Осипова, Т. В. Астахова, А. А. Дружинина, И. И. Лапаев. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Автоматизация металлургических производств : УМКД № 218-2007 / рук. творч. коллектива Т. В. Астахова). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 2 Мб свободного дискового пространства ; привод *DVD* ; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит) ; *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

ISBN 978-5-7638-1091-2 (комплекса)

ISBN 978-5-7638-1405-7 (пособия)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802614 от 01.01.0001 г. (комплекса)

Настоящее издание является частью учебно-методического комплекса по дисциплине «Автоматизация металлургических производств», включающего учебную программу дисциплины, методические указания к лабораторным работам, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Автоматизация металлургических производств. Банк тестовых заданий», наглядное пособие «Автоматизация металлургических производств. Презентационные материалы».

Рассмотрены основы теории автоматического управления, элементы и системы автоматического управления металлургическими агрегатами и процессами, а также элементы проектирования систем автоматизации. Описаны типы, состав и принципы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами и предприятием.

Предназначено для студентов направления подготовки магистров 150100.68 «Металлургия» укрупненной группы 150000 «Материаловедение, металлургия и машиностроение».

© Сибирский федеральный университет, 2008

Рекомендовано Инновационно-методическим управлением СФУ
в качестве учебного пособия

Редактор Л. Г. Семухина

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения информационно-аналитического департамента СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 01.10.2008

Объем 2 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ..	8
1.1. Основные понятия	8
1.2. Классификация систем управления и регулирования.....	9
1.3. Особенности металлургических процессов как объектов автоматического управления и регулирования	13
1.4. Статические и динамические характеристики элементов и систем	16
1.5. Типовые звенья АСР и их характеристики, передаточные функции	22
1.6. Автоматические регуляторы, типовые законы регулирования	34
1.7. Понятие устойчивости АСР, качество процесса регулирования	38
1.8. Модели объектов регулирования и методы их получения.....	58
2. ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ И ПРОЦЕССАМИ	62
2.1. Измерение температуры	62
2.2. Измерение давления	72
2.3. Измерение расхода, количества жидкостей и газов	77
2.4. Измерение уровня	86
2.5. Измерение химического состава газов и жидкостей	92
2.6. Исполнительные механизмы и регулирующие органы	97
3. ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ	102
3.1. Цели, задачи и стадии проектирования	102
3.2. Структурные схемы управления и контроля	105
3.3. Функциональные схемы автоматизации	106
4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	116
4.1. Иерархия управления. Назначение, цели и функции АСУ ТП	116
4.2. Разновидности АСУ ТП	119
4.3. Состав АСУ ТП. Основные компоненты.....	122
4.4. Принципы построения распределенных систем контроля и управления	125
4.5. Операторские пункты управления в АСУ ТП	128
4.6. Представление информации на видеотерминалах и программное обеспечение ЭВМ для визуализации процессов.....	129
4.7. АСУ ТП металлургического производства на примере системы управления процессом электролиза алюминия.....	133

5. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	
ПРЕДПРИЯТИЕМ	140
5.1. Типы АСУ, их назначение, цели и функции	140
5.2. Состав АСУП	141
5.3. Современные тенденции в построении АСУП	144
5.4. Интегрированные АСУ на промышленных предприятиях	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	150

ВВЕДЕНИЕ

К середине 1960-х гг. определились основные направления развития цветной металлургии, которые сохраняются и в настоящее время: интенсификация технологических процессов, проведение их в режимах, близких к критическим, применение агрегатов большой единичной мощности.

В агрегатах большой единичной мощности отсутствует резервное оборудование и промежуточные емкости, поэтому выход из строя какого-либо аппарата при нарушении в нем технологического режима вызывает аварийную остановку всего агрегата. Стоимость каждой такой установки порой составляет до миллиарда рублей. Отсюда видно, насколько важно обеспечить высокое качество управления агрегатами.

Развитие работ по автоматизации технологических процессов в нашей стране началось в 1950–1960-е гг. Основное внимание было уделено созданию локальных систем, обеспечивающих автоматизацию простейших функций управления технологическими процессами: централизованный контроль, противоаварийную защиту и регулирование (стабилизацию или изменение по заданной программе). Дальнейшее развитие металлургии потребовало создания гораздо более совершенных систем управления – автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

В экономическом плане внедрение АСУ ТП позволяет сделать следующее:

1. Решить основную задачу повышения производительности труда, сокращения численности основного и вспомогательного персонала в результате уменьшения времени на обслуживание и выбора оптимальных условий работы агрегатов.
2. Уменьшить непроизводительные расходы сырья и энергии.
3. Повысить качество продукции.

Социальный эффект АСУ ТП заключается в том, что улучшаются условия труда, создаются условия для повышения квалификации кадров; и создаются объективные условия для совершенствования технологических процессов и оборудования.

Совершенствование систем автоматического контроля и управления в металлургической промышленности России является непрерывным процессом, однако можно выделить несколько основных этапов развития автоматизации:

1. Внедрение контрольно-измерительных приборов, что позволило объективно оценивать состояние и ход технологических процессов.
2. Применение дистанционного управления регулирующими органами (клапанами, шиберами, механизмами загрузки и т.д.), которое освободило персонал от физической работы, часто выполняемой в условиях высокой температуры и значительной загазованности.
3. Централизация приборов контроля и дистанционного управления, их размещение на общем щите в специальном помещении. Это способствует бо-

лее глубокому анализу производственных ситуаций и повышает эффективность управления.

4. Внедрение разомкнутых систем управления с блокировками, обеспечивающими безопасность персонала и технологического оборудования. Разомкнутые системы выполняют операции в определенной последовательности по заданной программе. Например, перевод воздухонагревателей с одного режима на другой, программное регулирование температуры и др.

5. Широкое внедрение замкнутых систем автоматизированного регулирования отдельных параметров технологических процессов (температуры, давления, расхода и др.). Этот этап является очень важным. Человек только устанавливает задание автоматическому регулятору, который поддерживает заданный режим.

6. Разработка комплексных систем контроля и управления, учитывающих взаимные связи между параметрами процесса и работу комплекса технологических агрегатов. Внедрение этих систем способствовало существенному повышению технологических показателей производственных процессов.

7. Разработка и внедрение в производство оптимальных систем управления с применением управляющих вычислительных машин (УВМ), объединенных в управляющие комплексы. Основное назначение этих систем – объединить локальные системы в единую, взаимоувязанную систему, обеспечивающую управление на качественно новом уровне – с использованием в управлении технико-экономических параметров и критериев. Этот этап еще не завершен, АСУ ТП такого типа непрерывно совершенствуются в направлении адаптивного управления, создания игровых систем и т.д.

8. Создание интегрированных АСУ, т.е. согласование действия АСУ ТП с автоматизированными системами управления производством (АСУП) и подчинение действий АСУ ТП стратегии и тактике управления производства в целом.

В настоящее время уровень автоматизации процессов цветной металлургии с известными оговорками можно оценить как соответствующий шестому и частично седьмому и восьмому этапам. Так, уровень автоматизации составляет примерно 70–75 % от необходимого.

Основные задачи по автоматизации отрасли вытекают из недостатков реализации соответствующей программы, которые представляют собой следующее:

значительное отставание от потребностей и несоответствующее качество технических средств автоматизации, в первую очередь, датчиков и исполнительных механизмов;

недостаточные объемы выполняемых работ в области автоматизации горнодобывающего производства углеродных материалов и меди;

отсутствие комплексного решения вопросов автоматизации и механизации производства в проектах расширения и реконструкции действующих предприятий;

отсутствие типовых проектных решений по программному и техническому обеспечению создаваемых АСУ.

Кроме того, в настоящее время созданы необходимые условия для внедрения АСУ ТП, использующих информацию о составе продуктов в потоке с целью оптимального управления технологическими процессами. Разработка и внедрение единых комплексов АСУ ТП и автоматизированных систем аналитического контроля (АСАК) позволяет значительно увеличить экономическую эффективность автоматизированного управления технологическими процессами. Также перспективными являются пути комплексного решения задач модернизации технологии и одновременно с автоматизацией применение в широких масштабах робототехники.

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Основные понятия

Системы управления современными металлургическими и химико-технологическими процессами характеризуются большим количеством технологических параметров, число которых может достигать нескольких сотен. Для поддержания требуемого режима работы, а в конечном счете и качества выпускаемой продукции все эти величины необходимо поддерживать постоянными или изменять по определенному закону.

Физические величины, определяющие ход технологического процесса, называются *параметрами технологического процесса*. Например, параметрами технологического процесса могут быть температура, давление, расход, напряжение и т.д.

Параметр технологического процесса, который необходимо поддерживать постоянным или изменять по определенному закону, называется *регулируемой величиной*, или *регулируемым параметром*.

Значение регулируемой величины в рассматриваемый момент времени называется *мгновенным значением*.

Значение регулируемой величины, полученное в рассматриваемый момент времени на основании данных некоторого измерительного прибора называется ее *измеренным значением*.

Объект управления (объект регулирования, ОУ) – это устройство, требуемый режим работы которого должен поддерживаться извне специально организованными управляющими воздействиями.

Управление – это формирование управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый режим работы ОУ.

Регулирование – это частный вид управления, когда задачей является обеспечение постоянства какой-либо выходной величины ОУ.

Автоматическое управление – это управление, осуществляемое без непосредственного участия человека.

Входное воздействие (X) – это воздействие, подаваемое на вход системы или устройства.

Выходное воздействие (Y) – это воздействие, выдаваемое на выходе системы или устройства.

Внешнее воздействие – это воздействие внешней среды на систему.

Задающее воздействие (то же, что и входное воздействие X) – это воздействие на систему, определяющее требуемый закон изменения регулируемой величины).

Управляющее воздействие (u) – это воздействие управляющего устройства на объект управления.

Управляющее устройство (УУ) – это устройство, осуществляющее воздействие на объект управления с целью обеспечения требуемого режима работы.

Возмущающее воздействие (f) – это воздействие, стремящееся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной.

Ошибка управления ($e = x - y$) – это разность между предписанным (x) и действительным (y) значениями регулируемой величины.

Регулятор (Р) – это комплекс устройств, присоединяемых к регулируемому объекту и обеспечивающих автоматическое поддержание заданного значения его регулируемой величины или автоматическое изменение ее по определенному закону.

Автоматическая система регулирования (АСР) – это автоматическая система с замкнутой цепью воздействия, в котором управление (u) вырабатывается в результате сравнения истинного значения y с заданным значением x .

Дополнительная связь в структурной схеме АСР, направленная от выхода к входу рассматриваемого участка цепи воздействий, называется обратной связью (ОС). Обратная связь может быть отрицательной или положительной.

1.2. Классификация систем управления и регулирования

Системы управления и регулирования классифицируются по следующим принципам.

1. По методу управления автоматизированные системы управления (АСУ) подразделяются на *неадаптивные* (или *неприспосабливающиеся*) и *адаптивные* (или *приспосабливающиеся*) системы.

Неадаптивные автоматизированные системы управления не приспосабливаются к изменяющимся условиям работы объекта управления. Это наиболее простые системы, не изменяющие своей структуры и параметров в процессе управления. Практически все автоматизированные системы регулирования (АСР) относятся к неадаптивным АСУ. Для этих систем на основе априорной (существующей до начала работы) информации при проектировании и наладке выбирают структуру и параметры, которые обеспечивают заданные свойства системы (выполнение целей управления) для типовых или наиболее вероятных условий ее работы (при необходимости перестраивать системы можно вручную).

Неадаптивные системы подразделяются на три типа: *стабилизирующие системы*, т.е. обеспечивающие поддержание постоянного заданного значе-

ния регулируемой величины (например, система поддержания заданного значения расхода мазута во вращающуюся печь спекания); *программные*, задачей которых является изменение регулируемой величины по заданному закону во времени или в зависимости от величины другого параметра (например, изменение температуры в камерной термической печи по определенному графику, необходимому для данного типа термообработки: повышение температуры с определенной скоростью, выдержка при постоянной температуре и т.п.); *следящие системы*, обеспечивающие изменение регулируемой величины в определенном соотношении с задающим воздействием, когда можно рассматривать то, что заданное значение изменяется произвольным образом, не зависящим от данной системы (например, регулирование соотношения топливо–воздух при управлении сжиганием топлива).

Адаптивные АСУ – это такие системы, в которых параметры управляющих устройств или алгоритмы управления автоматически и целенаправленно изменяются для осуществления оптимального управления объектом, причем характеристики объекта или внешние воздействия на него могут изменяться заранее непредвиденным образом [3].

Адаптивные АСУ способны менять структуру, параметры или программу своих действий в процессе управления. Поскольку в процессе управления происходит автоматическое изменение параметров или структуры системы, то адаптивные АСУ называют также *самонастраивающимися*.

Адаптивные АСУ подразделяют на два типа: *экстремальные* системы, которые автоматически ищут экстремум управляемой величины, а так как его положение изменяется в процессе работы объекта, то система автоматически изменяет направление поиска, скорость и т.д. (изменяет программу своих действий); *оптимальные* системы, которые используют с целью получения оптимальных условий объекта, характеризуемых экстремумом критерия управления при определенных ограничениях.

При работе самонастраивающихся систем могут автоматически изменяться параметры системы (настройки управляющих устройств), и тогда их называют системами *с самонастройкой параметров*. Если автоматически меняется структура системы (изменяется алгоритм управления), то такие системы называют системами *с самонастройкой структуры* (или с переменной структурой). Системы, изменяющие в процессе работы программу своих действий, называются системами *с самонастройкой программы*.

Настраивающиеся АСУ реализуются с использованием управляющей вычислительной машины (УВМ), исключение могут составлять экстремальные системы. Для работы УВМ необходимо наличие аналитического описания (математических моделей) объекта управления и других элементов системы, а также алгоритмов адаптации и управления, по которым и рассчитывают характеристики системы, обеспечивающие оптимизацию работы объекта.

Различают *пассивные* и *активные* методы адаптации системы. В первом случае связь структуры и настроек системы с изменяющимися условиями работы объекта задается заранее на основе априорной информации. Пас-

сивные методы адаптации возможны при нестационарных объектах управления с известными закономерностями изменения параметров. Примером активного метода самонастройки АСУ является система оптимального управления нагревательной печью, когда задания и настройки всех локальных регуляторов определяют из условий оптимальной производительности печи или минимальных суммарных затрат на нагрев и прокатку металла на основе текущей информации о процессе.

2. По характеру использования информации АСУ и АСР делят на *замкнутые* и *разомкнутые* системы.

Замкнутые системы (системы регулирования по отклонению) используют рабочую текущую информацию о выходных величинах, определяя отклонение регулируемой величины от заданного значения, и принимают меры к уменьшению и устранению этого отклонения.

Разомкнутые АСР непосредственно не используют рабочую информацию о регулируемых величинах, а регулирование осуществляют на основании информации о входных величинах. При этом отсутствует обратная связь между выходными и входными величинами. Разомкнутые АСР подразделяют на системы с *жесткой программой* и системы с *регулированием по возмущению*. Примером системы с жесткой программой может служить система автоматического пуска и остановки комплекса машин, в которой должна выдерживаться определенная последовательность работы отдельных механизмов. Системы регулирования по возмущению используют информацию о входных величинах (возмущениях) и принимают меры, чтобы указанные возмущения не влияли на выходную величину, т.е. компенсируют возникающие возмущения. Поэтому такие АСУ называют также системами с *компенсацией возмущений* (инвариантными).

3. По результатам работы в установившемся состоянии системы делятся на *астатические* и *статические*.

В *астатических* системах регулируемая величина после окончания переходного процесса точно равна заданному значению (практически она может отличаться от заданного значения на некоторую малую величину, обусловленную нечувствительностью системы).

В *статических* системах после окончания переходного процесса возникает разность между заданным и установившимся значениями регулируемой величины, которая называется *статической ошибкой*.

4. По числу регулируемых величин АСУ делятся на *одномерные* и *многомерные* (или *многосвязные*).

Одномерные АСУ – это системы управления простейшими объектами с одной регулируемой величиной.

В большинстве случаев АСУ регулируют несколько величин и являются *многомерными*. В многомерных системах можно выделить несколько каналов регулирования, в которых каждая регулируемая величина определяется одним регулирующим воздействием, а канал имеет свой регулирующий орган (положение которого практически не влияет на другие регулируемые ве-

личины), и тогда сложный объект как бы распадается на несколько одномерных объектов с одномерными АСР.

5. По характеру изменения регулирующих воздействий во времени АСУ и АСР делятся на *непрерывные* и *прерывистые (дискретные)*.

В *непрерывных* АСР работают регуляторы, которые реализуют несколько типовых непрерывных законов (алгоритмов) регулирования: пропорциональный (П-закон), интегральный (И-закон), пропорционально-интегральный (ПИ-закон) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-закон).

В *дискретных* АСУ информация и регулирующие воздействия появляются только в определенные моменты времени, т.е. в системе существует минимум один элемент, в котором при наличии непрерывного изменения входной величины выходная величина изменяется прерывисто (скачкообразно) или существует только в определенные (дискретные) моменты времени.

Дискретные АСУ подразделяют на *релейные, импульсные и цифровые*. В *релейных* системах один из элементов, обычно регулятор, имеет релейную характеристику, когда выходная величина скачкообразно изменяется при определенном значении входной величины.

В *импульсных* АСУ присутствует минимум один элемент с импульсной характеристикой, т.е. когда при непрерывном изменении входной величины выходная величина появляется только в определенные дискретные моменты времени.

К дискретным АСУ относятся также *цифровые* системы, в которых используются цифровые устройства: цифровые регуляторы (контроллеры), созданные на базе микропроцессорной техники, цифровые измерительные приборы.

6. По виду энергии, применяемой для работы, АСУ и АСР делят на системы *прямого* и *косвенного действия*.

В системах *прямого действия* используется внутренняя энергия системы, например, энергия чувствительного элемента в регуляторах прямого действия.

В системах *косвенного действия* используется внешняя по отношению к системе энергия и по виду этой энергии АСУ подразделяют на *гидравлические, пневматические и электрические*.

7. По виду дифференциального уравнения различают *линейные* и *нелинейные* АСУ.

К *линейным* относятся системы, поведение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями. Поскольку систем, абсолютно точно описываемых линейными дифференциальными уравнениями, практически не существует, то к линейным системам относятся так называемые *линеаризованные* системы, описываемые линейными дифференциальными уравнениями приближенно, при определенных допущениях и ограничениях.

К *нелинейным* АСУ относятся системы, поведение которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями.

1.3. Особенности металлургических процессов как объектов автоматического управления и регулирования

В цветной металлургии объектами управления являются металлургические печи, пачуки, конвертеры, бункера, сгустители, электролизные ванны, насосы и другие аппараты технологических установок, а также трубопроводы.

При рассмотрении металлургических агрегатов как объектов автоматического контроля и регулирования можно указать на некоторые особенности, выделяющие их из общего ряда промышленных объектов контроля и регулирования и налагающих особые требования при создании АСУ.

Металлургические процессы в основных агрегатах являются, как правило, сложными процессами (сложными объектами), которые можно подразделить на ряд элементарных звеньев, простых объектов, простых процессов. Регулирование температуры расплава в печах, например в отражательных, происходит за счет изменения расхода сжигаемого топлива и зависит от накладываемых в пространстве и во времени последовательных процессов аэродинамики (подачи и смещения топлива и воздуха), химических реакций горения и теплообмена (излучением, конвекцией, теплопроводностью).

С точки зрения понятий теории автоматического регулирования сложные объекты представляют как системы, составленные из ряда параллельно и последовательно соединенных элементарных (типовых) звеньев. Разделение сложного объекта на элементарные звенья по их физической сущности и динамическим свойствам может не совпадать. В случае регулирования температуры металла объект в целом представляют одним динамическим звеном, входом которого является расход топлива, а выходом – температура расплава, или двумя последовательно соединенными звеньями, причем входом первого будет служить расход топлива, а входом второго – температура рабочего пространства печи, а выходом – температура расплава. С физической же точки зрения каждое из этих двух звеньев является сложным сочетанием разнородных процессов.

Правильное представление о сложности объекта контроля и регулирования, его физической и динамической структуре является необходимым условием создания рациональной и эффективной системы автоматического управления. Например, только при правильном анализе механизма теплообмена и движения газов в рабочем пространстве металлургической печи можно добиться предварительного замера температуры при установке термоэлектрического преобразователя или пирометрического преобразователя полного излучения, так как на условиях теплообмена датчика с окружающей средой сказывается светимость факела, его конфигурация, скорость движения продуктов сгорания и т.п.

Физическая сложность, многофакторность процесса выплавки и обработки металла приводит к тому, что основные металлургические агрегаты являются многосвязными объектами, функционирование которых определя-

ется рядом входных и выходных величин, испытывающих взаимные влияния. Например, изменение расхода воздуха, подаваемого в печь, вызывает одновременно изменение температуры в печи, состава газов, заполняющих рабочее пространство, и давления в печи.

подавляющее большинство металлургических объектов принадлежит к системам с распределенными параметрами, т.е. к системам, физические характеристики которых (температура, масса, тепловые потоки, теплоемкость, теплопроводность и т.п.) распределены в пространстве и являются функциями координат трехмерного пространства. Примерами объектов с распределенными параметрами могут служить вращающиеся печи, мельницы, выщелачиватели и др.

В связи с тем, что математическое описание объектов с распределенными параметрами требует использования аппарата дифференциальных уравнений с частными производными, теоретические методы анализа поведения систем управления такими объектами являются более сложными и имеют ряд особенностей.

Несмотря на то, что металлургические процессы подчиняются основным законам переноса тепла, вещества и импульса, отсутствуют достаточно точные математические описания, математические модели реальных производственных процессов, представляющих собой, как указывалось выше, сложные комплексы взаимозависимых физико-химических явлений. Совмещение разнородных явлений усложняет исследование, понимание процессов, формулировку и решение их математических выражений.

Существующие математические модели строят на ряде упрощений и допущений, которые позволяют составить исходные математические выражения и найти их решения строго аналитическими, приближенными или численными способами. Существующие модели оказывают большую помощь в исследовании и познании металлургических процессов, в определении рациональных технологических и теплотехнических режимов и способов управления этими режимами. Однако приближенность существующих моделей не позволяет полностью решить все эти вопросы.

Сложность основных металлургических объектов и разнообразие возмущений, приложенных в различных местах агрегатов, приводят к тому, что объекты характеризуются большим числом контролируемых величин и управляющих воздействий.

Большое число управляющих воздействий, каждое из которых влияет чаще всего на несколько выходных величин, требует от операторов высокой квалификации при управлении процессами, а при создании автоматизированных систем управления необходимы обширные исследования взаимных связей и влияний между входными и выходными величинами, разработка и приборная реализация сложных алгоритмов управления.

На металлургических объектах значительно затруднено осуществление автоматического контроля основных параметров. Это обусловлено в основ-

ном высокими температурами и химической агрессивностью сред, принимающих участие в производственном процессе.

В настоящее время, например, практически отсутствуют материалы, которые выдерживали бы погружение в расплавленный электролит алюминиевого электролизера без износа, без изменения физико-химических свойств и разрушения при длительном пребывании в жидком расплаве.

Использование пирометрических преобразователей полного излучения для бесконтактного измерения температуры поверхности расплава и элементов кладки печей ограничивается погрешностями, возникающими из-за переменной степени черноты этих поверхностей, запыленности сред и т.д.

Металлургические объекты принадлежат, как правило, к классу нелинейных объектов, т.е. объектов, поведение которых описывается нелинейными математическими выражениями.

Методы анализа и синтеза нелинейных объектов и систем регулирования значительно сложнее, чем методы анализа и синтеза линейных объектов и систем регулирования. Поэтому в тех случаях, когда это возможно, стремятся нелинейные характеристики объектов аппроксимировать линейными с применением известных методов линеаризации.

Процессы металлургического производства реализуются в агрегатах как непрерывного, так и периодического, циклического действия. К агрегатам периодического действия принадлежат конвертеры, некоторые электропечи и т.д.

Непрерывные производственные процессы легче поддаются автоматизации, чем периодические, так как непрерывные процессы характеризуются стационарными режимами при относительно небольших отклонениях контролируемых параметров и управляющих воздействий от некоторых номинальных значений, что упрощает автоматизацию управления ими.

Параметры периодических процессов претерпевают, как правило, значительные колебания. А управляющие воздействия могут варьироваться по абсолютной величине многократно.

Глубокие изменения контролируемых величин и управляющих воздействий в агрегатах периодического действия, сопровождающихся изменениями статических и динамических характеристик объектов во времени, усложняют синтез систем автоматического управления, так как регуляторы с постоянной структурой и настройками не могут обеспечить приемлемое качество регулирования при существенных изменениях характеристик объекта.

Все реальные промышленные объекты имеют запаздывание, которое достигает довольно больших значений (нескольких десятков минут) в объектах, где протекают тепло- и массообменные процессы, и невелико (всего несколько секунд) в объектах, выходные величины которых представляют собой расход или давление жидкостей или газов.

Наличие запаздывания в объектах (в АСР) усложняет задачу регулирования технологического параметра в объекте. Поэтому необходимо стремиться к его уменьшению: устанавливать датчик и исполнительное устройство сис-

темы как можно ближе к объекту регулирования, применять малоинерционные измерительные преобразователи, уменьшать протяженность потоков и т.д.

Металлургические агрегаты принадлежат к энерго- и материалоемким объектам.

Большая материало- и энергоемкость металлургических объектов определяет возможность получения значительных экономических эффектов, связанных с увеличением производительности, уменьшением расходов сырья и энергии, улучшением качества готовой продукции при внедрении совершенных систем автоматизации

1.4. Статические и динамические характеристики элементов и систем

1.4.1. Уравнения статики и динамики

Для эффективного управления технологическими процессами необходимо иметь адекватное математическое описание процессов в АСР и ее элементах. Под *математическим описанием (математической моделью)* понимают совокупность уравнений и ограничивающих условий, в количественной форме описывающих зависимость выходных величин от входных. Эти зависимости называют характеристиками. Они бывают статическими и динамическими.

Динамическая характеристика (уравнение динамики) описывает изменение во времени выходной величины при изменении входной величины, т.е. переходной процесс в элементе (системе).

Статическая характеристика (уравнение статики) отражает функциональную связь между выходной и входной величинами в установившемся режиме.

Уравнения динамики в общем виде являются дифференциальными или интегрально-дифференциальными. Уравнения статики можно получить из уравнений динамики, приравняв все производные по времени к нулю. И те, и другие могут быть как линейными, так и нелинейными. Для упрощения анализа и расчетов нелинейные дифференциальные уравнения заменяют на линейные (линеаризуют) – обычно методом малых отклонений: разлагают в ряд Тейлора вблизи интересующей точки и отбрасывают члены высшего порядка.

Статические характеристики обычно изображают в виде графиков, таблиц, алгебраических уравнений, а динамические характеристики – в виде дифференциальных уравнений или передаточных функций, временных графиков, частотных характеристик.

1.4.2. Преобразование Лапласа, передаточная функция

Поведение элемента или АСР описывается линейными неоднородными дифференциальными уравнениями n -го порядка с постоянными коэффициентами:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x,$$

где y, x – выходная и входная величины, зависящие от времени t ; a_n, b_m – постоянные коэффициенты; $n \geq m$.

Уравнение, у которого правая часть равна нулю, называется *однородным*. Если правая часть уравнения не равна нулю, то оно *неоднородное*. Решение однородного уравнения называется *общим*, или *свободным*.

При известных начальных условиях (функции и ее производных в начальный момент времени, когда начался переходный процесс) получают *частное решение* уравнения. Общее решение неоднородного уравнения равно сумме общего решения соответствующего однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения:

$$y(t) = y_{\text{общ}}(t) + y_{\text{част}}(t).$$

Решение дифференциальных уравнений высокого порядка классическим методом довольно сложно, поэтому в теории автоматического регулирования используют метод интегрального преобразования Лапласа [1, 2]. При этом вместо функции времени $x(t)$ используют функцию комплексной переменной $X(p)$, где $p = \alpha + j\omega$. Функция $X(p)$ называется *изображением* функции $x(t)$, которая носит название оригинала функции $X(p)$. Операция перехода от $x(t)$ к $X(p)$ называется *прямым* преобразованием Лапласа и обозначается символом L :

$$L[x(t)] = X(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt.$$

Операция перехода от $X(p)$ к $x(t)$ называется *обратным* преобразованием Лапласа и обозначается символом L^{-1} :

$$L^{-1}[X(p)] = x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} X(p) e^{pt} dp.$$

Для облегчения перехода от оригинала функции к изображению и обратно для часто встречающихся функций существуют таблицы преобразования Лапласа (табл. 1.1).

Применяя прямое преобразование Лапласа к линейным неоднородным дифференциальным уравнениям n -го порядка с постоянными коэффициентами, получаем

$$a_n p^n Y(p) + a_{n-1} p^{n-1} Y(p) + \dots + a_1 p Y(p) + a_0 Y(p) = \\ = b_m p^m X(p) + b_{m-1} p^{m-1} X(p) + \dots + b_1 p X(p) + b_0 X(p).$$

Взяв отношение изображений выходной и входной величин из предыдущего уравнения, получим *передаточную функцию*

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{B(p)}{A(p)},$$

где полиномы знаменателя и числителя имеют вид

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0,$$

$$B(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0.$$

Т а б л и ц а 1.1

Изображения простейших временных функций

№ п/п	Оригинал $f(t)$	Изображение $F(p)$
1	Функция Хевисайда $\eta(t)$ $1[t]$	$\frac{1}{p}$
2	t^n (n – натуральное число)	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
3	e^{at}	$\frac{1}{p-a}$
4	$t^n e^{at}$	$\frac{n!}{(p-a)^{n+1}}$
5	$\sin \omega t$ ($\omega > 0$)	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
6	$\cos \omega t$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$
7	$e^{at} \sin \omega t$ ($\omega > 0$)	$\frac{\omega}{(p-a)^2 + \omega^2}$
8	$e^{at} \cos \omega t$	$\frac{p-a}{(p-a)^2 + \omega^2}$
9	$t \sin \omega t$ ($\omega > 0$)	$\frac{2p\omega}{(p^2 + \omega^2)^2}$
10	$t \cos \omega t$	$\frac{p^2 - \omega^2}{(p^2 + \omega^2)^2}$
11	Функция Дирака $\delta(t)$	1
12	$\delta^{(n)}(t)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)	p^n

Приравнивая к нулю полином знаменателя $A(p) = 0$, получаем характеристическое уравнение исходного дифференциального уравнения:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0.$$

Корни характеристического уравнения определяют решение однородного дифференциального уравнения и потому характеризуют свободное (общее) решение системы. Эти корни обращают знаменатель в нуль, а передаточную функцию – в бесконечность и называются *полюсами* передаточной функции.

Передаточная функция связывает изображения выходной и входной величин выражением

$$Y(p) = W(p)X(p).$$

Применяя обратное преобразование Лапласа к изображению выходной величины, можно найти решение исходного дифференциального уравнения, а, значит, определить переходной процесс:

$$y(t) = L^{-1}[W(p)X(p)].$$

1.4.3. Временные динамические характеристики

Зависимость выходной величины элемента или системы от времени при переходе из одного установившегося состояния в другое при поступлении на вход типового воздействия называется *временной динамической характеристикой*. Типовыми являются воздействия в виде *единичной ступенчатой* или *единичной импульсной* функций (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Типовые воздействия

Математически единичную ступенчатую функцию представляют в следующем виде:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Реакция элемента или системы на единичное ступенчатое воздействие называется *переходной функцией* $h(t)$. Если ступенчатое воздействие отлича-

ется от единичного: $x(t) = A \cdot 1(t)$ и при $t \geq 0$ равно постоянной величине A , то реакция на такое воздействие называется *кривой разгона*.

Под единичной импульсной функцией понимается импульс, площадь которого равна единице:

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_{\text{и}}} & \text{при } 0 < t < t_{\text{и}}, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Импульс, величина которого равна бесконечности, длительность – нулю, а площадь – единице, называется дельта-функцией и обозначают $\delta(t)$:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases}$$

Дельта-функция связана с единичной ступенчатой функцией следующей зависимостью:

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}.$$

Реакция на входное воздействие в виде дельта-функции при нулевых начальных условиях называется *импульсной переходной функцией* $w(t)$. Переходная и импульсная переходная характеристики связаны между собой:

$$w(t) = h'(t),$$

или

$$\int_0^{\infty} w(t) dt = h(t).$$

Импульсная переходная функция $w(t)$ и переходная характеристика $h(t)$ связаны с передаточной функцией $W(p)$ интегральным преобразованием Лапласа выражениями

$$\begin{aligned} W(p) &= L[w(t)], \\ W(p) &= pL[h(t)]. \end{aligned}$$

При анализе реакции системы или элемента любое произвольное входное воздействие можно представить в виде суммы ступенчатых или импульсных воздействий, а по ним определить переходной процесс на выходе элемента или АСР по выражению

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(t - \tau) x'(\tau) d\tau,$$

или

$$y(t) = \int_0^{\infty} w(t - \tau)x'(\tau)d\tau.$$

1.4.4. Частотные характеристики

Частотные характеристики описывают вынужденные колебания на выходе системы, вызванные гармоническими воздействиями на ее входе. При подаче на вход элемента или системы синусоидального воздействия с амплитудой $A_{\text{вх}}$ и частотой $\omega = 2\pi/T$ (где T – период колебаний)

$$x(t) = A_{\text{вх}} \sin \omega t.$$

По окончании переходного процесса на выходе устанавливаются гармонические колебания $y(t) = A_{\text{вых}} \sin[\omega t - \varphi(\omega)]$ той же частоты, но с другой амплитудой $A_{\text{вых}}(\omega)$ и сдвинутые по фазе относительно входных колебаний на угол $\varphi(\omega)$. При изменении частоты от 0 до $+\infty$ получают *амплитудную частотную характеристику* (АЧХ) $A(\omega) = A_{\text{вых}}(\omega)/A_{\text{вх}}$ и *фазовую частотную характеристику* (ФЧХ) $\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вых}}(\omega) - \varphi_{\text{вх}}$.

Для исследований и расчетов АСР применяют преобразование Фурье, которое подобно преобразованию Лапласа, где значение p равно $j\omega$. Отношение изображений по Фурье выходной и входной величин, равное

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)},$$

называется *амплитудно-фазовой частотной характеристикой* (АФЧХ).

Выделяя действительную $\text{Re}(\omega)$ и мнимую $\text{Im}(\omega)$ составляющие, можно АФЧХ представить в алгебраической форме:

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega).$$

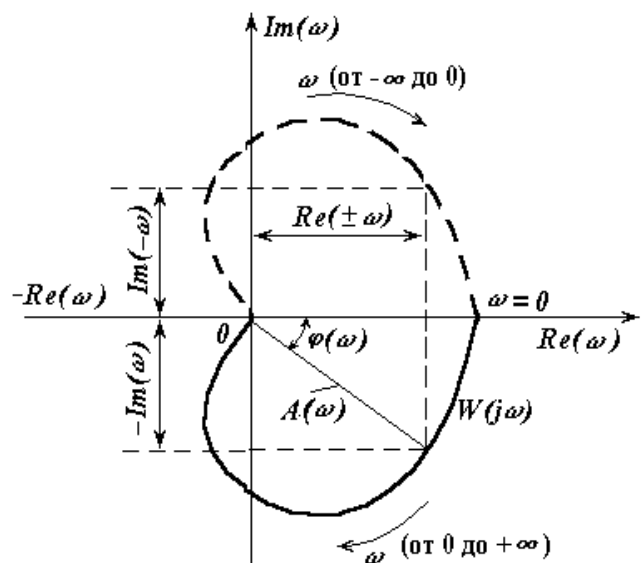


Рис. 1.2. Амплитудная частотная характеристика

Зависимость $\text{Re}(\omega)$ называют действительной частотной характеристикой, а зависимость $\text{Im}(\omega)$ – мнимой частотной характеристикой. АФЧХ можно по-

строить на комплексной плоскости при изменении частоты только от 0 до $+\infty$, так как она симметрична относительно действительной оси (рис. 1.2). АФЧХ можно представить в виде радиуса-вектора на комплексной плоскости и записать в экспоненциальной форме:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

Значения модуля и аргумента вектора определяют по формулам

$$A(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)},$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}.$$

Используя приведенные характеристики можно проводить исследования АСР. Ряд характеристик удобно получать по экспериментальным данным, не зная точного математического описания элементов и систем.

1.5. Типовые звенья АСР и их характеристики, передаточные функции

При анализе и синтезе линейных АСР удобно представлять их в виде совокупности соединенных между собой отдельных простых элементов с определенными динамическими свойствами. Эти динамические звенья принято классифицировать по характеру переходного процесса, возникающего при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия. Реальные элементы АСР могут иметь разную физическую основу и исполнение, но описываться одинаковым дифференциальным уравнением, а значит, относиться к одному типу элементарных звеньев. *Элементарным звеном* называется такое звено, которое нельзя разделить на более простые звенья. Элементарные звенья характеризуются следующими свойствами:

- а) имеют одну входную и одну выходную величину;
- б) описываются дифференциальным уравнением не выше 2-го порядка;
- в) пропускают сигнал только в одном направлении, т.е. обладают детектирующим свойством.

Элементарными звеньями, из которых можно составить АСР любой сложности, являются пропорциональное, апериодическое, колебательное, идеальное интегрирующее, идеальное дифференцирующее и звено чистого запаздывания.

1.5.1. Пропорциональное звено

Пропорциональное звено описывается уравнением пропорциональной связи выходной величины $y(t)$ от входной $x(t)$ в любой момент времени t :

$$y(t) = kx(t),$$

где k – коэффициент передачи, имеющий размерность отношения единиц выходной величины к входной.

Это звено *безынерционно*, так как $y(t)$ мгновенно повторяет изменения $x(t)$. Его еще называют *усилительным*.

Передаточная функция пропорционального звена в соответствии с преобразованием Лапласа имеет вид

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = k.$$

Временные и частотные характеристики пропорционального звена представлены на [рис. 1.3](#).

Переходная и импульсная переходная функции (рис. 1.3, *а*, *б*) имеют вид

$$h(t) = k1(t),$$

$$w(t) = k\delta(t).$$

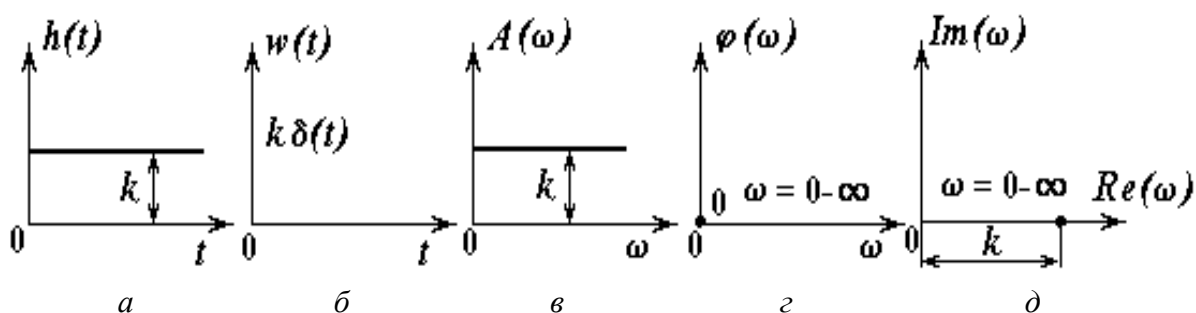


Рис. 1.3. Характеристики пропорционального звена: *а* – переходная; *б* – импульсная переходная; *в* – амплитудная; *г* – ФЧХ; *д* – АФЧХ

АФЧХ, ее составляющие, АЧХ и ФЧХ звена получим из передаточной функции при замене $p = j\omega$:

$$W(p) = k,$$

$$\text{Re}(\omega) = k,$$

$$\text{Im}(\omega) = 0,$$

$$A(\omega) = k,$$

$$\varphi(\omega) = 0.$$

При изменении частоты от 0 до $+\infty$ АЧХ звена не меняется, т.е. сигнал любой частоты пропускается без искажения ([рис. 1.3, в](#)). Так как ФЧХ равна

нулю для всех частот (рис. 3, з), то входные и выходные величины совпадают по фазе, т.е. *синфазны*. Примерами пропорционального звена служат механический редуктор, рычажное сочленение, регулирующие органы, электронные усилители [4].

1.5.2. Интегрирующее звено

Интегрирующее звено описывается уравнением

$$y(t) = k_1 \int x(t) dt \quad \text{или} \quad \frac{dy(t)}{dt} = k_1 x(t).$$

Временные и частотные характеристики интегрирующего звена представлены на рис. 1.4.

Переходную функцию получим, подставив $x(t) = 1(t)$:

$$h(t) = k_1 \int 1(t) dt = k_1 t + C,$$

где C – постоянная интегрирования, равная нулю при нулевых начальных условиях.

Так как одному и тому же установившемуся значению входной величины соответствуют различные значения выходной величины, то интегрирующее звено называется *астатическим* (рис. 1.4, а).

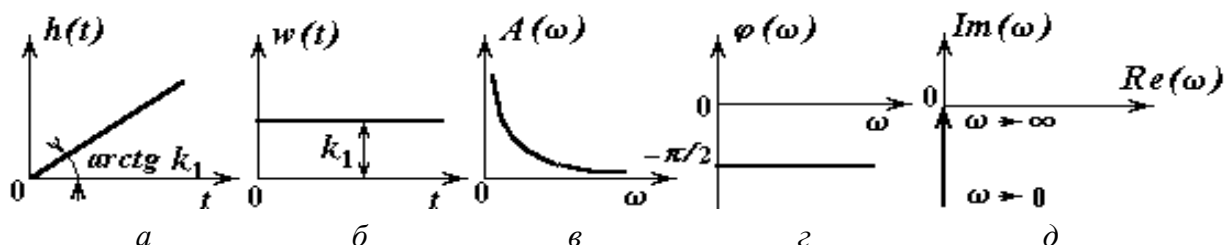


Рис. 1.4. Характеристики интегрирующего звена: а – переходная; б – импульсная переходная; в – амплитудная; г – ФЧХ; д – АФЧХ

Импульсную переходную характеристику получаем как вторую производную переходной функции (рис. 1.4, б):

$$w(t) = h''(t) = k_1.$$

Передаточная функция интегрирующего звена

$$W(p) = \frac{k_1}{p}.$$

Тогда АФЧХ будет иметь вид

$$W(j\omega) = \frac{k_1}{j\omega} = -\frac{jk_1}{\omega}.$$

Действительная частотная характеристика $\text{Re}(\omega) = 0$, а мнимая частотная характеристика совпадает с АФЧХ ([рис. 1.4, в](#)):

$$\text{Im}(\omega) = A(\omega) = -\frac{k_1}{\omega}.$$

ФЧХ звена равна $-\pi/2$, так как $\varphi(\omega) = -\arctg \varphi$.

Таким образом, при изменении частоты от 0 до $+\infty$ АЧХ звена уменьшается от φ до 0, а выходные колебания отстают на угол $\pi/2$ для всех частот ([рис. 1.4, з](#)).

В показательной форме АФЧХ звена имеет вид

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = \left(\frac{k_1}{\omega}\right)e^{j\pi/2}.$$

Графически АФЧХ звена изображается прямой, совпадающей с отрицательной мнимой полуосью ([рис. 1.4, д](#)).

Примерами элементов, динамические свойства которых эквивалентны интегрирующему звену, являются электродвигатель постоянного тока (угол поворота α в функции от подаваемого напряжения U), гидравлический сервомотор (перемещение L в функции от разности давлений Δp по обе стороны поршня), емкость с жидкостью (уровень H в функции от притока G), «тонкое» тело в процессе нагрева (средняя температура тела θ_m от теплового потока q на поверхность тела).

1.5.3. Аперидическое звено 1-го порядка

Аперидическое звено 1-го порядка имеет неколебательный (аперидический) характер переходного процесса и описывается уравнением

$$T \frac{dy(t)}{dt} + e(t) = kx(t),$$

где k – коэффициент передачи; T – постоянная времени, с.

Применяя преобразование Лапласа, получим передаточную функцию

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Временные и частотные характеристики аперидического звена 1-го порядка представлены [на рис. 1.5](#).

Переходную функцию аперидического звена можно получить, используя обратное преобразование Лапласа

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{k}{Tp + 1} \cdot \frac{1}{p} \right] = k(1 - e^{-t/T}).$$

Импульсная переходная характеристика

$$w(t) = h''(t) = (k/T)e^{-t/T}.$$

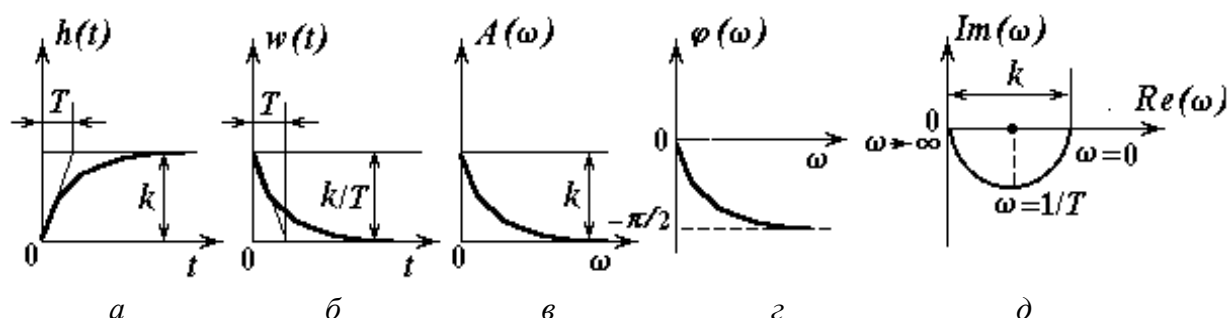


Рис. 1.5. Характеристики аperiodического звена: а – переходная; б – импульсная переходная; в – амплитудная; г – ФЧХ; д – АФЧХ

Постоянную времени T можно определить по графику, проводя касательную к переходной $h(t)$ или импульсной переходной $w(t)$. Постоянная T – это время, за которое выходная величина достигнет установившегося значения при изменении с постоянной начальной скоростью. Чем больше T , тем более инерционно звено. Поэтому аperiodическое звено называют *инерционным* звеном 1-го порядка.

Подставляя $p = j\omega$ в $W(p)$, получим АФЧХ аperiodического звена:

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1} = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1} - j \frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}.$$

Действительная и мнимая частотные характеристики звена равны:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega) &= \frac{k}{T^2\omega^2 + 1}, \\ \operatorname{Im}(\omega) &= -\frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}. \end{aligned}$$

На основании этих формул АЧХ и ФЧХ звена рассчитывают по выражению

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{k}{(Tj\omega + 1)^2}, \\ \varphi(\omega) &= -\operatorname{arctg} T\omega. \end{aligned}$$

При изменении частоты от 0 до ∞ АЧХ звена изменяется от k до 0, а сдвиг по фазе выходных колебаний относительно входных изменяется от 0 до $-\pi/2$. В показательной форме АФЧХ звена имеет вид

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = \frac{k}{(Tj\omega + 1)^2} e^{-j\operatorname{arctg} T\omega}.$$

Годограф АФЧХ звена представляет собой полуокружность, расположенную в четвертом квадранте комплексной плоскости с диаметром, равным коэффициенту передачи k .

Примерами элементов с динамическими свойствами апериодического звена могут служить электродвигатель (скорость n – функция от напряжения U), гидравлическая емкость со свободным стоком жидкости (уровень жидкости H в функции от притока G).

1.5.4. Колебательное звено

Колебательное звено имеет колебательный переходной процесс и описывается уравнением

$$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2T\xi \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t),$$

где T – постоянная времени, с; ξ – коэффициент затухания (безразмерен); k – коэффициент передачи.

Временные и частотные характеристики колебательного звена представлены на [рис. 1.6](#).

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}.$$

Характер переходного процесса зависит от корней характеристического уравнения

$$T^2 p^2 + 2T\xi p + 1 = 0,$$

которые равны

$$p_{1,2} = \frac{-2T\xi \pm \sqrt{(2T\xi)^2 - 4T^2}}{2T^2} = \frac{-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}}{T}.$$

Колебательный процесс получается при комплексных корнях характеристического уравнения. Поэтому колебательному звену соответствуют значения коэффициента затухания $0 < \xi < 1$. При этом характеристическое уравнение имеет два сопряженных корня:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\lambda,$$

где $\alpha = \xi/T$; $\lambda = \sqrt{1 - \xi^2} / T$.

В этом случае передаточную функцию можно представить в виде

$$W(p) = \frac{k}{T^2 [(p + \alpha)^2 + \lambda^2]}.$$

Переходную характеристику и импульсную переходную характеристику определяют на основе обратного преобразования Лапласа по выражению

$$h(t) = \frac{k}{T^2} \left[\frac{1}{\alpha^2 + \lambda^2} + \frac{1}{\lambda \sqrt{\alpha^2 + \lambda^2}} e^{-\alpha t} \sin(\lambda t - \phi) \right],$$

где $\phi = \arctg \lambda / (-\alpha)$;

$$w(t) = \frac{k}{\lambda T^2} e^{-\alpha t} \sin \lambda t.$$

Подставляя выражения для α и λ , получаем

$$h(t) = k \left[1 + \frac{e^{-\xi t/T}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t - \arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \right],$$

$$w(t) = k \frac{e^{-\xi t/T}}{T \sqrt{1-\xi^2}} \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t.$$

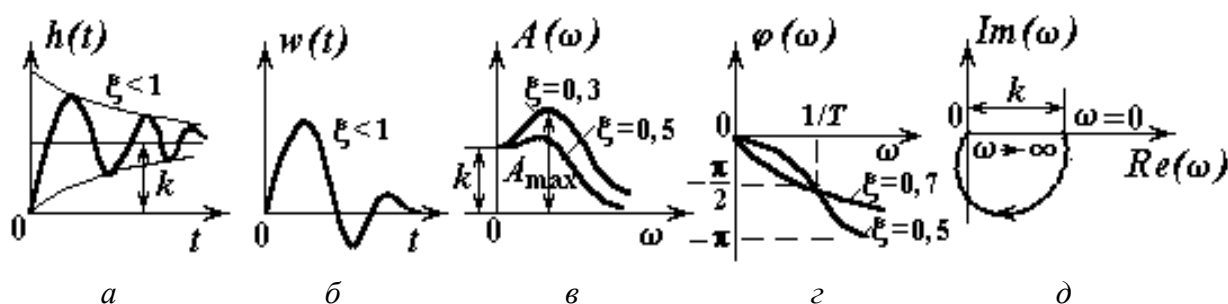


Рис. 1.6. Характеристики колебательного звена: а – переходная; б – импульсная переходная; в – амплитудная; г – фазо-частотная; д – АФЧХ

Таким образом, при $0 < \xi < 1$ переходная и импульсная переходная функции имеют затухающий колебательный характер и их затухание определяется величиной действительной части корней характеристического уравнения $\alpha = \xi / T$ (рис. 1.6, а, б).

При $\xi = 0$ получают частный случай колебательного звена – *консервативное* звено, у которого нет затухания из-за отсутствия потерь энергии. При $\xi > 1$ корни характеристического уравнения являются отрицательными и действительными, что соответствует неколебательному (апериодическому) переходному процессу. Звено при этом превращается в апериодическое 2-го порядка. Но оно неэлементарное и его характеристики не рассматриваются.

АФЧХ колебательного звена определяют по выражению

$$W(j\omega) = \frac{k}{T^2(j\omega)^2 + 2T\xi j\omega + 1}.$$

В алгебраической форме это выражение имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{k(1 - T^2\omega^2)}{(1 - T^2\omega^2)^2 + (2T\xi\omega)^2} - j \frac{2k\xi T\omega}{(1 - T^2\omega^2)^2 + (2T\xi\omega)^2}.$$

Первое слагаемое определяет действительную частотную характеристику $\text{Re}(\omega)$; второе – мнимую частотную характеристику $\text{Im}(\omega)$ ([рис. 1.6, д](#)).

АЧХ и ФЧХ звена, соответственно, равны

$$A(\omega) = k / \sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2T\xi\omega)^2},$$
$$\varphi(\omega) = -\arctg \left[2T\xi\omega / (1 - T^2 \omega^2) \right].$$

АЧХ колебательного звена имеет максимум A_{\max} при некоторой частоте ω_{\max} ([рис. 1.6, в](#)). Чем меньше коэффициент затухания ξ , тем больше значение этого максимума. При $\xi = 0$ значение A_{\max} равно бесконечности (консервативное звено). Таким образом, максимум характеризует колебательность звена и определяется показателем колебательности:

$$M = A_{\max} / A_0,$$

где A_0 – значение АЧХ при $\omega = 0$.

Чем больше M , тем медленнее затухают колебания выходной величины в переходном процессе. ФЧХ колебательного звена монотонно изменяется от 0 до $-\pi$ при возрастании частоты от 0 до ∞ ([рис. 1.6, з](#)).

Примером колебательного звена может служить двигатель постоянного тока при точном рассмотрении его динамики (скорость n – функция от напряжения U), пневматический клапан и RLC -контур.

1.5.5. Дифференцирующее звено

Идеальное дифференцирующее звено описывается уравнением

$$y(t) = k_2 \left(\frac{dx}{dt} \right),$$

т.е. выходная величина пропорциональна скорости изменения входной величины. Передаточная функция звена

$$W(p) = k_2 p,$$

где k_2 – коэффициент передачи.

Если размерность входной и выходной величины одинакова, то размерность k_2 получают в секундах. В этом случае коэффициент обозначают T_d и называют постоянной времени дифференцирования.

Временные и частотные характеристики дифференцируемого звена представлены на [рис. 1.7](#).

Переходная функция представляет собой импульс площадью k_2 , т.е. $h(t) = k_2 1'(t)$, а импульсная переходная функция – производную от этого выражения $w(t) = h'(t) = k_2 1''(t)$.

Уравнение АФЧХ звена имеет вид

$$W(j\omega) = k_2 j\omega.$$

Действительная частотная и мнимая частотная характеристики имеют вид

$$\operatorname{Re}(\omega) = 0,$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = k_2 \omega.$$

АЧХ и ФЧХ, соответственно, равны:

$$A(\omega) = k_2 \omega,$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)} = +\frac{\pi}{2}.$$

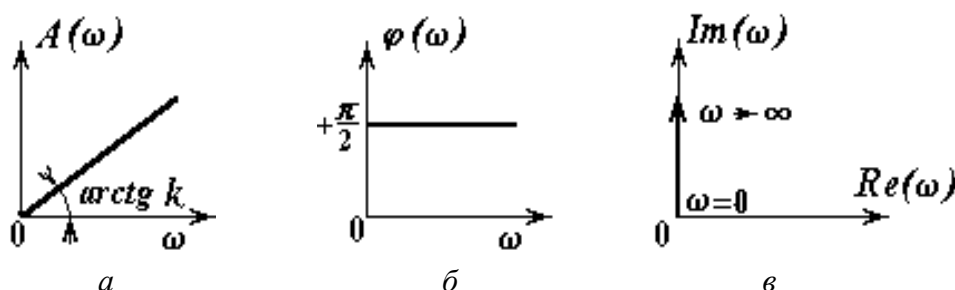


Рис. 1.7. Характеристики идеального дифференцирующего звена: *a* – переходная; *б* – импульсная переходная; *в* – амплитудная

Таким образом, модуль вектора АФХ с увеличением частоты растет по линейному закону, а сдвиг фаз на всех частотах одинаков и равен $+\pi/2$ (рис. 1.7, *a, б*).

Годограф АФХ идеального дифференцирующего звена изображается прямой, совпадающей с положительной мнимой полуосью $\operatorname{Im}(\omega)$ (рис. 1.7, *в*). Примером этого звена с долей условности может служить операционный усилитель в режиме дифференцирования.

Реальное дифференцирующее звено может быть представлено последовательным соединением идеального дифференцирующего звена и апериодического звена 1-го порядка. Его передаточная функция равна произведению передаточных функций составляющих его звеньев:

$$W(p) = \frac{k_2 p}{Tp + 1}.$$

Характеристики реального дифференцирующего звена представлены на рис. 1.8.

Переходная функция имеет вид

$$h(t) = (k_2 T) e^{-t/T}$$

и представляет собой убывающую экспоненту, касательная к которой в начальной точке отсекает на оси абсцисс постоянную времени апериодического звена T (рис. 1.8, а).

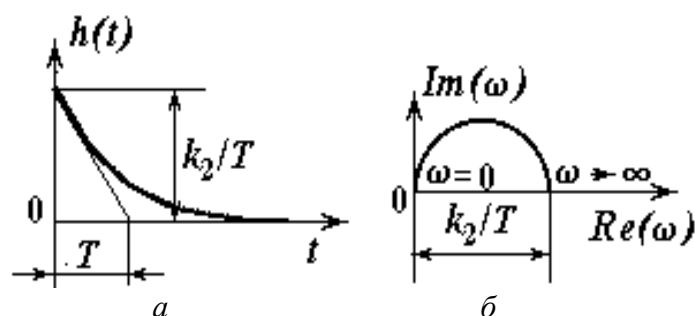


Рис. 1.8. Характеристики реального дифференцирующего звена: а – переходная; б – АФЧХ

АФЧХ звена в показательной форме имеет вид

$$W(j\omega) = (k_2\omega / \sqrt{T^2\omega^2 + 1}) e^{j[(\pi/2) - \arctg T\omega]}.$$

При этом АЧХ и ФЧХ равны

$$A(\omega) = k_2\omega / \sqrt{T^2\omega^2 + 1}, \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctg T\omega.$$

Годограф АФХ на комплексной плоскости имеет вид полуокружности, расположенной в первом квадранте ([рис. 1.8, б](#)).

1.5.6. Звено чистого запаздывания

В звене чистого запаздывания выходная величина точно повторяет изменения входной величины, но с некоторым отставанием по времени τ , называемым временем чистого запаздывания, т.е.

$$y(t) = x(t - \tau).$$

Временные и частотные характеристики звена чистого запаздывания представлены на [рис. 1.9](#).

Переходные характеристики равны ([рис. 1.9, а, б](#)):

$$h(t) = 1(t - \tau), \\ w(t) = h'(t) = 1'(t - \tau).$$

Передаточная функция звена запаздывания имеет вид

$$W(p) = e^{-p\tau}.$$

АФЧХ звена чистого запаздывания

$$W(j\omega) = e^{-j\omega\tau} = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau.$$

Действительная и мнимая частотные характеристики равны

$$\operatorname{Re}(\omega) = \cos \omega \tau,$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = -\sin \omega \tau.$$

АЧХ и ФЧХ звена составляют [\(рис. 1.9, в, г\)](#)

$$A(\omega) = 1,$$

$$\varphi(\omega) = -\omega \tau.$$

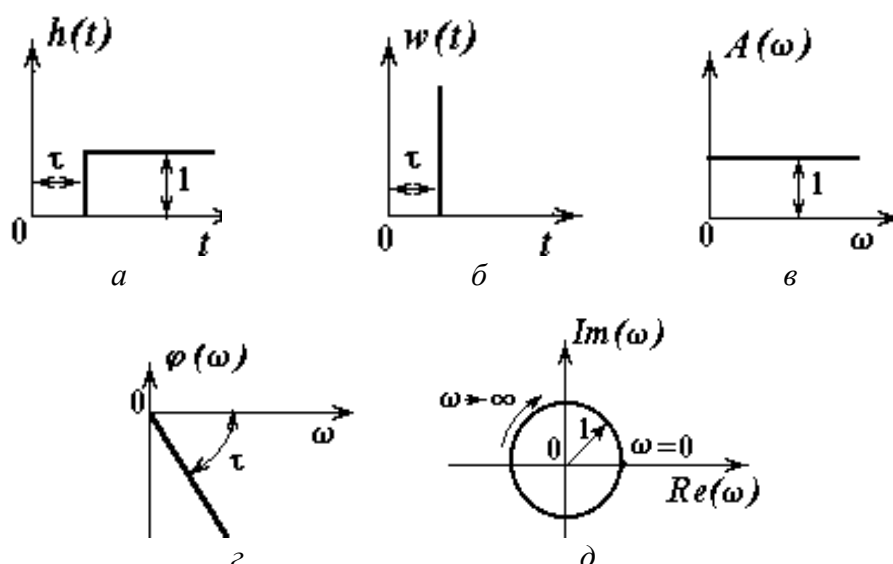


Рис. 1.9. Характеристики звена чистого запаздывания: а – переходная; б – импульсная переходная; в – модульная; г – ФЧХ; д – АФЧХ

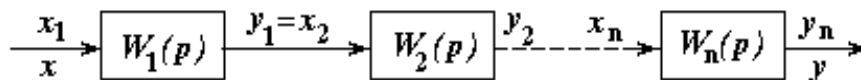
Таким образом, при подаче на вход звена гармонических колебаний на выходе появляются такие же гармонические колебания, но сдвинутые по фазе на угол $\varphi(\omega) = -\omega \tau$. Годограф АФЧХ звена представляет собой окружность с радиусом $A(\omega) = 1$ с центром в начале координат [\(рис. 1.9, д\) \[5\]](#).

1.5.7. Соединения звеньев

Различают три типа соединения звеньев: последовательное, параллельное и с обратной связью [\(рис. 1.10\)](#). Рассмотрим передаточные функции систем при различном соединении звеньев.

Последовательное соединение. Последовательным называют такое соединение, при котором выходная величина предыдущего звена является входной величиной последующего звена [\(рис. 1.10, а\)](#). Передаточная функция системы последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_{n-1}(p) \cdot W_n(p).$$



a

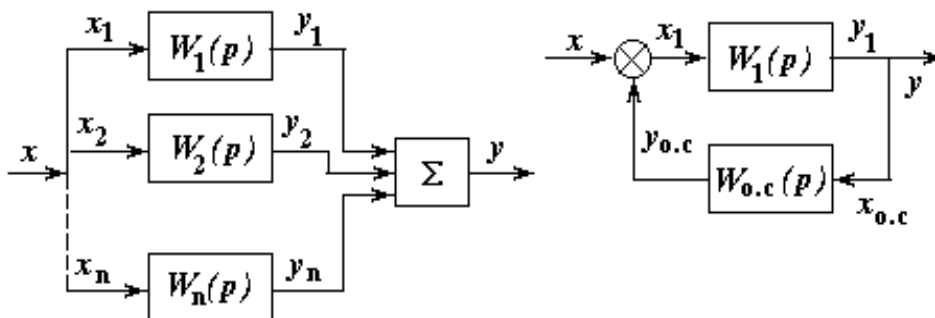


Рис. 1.10. б урные схемы соединений: а – посл... ельного;
б – параллельного; в – с обратной связью

Параллельное соединение. При параллельном соединении звеньев на вход всех звеньев (рис. 1.10, б) поступает одна и та же входная величина x , а выходная величина равна сумме выходных величин отдельных звеньев:

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_{b-1} + y_n.$$

Передаточная функция системы параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_{n-1}(p) + W_n(p).$$

Соединение с обратной связью. Если отдельное звено с передаточной функцией $W_1(p)$ охвачено обратной связью в виде другого звена с передаточной функцией $W_{0.c}(p)$ (рис. 1.10, в), то соблюдаются соотношения

$$y_1 = x_{0.c} = y, \quad x_1 = x \pm y_{0.c}.$$

Знак «плюс» соответствует положительной обратной связи, знак «минус» – отрицательной обратной связи.

Передаточная функция системы при охвате звена обратной связью равна дроби, в числителе которой – передаточная функция звена, в знаменателе – единица плюс (минус), произведение передаточных функций основного звена и звена обратной связи равно

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) \cdot W_{0.c}(p)}.$$

Знак «минус» соответствует положительной обратной связи, знак «плюс» – отрицательной обратной связи [5].

1.6. Автоматические регуляторы, типовые законы регулирования

1.6.1. Предварительный выбор структуры системы регулирования

Качество получаемой в металлургической промышленности продукции зависит от ряда величин, определяющих нормальное протекание процесса. Поэтому при построении АСР необходимо, прежде всего, выделить величины, подлежащие контролю и регулированию, а также выявить точки введения управляющих воздействий, каналы их прохождения по объекту, т.е. определить структуру системы.

Контролируемые величины выбирают так, чтобы их число было минимальным, но при этом обеспечивалось наиболее полное представление о ходе протекания технологического процесса.

В качестве регулируемых величин следует выбирать параметры, непосредственно влияющие на качество готовой продукции, на весь ход технологического процесса. Это величины, от которых в наибольшей степени зависят производительность и экономичность работы агрегата, химические и физические свойства продукта на выходе.

Для выбора управляющих воздействий составляют схему взаимных воздействий величин объекта, выделяют основные и дополнительные каналы прохождения сигналов, а затем составляют дополнительные контуры регулирования. При этом выбирают такие управляющие воздействия, которые обеспечивают наибольшую скорость изменения регулируемых величин.

Целью анализа статических связей между переменными является выявление статически независимых управляющих воздействий и регулируемых параметров.

Связи между различными переменными могут возникать вследствие выполнения условий материального и теплового балансов, действия тех или иных физико-химических законов. Связи также возникают еще и потому, что в системе регулирования часть из них вычисляют, используя значения других переменных. Например, массовый расход газа рассчитывают, используя его объемный расход, температуру, давление и т.д.

При выборе структуры АСР следует руководствоваться следующими правилами:

1. Переменные, подлежащие стабилизации, следует выбирать таким образом, чтобы они были статически независимы друг от друга, т.е. в статическом режиме ни одна переменная не должна определяться значениями других.
2. Для того чтобы технологический процесс был статически управляем, число независимых управляющих воздействий должно быть не меньше числа стабилизируемых переменных.

1.6.2. Состав и работа АСР

Структурная схема типовой АСР приведена [на рис. 1.11](#).

В объекте управления (ОУ) контролируется и регулируется (путем изменения подачи в объект энергии или вещества x) величина y .

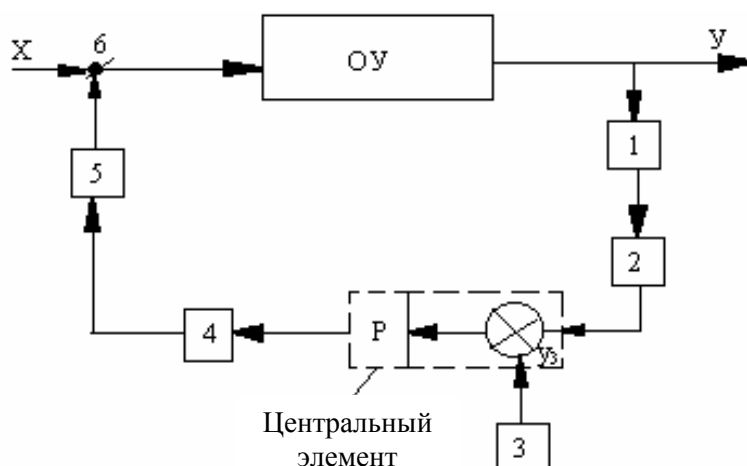


Рис. 1.11. Структурная схема типовой АСР

Регулируемый параметр измеряется с помощью датчика 1, сигнал с которого идет на вторичный прибор 2. С вторичного прибора сигнал, пропорциональный измеряемому параметру y , идет на устройство сравнения, которое находится в регуляторе Р, на которое идет также сигнал u_z с задатчика 3. В регуляторе эти два сигнала алгебраически складываются, результат усиливается, преобразуется по соответствующему закону регулирования и поступает на вход усилителя мощности 4, где усиливается по мощности и далее идет на исполнительный механизм 5, перемещающий регулирующий орган 6. Это вызывает изменение подачи в ОУ энергии или вещества.

1.6.3. Стандартные законы регулирования

Автоматический регулятор – это устройство или совокупность устройств, посредством которого осуществляется процесс автоматического регулирования.

Функционирование регулятора происходит в соответствии с *законом (алгоритмом) регулирования*, под которым понимают математическое выражение зависимости выходной величины регулятора от входной.

При расчете АСР проверяют возможность использования наиболее простого закона регулирования, каждый раз оценивая качество регулирования, и если оно не удовлетворяет требованиям, переходят к более сложным законам.

Выбор типа регулятора производится с учетом характеристик объекта и требуемого качества регулирования.

Существуют несколько типовых законов регулирования:

пропорциональный (П-закон);

интегральный (И-закон);

пропорционально-интегральный (ПИ-закон);

пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-закон);

пропорционально-дифференциальный (ПД-закон);

двухпозиционный;

трехпозиционный.

Пропорциональный регулятор (П-закон регулирования).

Пропорциональный закон выражается уравнением

$$y_p = k_p x_p,$$

где y_p , x_p – выходной и входной сигналы регулятора; k_p – коэффициент пропорциональности, являющийся параметром настройки П – регулятора.

У этих регуляторов отклонение регулируемой величины от ее заданного значения вызывает перемещение регулирующего органа на величину, пропорциональную этому отклонению ([рис.1.12](#)).

П-регулятор можно применять при работе как на устойчивых (статических), так и на нейтральных объектах, если допустима статическая ошибка регулирования.

Интегральный регулятор (И-закон регулирования).

Процесс регулирования происходит по закону, который описывается уравнением

$$y_p = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} x_p d\tau,$$

где $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования, являющаяся параметром настройки И-регулятора.

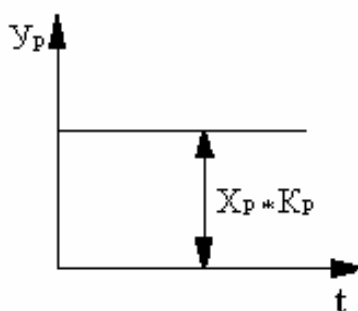


Рис. 1.12. Переходный процесс в П-регуляторе

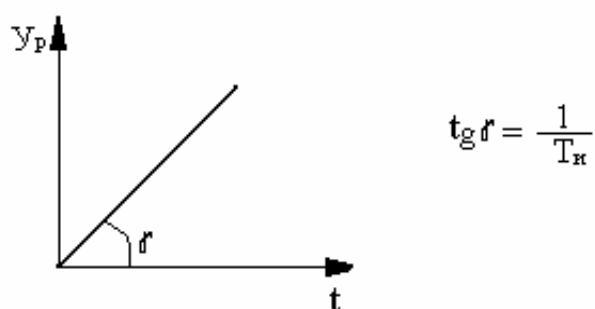


Рис. 1.13. Переходный процесс в И-регуляторе

Интегральные регуляторы производят перемещение регулирующего органа пропорционально интегралу изменения регулируемой величины до тех пор, пока не восстановится ее заданное значение (рис. 1.13).

Введение интегральной составляющей в закон регулирования усложняет динамику переходных процессов, повышая порядок дифференциального уравнения системы. При этом возможно появление апериодических и колебательных процессов. Наличие интегральной составляющей гарантирует отсутствие статической ошибки.

И-регуляторы применяют для работы только на статических объектах и когда допустимы большие значения динамической ошибки и времени регулирования.

Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-закон регулирования).

Пропорционально-интегральный закон выражается уравнением

$$y_p = k_p \left(x_p + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} x_p d\tau \right).$$

Его выходной сигнал состоит из суммы двух составляющих: пропорциональной и интегральной (рис. 1.14).

Данные регуляторы обладают ценным свойством отсутствия статической ошибки регулируемой величины при их использовании в АСР.

ПИ-регуляторы широко используют для работы на статических и астатических (нейтральных) объектах. Показатели качества регулирования улучшают, увеличивая коэффициент усиления пропорциональной части регулятора k_p .

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-закон регулирования).

ПИД-закон регулирования определяется уравнением

$$y_p = k_p \left(x_p + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} x_p d\tau + T_{\text{д}} \frac{dx_p}{d\tau} \right),$$

где $T_{\text{д}}$ – время дифференцирования (предварения).

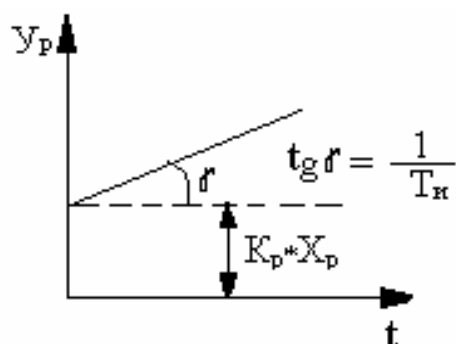


Рис. 1.14. Переходный процесс в ПИ-регуляторе

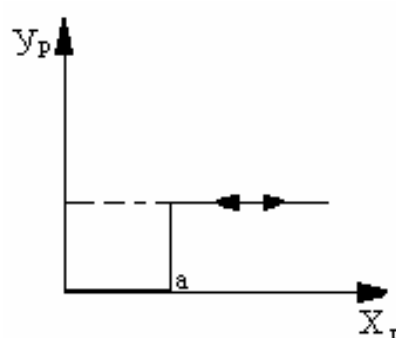


Рис. 1.15. Переходный процесс в двухпозиционном регуляторе

Параметрами настройки этих регуляторов являются: коэффициент пропорциональности k_p и постоянные времени T_i и T_d .

Введение дифференциальной составляющей значительно уменьшает скорость отклонения регулируемой величины от заданного значения.

Позиционные законы регулирования.

Двухпозиционный закон регулирования реализуется двухпозиционными регуляторами, выходная величина которых может принимать только два значения (рис. 1.15). Трехпозиционный закон является более сложной разновидностью двухпозиционного закона.

1.6.4. Выбор типа автоматического регулятора

Основными исходными данными для выбора регулятора являются характеристики объекта регулирования и требуемое качество регулирования. Для выбора регулятора необходимо знать следующее:

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, выраженное в процентах хода регулирующего органа.

3. Допустимое динамическое отклонение.

4. Допустимое перерегулирование.

5. Допустимую статическую ошибку.

6. Допустимое время регулирования.

Требуемое качество регулирования зависит от условий протекания технологического процесса и работы агрегата.

Настройки регуляторов определяют обычно по приближенным формулам, а затем уточняют в процессе настройки АСР непосредственно на объекте.

1.7. Понятие устойчивости АСР, качество процесса регулирования

1.7.1. Устойчивость АСР

Одной из важнейших характеристик автоматической системы управления наряду с точностью является устойчивость. Причем, если показатели точности определяют степень полезности и эффективности системы, то от устойчивости зависит работоспособность системы. Система, не обладающая устойчивостью, вообще не способна выполнять функции управления и имеет нулевую или даже отрицательную эффективность (т.е. система вредна). Неустойчивая система может привести управляемый объект в аварийное со-

стояние. Поэтому проблема устойчивости систем является одной из центральных в теории автоматического управления.

Устойчивость автоматической системы – это свойство системы возвращаться в исходное состояние равновесия после прекращения воздействия, выведшего систему из этого состояния. Неустойчивая система не возвращается в исходное состояние, а непрерывно удаляется от него.

Неустойчивость автоматических систем управления возникает, как правило, из-за неправильного или очень сильного действия главной обратной связи, например, из-за ошибки, допущенной при монтаже системы, связь оказывается положительной, что практически при любых параметрах делает систему неустойчивой. Возникающую при этом неустойчивость называют *статической*.

Более сложным и более распространенным видом неустойчивости является *динамическая неустойчивость*. Она проявляется в системах с отрицательной обратной связью при достаточно большом значении передаточного коэффициента разомкнутого контура и при количестве инерционных звеньев, не меньшем трех [1]. Причиной динамической неустойчивости обычно является значительная инерционность элементов замкнутого контура, из-за которой в режиме колебаний системы сигнал главной обратной связи значительно отстает от входного сигнала и оказывается с ним в фазе. Это означает, что связь, выполненная конструктивно как отрицательная (в статическом режиме!), в динамике (в режиме гармонических колебаний) проявляется на определенной частоте как положительная.

Рассмотрим математическую сущность устойчивости и неустойчивости. Согласно данному выше физическому определению, устойчивость зависит только от характера свободного движения системы. Свободное движение линейной или линеаризованной системы описывается однородным дифференциальным уравнением

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x(t) = 0, \quad (1.1)$$

где $x(t) = x_c(t)$ – свободная составляющая выходной величины системы.

Вынужденная составляющая выходной величины, зависящая от вида внешнего воздействия и правой части дифференциального уравнения, на устойчивость системы не влияет.

Дадим математическое определение понятия «устойчивость». Система является *устойчивой*, если свободная составляющая $x_c(t)$ переходного процесса с течением времени стремится к нулю:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_c(t) = 0.$$

Очевидно, что при этом выходная величина системы будет стремиться к вынужденной составляющей, определяемой внешним воздействием и правой частью уравнения. Устойчивость в смысле этого условия принято называть *асимптотической*.

Если свободная составляющая неограниченно возрастает, т.е. если $\lim_{t \rightarrow \infty} x_c(t) = \infty$, то система будет *неустойчивой*.

Наконец, если свободная составляющая не стремится ни к нулю, ни к бесконечности, то система находится *на границе устойчивости*.

Найдем общее условие, при котором система, описываемая уравнением (1.1), устойчива. Решение этого уравнения имеет вид

$$x_c(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t}, \quad (1.2)$$

где C_k – постоянные, зависящие от начальных условий; p_k – корни характеристического уравнения:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0.$$

Корни характеристического уравнения могут быть действительными ($p_k = \alpha_k$), мнимыми ($p_k = j\beta_k$) и комплексными ($p_k = \alpha_k \pm j\beta_k$), причем комплексные корни всегда попарно сопряжены между собой: если есть корень с положительной мнимой частью, то обязательно существует корень с такой же по модулю, но отрицательной мнимой частью.

Переходная составляющая (1.2) при $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю лишь в том случае, если каждое слагаемое вида $C_k e^{p_k t} \rightarrow 0$. Характер этой функции времени зависит от вида корня p_k . Рассмотрим все возможные случаи расположения корней p_k на комплексной плоскости (рис. 1.16) и соответствующие им функции $x_k(t)$, которые показаны внутри кругов (как на экране осциллографа).

1. Каждому действительному корню $p_k = \alpha_k$ в решении (1.2) соответствует слагаемое

$$x_k(t) = C_k e^{p_k t}. \quad (1.3)$$

Если $\alpha_k < 0$ (корень p_k), то функция (1.3) при $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю. Если $\alpha_k > 0$ (корень p_k), то функция (1.3) неограниченно возрастает.

Если $\alpha_k = 0$ (корень p_k), то эта функция остается постоянной.

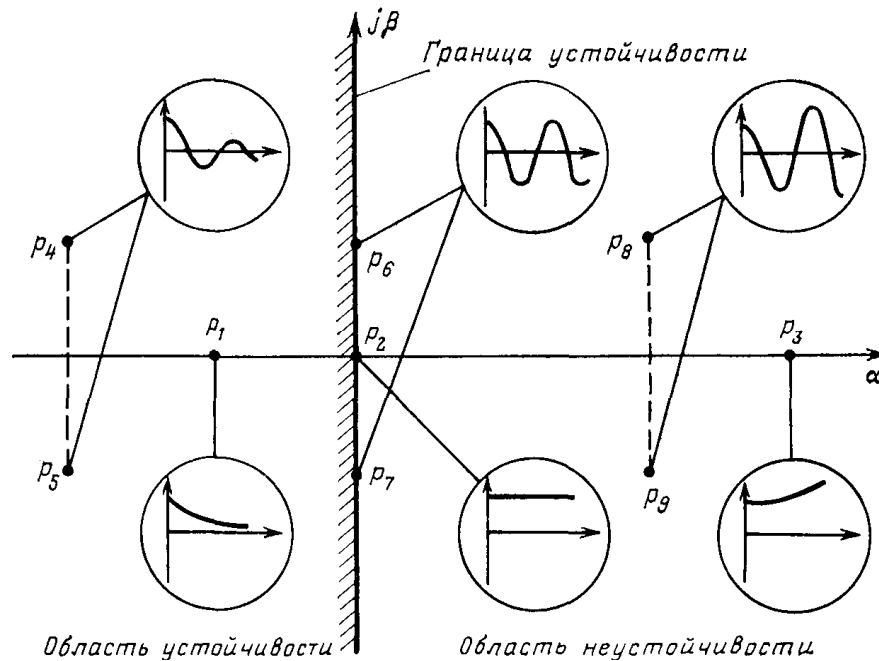


Рис. 1.16. Влияние корней характеристического уравнения системы на составляющие ее свободного движения

2. Каждой паре сопряженных комплексных корней $p_k = \alpha_k + j\beta_k$ и $p_k = \alpha_k - j\beta_k$ в решении (1.2) соответствуют два слагаемых, которые могут быть объединены в одно слагаемое:

$$x_k(t) = 2C'_k e^{\alpha_k t} \sin(\beta_k t + \psi_k). \quad (1.4)$$

Функция (1.4) представляет собой синусоиду с частотой β_k и амплитудой, изменяющейся во времени по экспоненте. Если действительная часть двух комплексных корней $\alpha_k < 0$ (рис. 1.16, корни p_4 и p_5), то колебательная составляющая (1.4) будет затухать. Если $\alpha_k > 0$ (корни p_8 и p_9), то амплитуда колебаний будет неограниченно возрастать. Наконец, если $\alpha_k = 0$ (корни p_6 и p_7), т.е. если оба сопряженных корня – мнимые ($p_k = +j\beta_k$, $p_{k+1} = -j\beta_k$), то $x_k(t)$ представляет собой незатухающую синусоиду с частотой β_k .

Если среди корней характеристического уравнения имеются l равных между собой корней p_l , то в решении (2) вместо l слагаемых вида $C_k e^{p_k t}$ появится одна составляющая:

$$(C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + \dots + C_{l-1} t^{l-1}) e^{p_l t}.$$

Учитывая, что функция вида e^{-bt} при любом b убывает быстрее, чем возрастают слагаемые вида t^r , можно доказать, что и в случае кратности корней решение (1.2) будет стремиться к нулю лишь при отрицательности действи-

тельной части кратных корней p_l .

На основании проведенного анализа можно сформулировать общее условие устойчивости: *для устойчивости линейной автоматической системы управления необходимо и достаточно, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными.*

При этом действительные корни рассматриваются как частный случай комплексных, у которых мнимая часть равна нулю. Если хотя бы один корень имеет положительную действительную часть, то система будет неустойчивой.

Устойчивость системы зависит только от вида корней характеристического уравнения и не зависит от характера внешних воздействий на систему. Устойчивость есть внутреннее свойство системы, присущее ей вне зависимости от внешних условий.

Используя геометрическое представление корней на комплексной плоскости (рис. 1.16) в виде векторов или точек, можно дать вторую формулировку общего условия устойчивости (эквивалентную основной): *для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения находились в левой полуплоскости.*

Если хотя бы один корень находится в правой полуплоскости, то система будет неустойчивой. Мнимая ось $j\beta$ является границей устойчивости в плоскости корней. Если характеристическое уравнение имеет одну пару чисто мнимых корней ($p_k = +j\beta_k$, $p_k = -j\beta_k$), а все остальные корни находятся в левой полуплоскости, то в системе устанавливаются незатухающие гармонические колебания с круговой частотой $\omega = |\beta_k|$. В этом случае говорят, что система находится на *колебательной границе устойчивости*.

Точка $\beta = 0$ на мнимой оси соответствует так называемому нулевому корню. Если уравнение имеет один нулевой корень, то система находится на *апериодической границе устойчивости*. Если таких корней два, то система будет неустойчивой.

Таким образом, для суждения об устойчивости линейной системы достаточно определить лишь знаки действительных частей корней характеристического уравнения.

В теории автоматического управления разработан ряд правил, с помощью которых можно судить о знаках корней, не решая характеристическое уравнение и не находя числовые значения самих корней. Эти правила называются *критериями устойчивости*.

Простейший критерий устойчивости представляет собой *условие положительности коэффициентов характеристического уравнения*. Положительность коэффициентов является необходимым (но не достаточным!) условием устойчивости системы. Это означает, что если все коэффициенты положительны, то система может быть устойчивой или неустойчивой. Но если хотя бы один коэффициент уравнения отрицателен или равен нулю, то система будет неустойчивой.

Критерии устойчивости могут быть алгебраическими и частотными. *Алгебраические критерии* устанавливают необходимые и достаточные условия отрицательности корней в форме ограничений, накладываемых на определенные комбинации коэффициентов характеристического уравнения. *Частотные критерии* определяют связь между устойчивостью системы и формой частотных характеристик системы.

С помощью критериев устойчивости можно не только установить устойчивость системы, но и выяснить, как влияют на устойчивость те или иные параметры и структурные изменения в системе.

Алгебраические критерии устойчивости

Наиболее распространены в инженерной практике критерии устойчивости Гурвица и Рауса.

Критерий Гурвица был сформулирован и доказан в 1895 г. немецким математиком А.Гурвицем. Применительно к задачам теории управления критерий Гурвица можно сформулировать следующим образом: автоматическая система, описываемая характеристическим уравнением $a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0$, устойчива, если при $a_0 > 0$ положительны все определители $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ вида

$$\Delta_i = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots & a_{2i-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & \dots & a_{2i-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & \dots & a_{2i-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{i-2}a_i \end{vmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Если хотя бы один из определителей, называемых определителями Гурвица, отрицателен, то система неустойчива.

Матрицы, по которым вычисляют определители Гурвица, составляют следующим образом: на главной диагонали записывают все коэффициенты характеристического уравнения от a_1 до a_i , (в порядке возрастания индекса), затем в каждом столбце выше диагональных коэффициентов записывают коэффициенты с последовательно возрастающими индексами, а ниже – с последовательно убывающими индексами; на место коэффициентов с индексами большими n или меньшими нуля проставляют нули. При этом каждая i -я матрица получается квадратной размером $i \times i$.

Так как последний столбец главного определителя Δ_n содержит всегда только один элемент a_n , отличный от нуля, то согласно известному свойству определителей

$$\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}. \quad (1.5)$$

Если главный определитель $\Delta_n = 0$, а все остальные определители положительны, то система находится на *границе устойчивости*. С учетом выражения (1.5) это условие распадается на два: $a_n = 0$ и $\Delta_{n-1} = 0$.

Условию $a_n = 0$ соответствует один нулевой корень, т.е. апериодическая граница устойчивости, а условию $\Delta_{n-1} = 0$ – пара мнимых корней, т.е. колебательная граница устойчивости.

Рассмотрим частные случаи критерия Гурвица для $n = 1; 2; 3$. Раскрывая определители, фигурирующие в общей формулировке критерия, можно получить три условия.

1. Для уравнения первого порядка

$$a_0 p + a_1 = 0$$

и условие устойчивости будет иметь вид

$$a_0 > 0 \text{ и } \Delta_1 = a_1 > 0,$$

т.е. положительность коэффициентов уравнения является в данном случае и необходимым и достаточным условием. Действительно, при $a_0 > 0$ и $a_1 > 0$ единственный корень уравнения будет отрицательным: $p_1 = -(a_1/a_0) < 0$.

2. Для уравнения второго порядка

$$a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0$$

и условие устойчивости имеет следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} a_0 > 0, \quad \Delta_1 = a_1 > 0, \\ \Delta_2 = a_2 \Delta_1 > 0, \quad \text{или} \quad a_2 > 0. \end{array} \right\}$$

Таким образом, и для системы второго порядка необходимое условие устойчивости (положительность коэффициентов) является одновременно и достаточным.

3. Для уравнения третьего порядка

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$$

и условие устойчивости имеет следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} a_0 > 0, \quad \Delta_1 = a_1 > 0, \\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_0 a_3 > 0, \quad \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0. \end{array} \right\}$$

Последнее неравенство при $a_3 > 0$ эквивалентно неравенству $\Delta_2 > 0$. Следовательно, для системы третьего порядка, кроме положительности всех коэффициентов, требуется, чтобы $\Delta_2 > 0$. С учетом Δ_2 можно сформулировать мнемоническое правило оценки устойчивости систем третьего порядка: *произведение средних коэффициентов уравнения должно быть больше произведения крайних*.

Преимуществом критериев Гурвица и Рауса является то, что с их помощью можно оценивать устойчивость как замкнутых, так и разомкнутых систем. Вывод об устойчивости при применении этих критериев делается применительно к той системе (замкнутой или разомкнутой), уравнение которой анализируется.

Критерий Михайлова

Критерий Михайлова относится к группе частотных критериев устойчивости. Он был сформулирован и обоснован в 1936 г. советским ученым А. В. Михайловым.

Критерий Михайлова так же, как и критерий Гурвица, основан на анализе характеристического уравнения системы, поэтому с его помощью можно судить об устойчивости замкнутых и разомкнутых систем.

Пусть левая часть характеристического уравнения, называемая *характеристическим полиномом*, имеет вид

$$F(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n.$$

Подставим в этот полином вместо переменного p чисто мнимый корень, который в дальнейшем будем обозначать $j\omega$. Тогда получим функцию комплексного переменного

$$F(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + a_2 (j\omega)^{n-2} + \dots + a_n,$$

которую можно так же, как и амплитудно-фазовую характеристику, представить в виде суммы действительной и мнимой частей:

$$F(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega).$$

Действительная часть $P(\omega)$ содержит только четные степени переменного ω :

$$P(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 - \dots,$$

а мнимая часть $Q(\omega)$ – только нечетные:

$$Q(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + \dots$$

Каждому фиксированному значению переменного ω соответствует комплексное число, которое можно изобразить в виде вектора на комплексной плоскости ([рис. 1.17](#)). Если теперь изменять параметр ω от 0 до ∞ , то конец вектора $F(j\omega)$ опишет некоторую линию ([рис. 1.17, а](#)), которая называется *характеристической кривой*, или *годографом Михайлова*. По виду этой кривой можно судить об устойчивости системы.

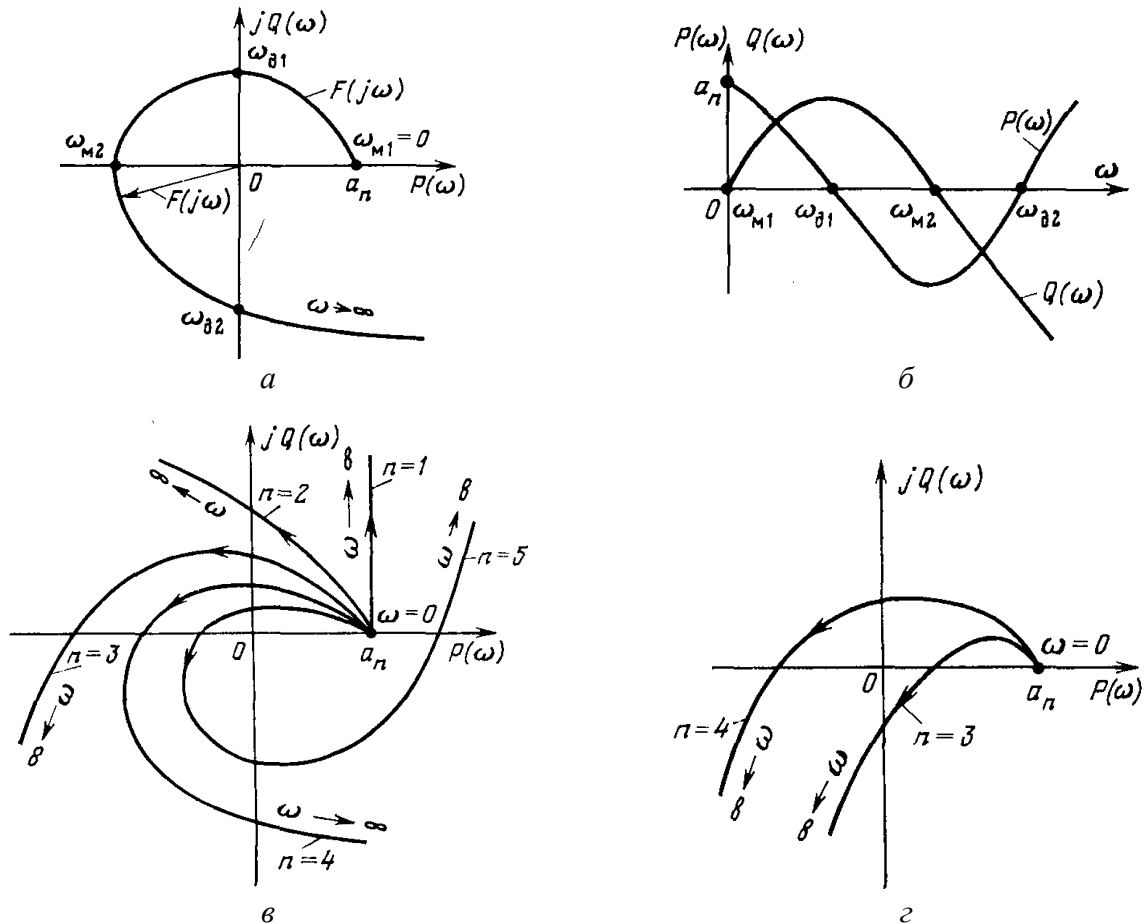


Рис. 1.17. Характеристические кривые (годографы) Михайлова

Критерий Михайлова формулируется следующим образом: *автоматическая система управления, описываемая уравнением n -го порядка, устойчива, если при изменении ω от 0 до ∞ характеристический вектор системы $F(j\omega)$ повернется против часовой стрелки на угол $n\pi/2$, не обращаясь при этом в нуль.*

Это означает, что характеристическая кривая устойчивой системы должна при изменении ω от 0 до ∞ пройти последовательно через n квадрантов. Из выражений $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ следует, что кривая $F(j\omega)$ всегда начинается на действительной оси в точке, удаленной от начала координат на величину a_n (рис. 1.17, б).

Характеристические кривые, соответствующие устойчивым системам (рис. 1.17, в), имеют плавную спиралеобразную форму и уходят в бесконечность в квадранте, номер которого равен порядку уравнения. Если характеристическая кривая проходит не последовательно n квадрантов или меньшее число квадрантов, то система неустойчива (рис. 1.17, в, г). Если кривая $F(j\omega)$ проходит через начало координат, то система находится на границе устойчивости.

Критерий Михайлова целесообразно применять для анализа устойчивости систем высокого порядка ($n > 5$).

Критерий Найквиста

Критерий был сформулирован в 1932 г. американским физиком Х. Найквистом. В отличие от критериев Гурвица, Рауса и Михайлова, которые основаны на анализе характеристического уравнения системы, критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости системы по амплитудно-фазовой характеристике разомкнутого контура системы. В этом заключается существенное преимущество критерия, так как построение АФХ разомкнутого контура для большинства реальных систем оказывается проще, чем построение годографа Михайлова. Особенно упрощается это построение для одноконтурных систем, состоящих из типовых звеньев. А в тех случаях, когда неизвестно математическое описание одного или нескольких конструктивных элементов системы и оценка их свойств возможна только путем экспериментального определения частотных характеристик, критерий Найквиста является единственно пригодным.

Основная формулировка критерия Найквиста гласит: *автоматическая система управления устойчива, если амплитудно-фазовая характеристика $W(j\omega)$ разомкнутого контура не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.*

Эта формулировка справедлива для систем, которые в разомкнутом состоянии устойчивы. Таковыми являются большинство реальных систем, состоящих из устойчивых элементов ([рис. 1.18](#)).

Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутого контура соответствуют трем различным случаям ([рис. 1.18, а](#)): система устойчива (кривая 1); система находится на колебательной границе устойчивости (кривая 2); система неустойчива (кривая 3).

Употребленное в формулировке критерия Найквиста понятие охвата точки имеет некоторую неопределенность, из-за чего в случаях сложной формы кривой $W(j\omega)$ могут возникнуть затруднения в суждении об устойчивости системы. Поэтому для большей ясности рекомендуется следующий прием. Надо проследить мысленно за движением вектора $W_1(j\omega) = 1 + W(j\omega)$, вращающегося вокруг точки $(-1; j0)$ и скользящего по кривой $W(j\omega)$. Угол поворота вектора $W_1(j\omega)$, равный π , означает охват точки $(-1; j0)$, а угол, меньший π , — неохват.

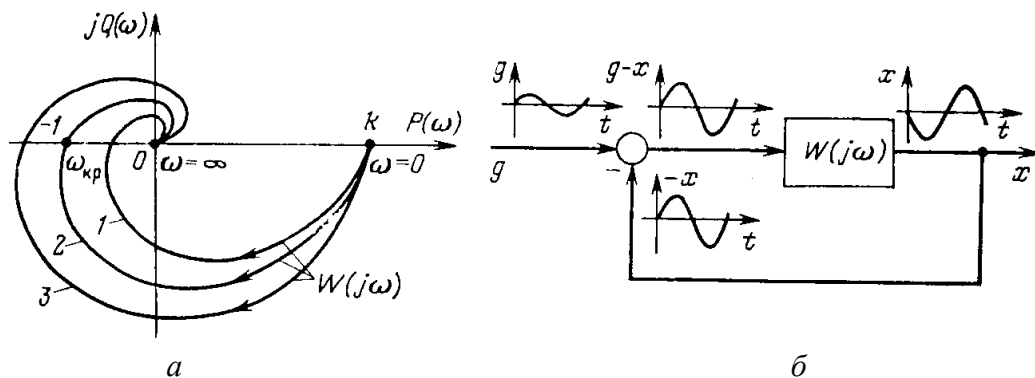


Рис. 1.18. Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутого контура (а) и физическая трактовка (б) критерия Найквиста

Для использования изложенного приема применительно к астатическим системам, которые содержат интегрирующее звено, и амплитудно-фазовые характеристики которых начинаются в минус ∞ на мнимой оси, характеристику $W(j\omega)$ предварительно дополняют в четвертом квадранте дугой окружности бесконечно большого радиуса.

Для суждения об устойчивости систем, имеющих АФХ сложной конфигурации, когда кривая АФХ пересекает действительную ось левее точки $(-1; j0)$ несколько раз, можно также использовать правило переходов, сформулированное советским ученым Я.З. Цыпкиным: *АФХ не охватывает точку $(-1; j0)$, т.е. система устойчива, если при возрастании ω разность между числом положительных (сверху вниз) и отрицательных (снизу вверх) переходов АФХ через ось абсцисс слева от точки $(-1; j0)$ равна нулю.*

Если АФХ начинается или заканчивается на отрезке $(-\infty; -1)$, то считают, что характеристика совершает полперехода.

Частота, при которой амплитудная характеристика $A(\omega)$ – модуль функции $W(j\omega)$ – принимает значение единицы, называется *частотой среза* и обозначается $\omega_{\text{ср}}$. Частоту, при которой фазовый сдвиг $\varphi(\omega) = -\pi$, обозначают ω_{π} .

Пользуясь введенными обозначениями, можно записать условие нахождения системы на границе устойчивости:

$$\omega_{\text{ср}} = \omega_{\pi}.$$

Частота, с которой система колеблется на границе устойчивости, называется *критической* и обозначается $\omega_{\text{кр}}$.

Иногда на практике встречаются системы, в контуре которых имеется одно или несколько неустойчивых элементов. Такие системы в разомкнутом состоянии неустойчивы. Для суждения об их устойчивости необходимо использовать *другую формулировку критерия Найквиста: автоматическая система управления устойчива, если амплитудно-фазовая характеристика $W(j\omega)$ разомкнутого контура охватывает $l/2$ -раз точку с координатами $(-1; j0)$, где l – число правых корней характеристического уравнения разомкнутого контура.*

Количество охватов при этом можно определять по правилу Цыпкина как разность между числом положительных и отрицательных переходов.

Данная формулировка критерия Найквиста является более общей, чем предыдущая. Действительно, если разомкнутая система устойчива ($l = 0$), то для устойчивости замкнутой системы АФХ должна охватывать точку $(-1; j0)$ нуль раз, другими словами, не охватывать.

Из обеих формулировок следует, что для суждения об устойчивости системы необходимо предварительно установить устойчивость ее в разомкнутом состоянии. Обычно эта вспомогательная задача решается сравнительно легко, при помощи критерия Гурвица: для этого приравнивают к нулю знаменатель передаточной функции $W(p)$ разомкнутого контура и анализируют данное характеристическое уравнение.

Во многих практических случаях устойчивость разомкнутого контура

может быть оценена без каких-либо вычислений непосредственно по виду входящих в контур звеньев.

Критерий Найквиста также используют для анализа устойчивости систем, содержащих звено запаздывания (рис. 1.19). Если звено запаздывания включено последовательно с остальными звеньями (рис. 1.19, а), то амплитудно-фазовая функция разомкнутого контура может быть представлена в виде уравнения

$$W(j\omega) = W'(j\omega) e^{-j\omega\tau},$$

где $W'(j\omega)$ – эквивалентная амплитудно-фазовая функция остальных звеньев.

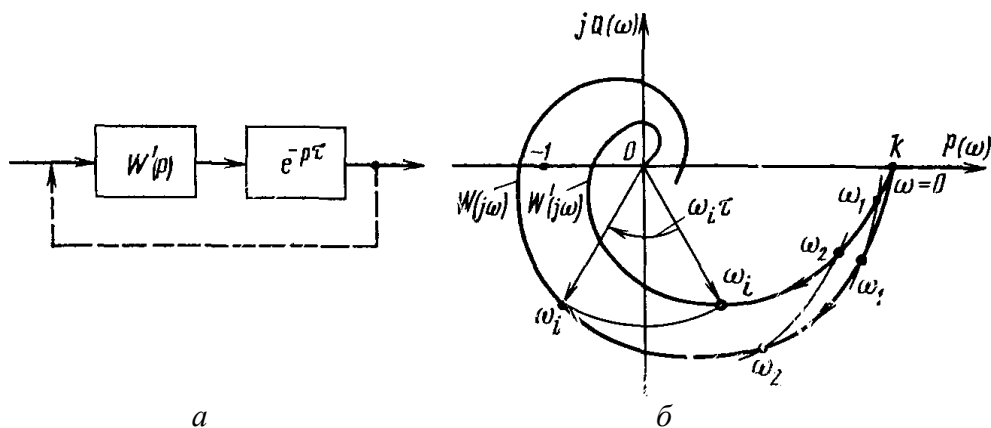


Рис. 1.19. Оценка устойчивости системы с запаздыванием:
а – структура системы; б – АФХ разомкнутого контура

Характеристику $W(j\omega)$ строят следующим образом. Вначале строят кривую $W'(j\omega)$, а затем каждый вектор, соответствующий частоте ω_i , поворачивают на угол $\omega_i \tau$ (рис. 1.19, б).

Звенья запаздывания, как правило, ухудшают устойчивость систем. Если разомкнутый контур системы образован последовательным соединением типовых динамических звеньев, то целесообразно частотную характеристику контура строить в логарифмической системе координат и об устойчивости системы судить по виду этой характеристики (рис. 1.20). При этом используют разновидность основной формулировки критерия Найквиста: *система устойчива, если при достижении фазовой частотной характеристикой значения минус 180° логарифмическая амплитудная характеристика будет отрицательной* (рис. 1.20, кривые 1).

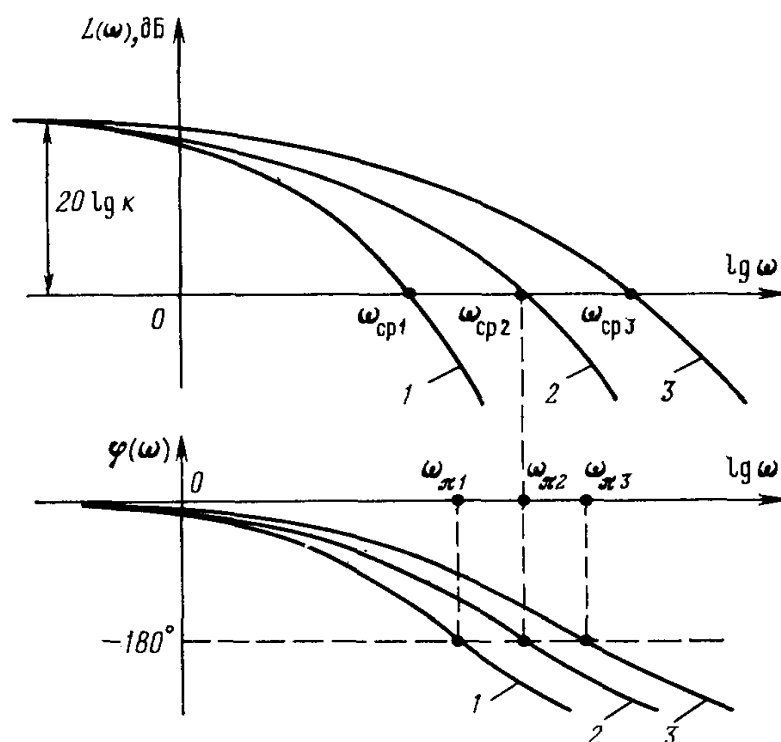


Рис. 1.20. Логарифмические частотные характеристики статических систем: 1 – устойчивой; 2 – находящейся на границе устойчивости; 3 – неустойчивой

Действительно, если $L(\omega) < 0$, то $A(\omega) < 1$. Поэтому отрицательность $L(\omega)$ при $\varphi(\omega_\pi) = -180^\circ$ свидетельствует о том, что АФХ разомкнутого контура не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.

Логарифмические частотные характеристики $L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ разомкнутого контура находят суммированием ординат соответствующих характеристик отдельных звеньев. Фазовые характеристики отдельных звеньев строят либо по нескольким вычисленным точкам, либо при помощи специальных шаблонов. Амплитудные характеристики отдельных звеньев выполняют приближенно в виде совокупности прямолинейных отрезков.

Критерий Найквиста, применяемый в логарифмической системе координат, называют часто *логарифмическим критерием*.

1.7.2. Методы исследования качества переходного процесса

Качество автоматической системы, как и любого технического устройства, может быть оценено такими общепринятыми показателями, как вес системы, ее габариты, стоимость, надежность, долговечность и т. д. Совокупность этих общетехнических показателей характеризуют качество автоматической системы в широком смысле.

В теории автоматического управления и в практике автоматизации термины «качество системы», «качество управления» используют, как правило, в более узком смысле: рассматривают только статические и динамиче-

ские свойства системы. Эти свойства предопределяют точность поддержания управляемой величины (выходной величины объекта) на заданном уровне в установившихся и переходных режимах, а значит, обеспечивают эффективность процесса управления, а сами свойства системы, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества управления*.

Точность системы в переходных режимах оценивают при помощи прямых и косвенных показателей. *Прямые показатели* определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии. *Косвенные показатели* качества определяют по распределению корней характеристического уравнения или по частотным характеристикам системы.

К особой категории показателей качества относятся так называемые *интегральные оценки*, которые вычисляют либо непосредственно по переходной функции системы, либо по коэффициентам передаточной функции системы [1].

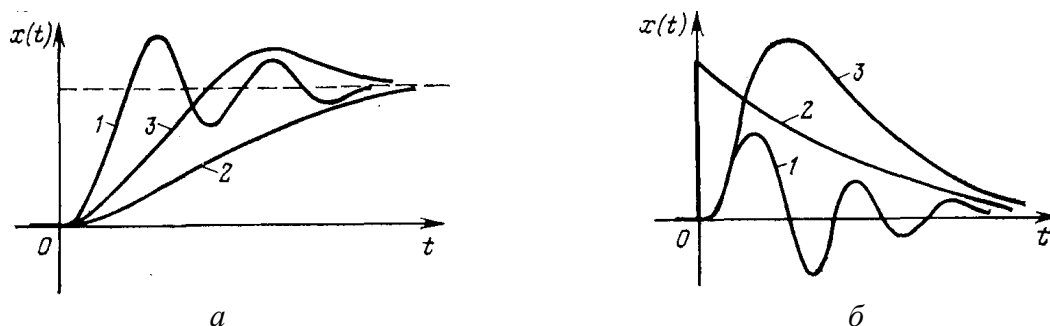


Рис. 1.21. Типовые переходные процессы: *а* – по заданию; *б* – по возмущению

Точность системы в переходных режимах определяется величинами отклонений управляемой переменной $x(t)$ от заданного значения $x_z(t)$ и длительностью существования этих отклонений. Величина и длительность отклонений зависят от характера переходного процесса в системе, который в свою очередь зависит как от свойств системы, так и от места приложения внешнего воздействия (рис. 1.21).

При общей оценке качества, прежде всего, обращают внимание на форму переходного процесса. Различают следующие типовые переходные процессы (рис. 1.21, *а, б*): *колебательный* (кривая 1), *монотонный* (кривая 2) и *апериодический* (кривая 3). Каждый из трех типовых процессов имеет свои преимущества и недостатки, и предпочтение той или иной форме процесса делают с учетом особенностей управляемого объекта. Так, например, в электромеханических объектах со сложными кинематическими передачами (экскаваторы, подъемные установки) нежелательны резкие знакопеременные усилия и поэтому при выборе настроек систем управления такими объектами стремятся к апериодическим и монотонным процессам. В системах управления обогащательными аппаратами большой емкости допустимы колебательные переходные процессы, так как кратковременные отклонения управле-

мых величин не нарушают, как правило, нормальный режим работы аппарата и не ухудшают существенно показатели обогащения.

Прямые показатели

На графиках переходных процессов (рис. 1.22), вызванных ступенчатым изменением задающего воздействия x_z (рис. 1.22, а) и возмущения y_v , действующего на входе объекта (рис. 1.22, б), за начало отсчета для выходной величины $x(t)$ принято значение $x(-0)$, которое было до подачи ступенчатого воздействия.

Одним из главных прямых показателей качества является *перерегулирование* σ , %, которое равно отношению первого максимального отклонения управляемой переменной $x_m(t)$ от ее установившегося значения $x(\infty)$ к этому установившемуся значению (рис. 1.22, а):

$$\sigma = \frac{x_m - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100.$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30–40 %.

Для переходных процессов, вызванных возмущающим воздействием y'_v на входе объекта (рис. 1.22, б), перерегулирование можно определять как отношение второго (отрицательного) максимального отклонения A_2 к первому максимальному отклонению A_1 :

$$\sigma = \frac{A_2}{x_m - x(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_2}{A_1} \cdot 100.$$

Показатель, вычисляемый по данной формуле для переходных процессов относительно канала возмущения, называют также *колебательностью*. Другой важной характеристикой таких процессов служит *динамический коэффициент регулирования* R_d , %, который равен отношению первого максимального отклонения x_m к отклонению выходной переменной $x(t)$ нерегулируемого объекта, вызванному тем же возмущением:

$$R_d = \frac{x_m}{k_0} \cdot 100.$$

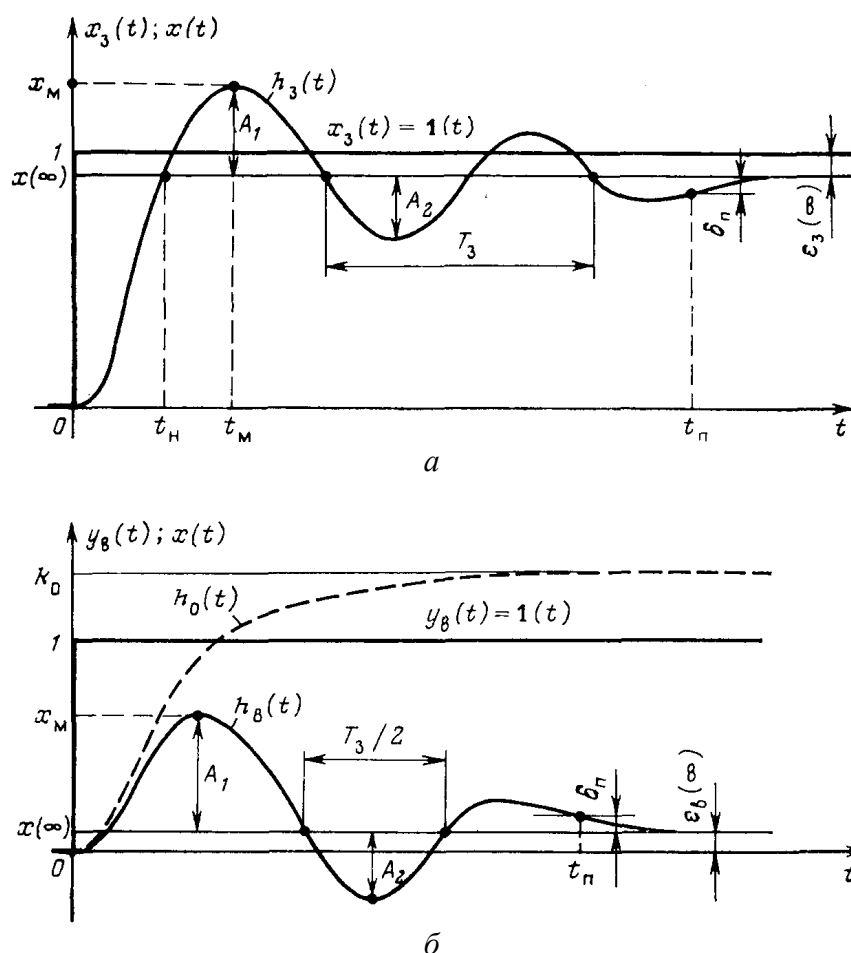


Рис. 1.22. Прямые показатели качества процесса регулирования:
а – по каналу задания; б – по каналу возмущения

По коэффициенту R_d можно судить об эффективности компенсирующего действия регулятора на объект.

Отметим, что и максимальное отклонение x_m , возникающее от возмущения на входе объекта, является показателем качества. При формировании требований к системе указывают допустимое значение максимального отклонения (непосредственно в единицах измерения управляемой величины).

Длительность существования динамических отклонений управляемой величины $x(t)$ от ее нового установившегося значения $x(\infty)$ принято оценивать с помощью нескольких характерных моментов времени. Самым важным из этой группы показателей является *длительность переходного процесса* t_n (*время регулирования*). Время регулирования – это интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины $x(t)$ от ее нового установившегося значения $x(\infty)$ становятся меньше некоторого заданного числа δ_n , т.е. до момента, после которого выполняется условие

$$|x(t) - x(\infty)| \leq \delta_n.$$

В промышленной автоматике величину δ_n принимают обычно равной 5 % от установившегося значения $x(\infty)$. При оценке длительности переходных

процессов, вызванных единичным возмущающим воздействием y_v на входе объекта (рис. 1.22, б), величину δ_n можно принимать равной 5 % от значения передаточного коэффициента объекта k_0 , а для процессов, вызванных воздействием x_v на выходе объекта, – в размере 5 % от начального отклонения $x(+0)$.

Дополнительными временными показателями качества являются (рис. 1.22, а): время нарастания t_n , время достижения первого максимума t_m и период затухающих колебаний T_3 . Эти показатели вместе с временем регулирования характеризуют быстродействие системы регулирования. Прямым показателем качества служит также *степень затухания*:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

где A_1 и A_3 – соседние максимальные отклонения (амплитуды) одного знака.

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\psi = 0,75\text{--}0,95$.

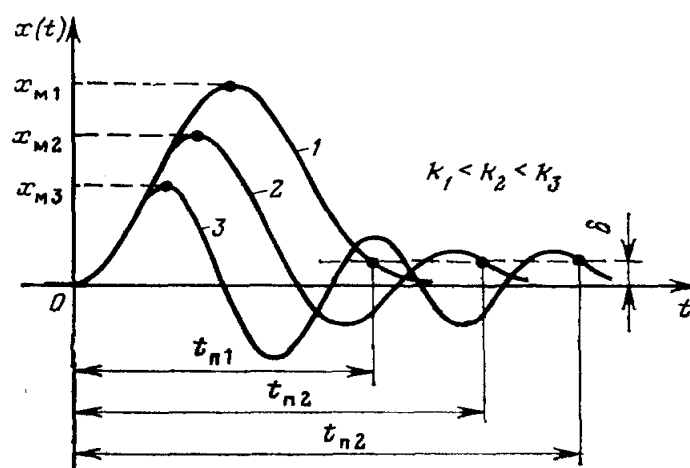


Рис. 1.23. Влияние передаточного коэффициента разомкнутого контура на показатели переходного процесса

Три главных показателя качества – перерегулирование σ , первое максимальное отклонение x_m и длительность t_n – тесно связаны между собой. Они зависят от всех параметров системы, но наиболее сильно – от передаточного коэффициента разомкнутого контура. Причем с увеличением этого коэффициента максимальное отклонение по каналу возмущения всегда уменьшается, а перерегулирование и длительность переходного процесса, как правило, увеличиваются (рис. 1.23). Определение оптимального компромисса между этими двумя противоречивыми тенденциями является одной из основных задач синтеза систем управления.

Рассмотренные прямые показатели качества используют в тех случаях, когда график переходного процесса $x(t)$ можно получить экспериментально в реальной системе регулирования или путем моделирования системы на ЭВМ. Если же такой возможности нет или она связана с определенными трудностями решения или моделирования дифференциальных уравнений высокого

порядка, то пользуются косвенными показателями качества, которые вычисляют без построения графика переходного процесса, по коэффициентам уравнения или по частотным характеристикам системы.

Частотные показатели

Наиболее важными и одновременно удобными косвенными показателями являются *частотные показатели*, которые определяются по частотным характеристикам замкнутого и разомкнутого контура системы.

По амплитудной частотной характеристике $A(\omega)$ замкнутой системы (рис. 1.24) оценивают *частотный показатель колебательности* M , равный отношению максимума A_m характеристики к ее начальному значению $A(0)$:

$$M = \frac{A_m}{A(0)}.$$

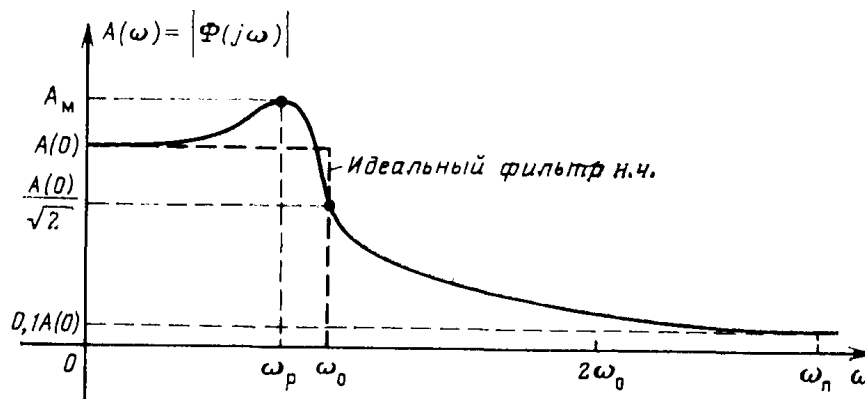


Рис. 1.24. Частотные показатели качества

Чем больше это отношение, тем сильнее колебательность системы (тем больше перерегулирование σ) и, как следствие, больше длительность переходного процесса t_n . Качество системы считается обычно удовлетворительным, если показатель M находится в пределах 1,1–1,5.

Косвенными частотными показателями быстродействия системы служат характерные частоты (рис. 1.24): *резонансная частота* ω_p , частота незатухающих колебаний $\omega_0 \approx \omega_p$ и *частота пропускания* $\omega_\pi \approx 3\omega_0$.

По АФХ разомкнутого контура определяют *запас устойчивости по амплитуде* (рис. 1.25, а):

$$\Delta a = 1 - a(\omega_\pi)$$

и *запас устойчивости по фазе* (рис. 1.25, б)

$$\Delta \varphi = \pi - |\varphi(\omega_{cp})|,$$

которые вместе характеризуют удаленность кривой $W(j\omega)$ от критической точки $(-1; j0)$. При проектировании систем обычно задаются запасом по амплитуде: $\Delta a \geq 0,5\text{--}0,6$ и по фазе $\Delta \varphi \geq 30\text{--}60^\circ$. При этом обеспечивается, как правило, и удовлетворительное качество процесса управления.

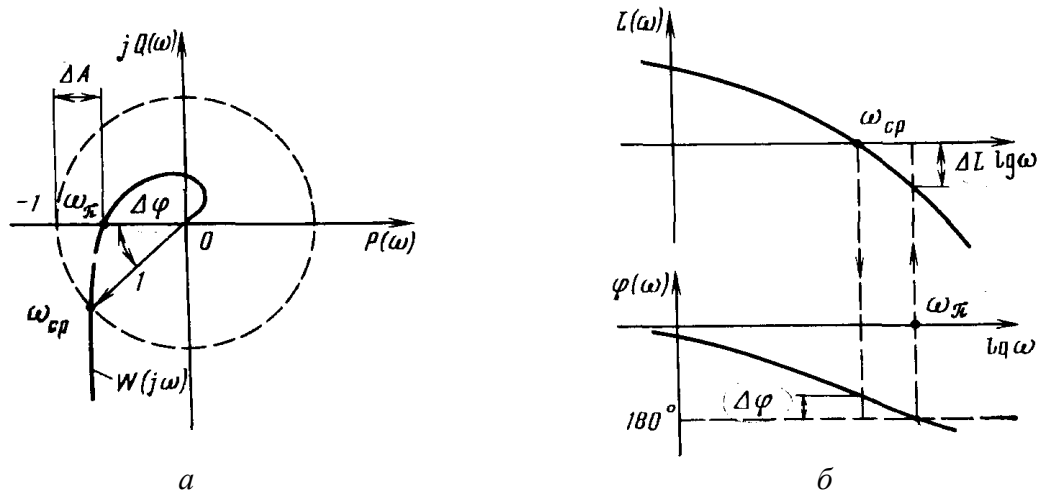


Рис. 1.25. Запасы устойчивости системы

Запасы устойчивости необходимо принимать в связи с тем, что некоторые параметры объекта управления могут произвольно изменяться в процессе работы. Например, постоянные времени электрических машин экскаваторного привода из-за изменения температуры окружающего воздуха могут существенно отклоняться от своих номинальных (расчетных) значений. Расхождения между фактическими значениями параметров объекта и значениями, при которых выполняется анализ устойчивости системы, могут иметь место и по другим причинам. Так, при математическом описании объекта применяется определенная идеализация (отбрасываются второстепенные факторы). Погрешности возникают также при экспериментальном определении и при линеаризации характеристик объекта.

При решении задач синтеза систем запасы устойчивости удобней задавать в логарифмических координатах (рис. 1.25, б).

В этом случае запас устойчивости по амплитуде определяют по выражению

$$\Delta L = 20 |\lg A(\omega_\pi)|.$$

Указанным выше значениям ΔA соответствует $\Delta L \geq 6-8$ дБ.

Корневые показатели

Для косвенной оценки качества управления используют также *корневые показатели*, определяемые по расположению корней p_1, p_2, \dots, p_n характеристического уравнения замкнутой системы

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

на комплексной плоскости (рис. 1.26).

Наиболее общим корневым показателем качества является *среднее геометрическое значение модулей корней*, которое легко вычисляется через крайние коэффициенты характеристического уравнения:

$$\alpha_0 = \sqrt[n]{a_n / a_0}. \quad (1.6)$$

Среднегеометрический корень α_0 определяет на действительной оси комплексной плоскости (рис. 1.26, а) точку, являющуюся геометрическим центром всех корней характеристического уравнения и служит обобщенной мерой быстродействия системы: чем меньше показатель α_0 , тем ближе «со-звездие» корней к мнимой оси и тем больше длительность переходного процесса.

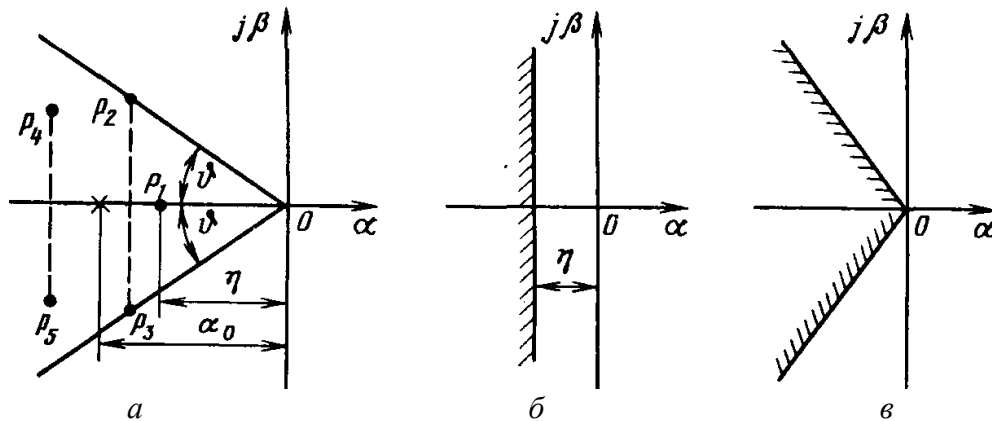


Рис. 1.26. Корневые показатели качества

Основное влияние на характер переходного процесса оказывают корни, расположенные ближе к мнимой оси, которые дают наиболее длительные составляющие переходного процесса и называются *доминирующими*.

Расстояние от мнимой оси до ближайшего к ней корня называется *степенью устойчивости* η . Если ближайший корень является действительным (рис. 1.26, а, корень p_1), то доминирующей составляющей переходного процесса будет экспонента с показателем степени $p_k = -\eta$:

$$x_k(t) = C_k e^{-\eta t},$$

если же ближайшими к мнимой оси являются два сопряженных комплексных корня, то доминирующей будет одна колебательная составляющая, которая затухает также по экспоненциальной составляющей. В обоих случаях длительность переходного процесса определяется приближенной формулой

$$t_{\Pi} \leq 3/\eta,$$

где знак равенства относится к случаю действительного доминирующего корня, а знак неравенства – к случаю комплексных доминирующих корней.

Колебательные свойства системы регулирования предопределяет пара комплексных корней $p_k = \alpha_k \pm j\beta_k$, для которой отношение мнимой части комплексного корня к его действительной части максимально:

$$\mu_d = |\beta_k|/|\alpha_k|$$

или наибольший угол ϑ между двумя симметричными лучами будет максимальным (рис. 1.26, а). Такой парой, предопределяющей доминирующую ко-

лебательную составляющую переходного процесса, являются комплексные корни p_2 и p_3 .

Отношение μ_d мнимой части β к действительной части α доминирующей пары комплексных корней называют *степенью колебательности*.

В практических расчетах чаще используют *корневой показатель колебательности*:

$$m = \alpha_k / \beta_k = 1 / \mu_d,$$

также определяемый через доминирующую пару комплексных корней. При выборе настроек регуляторов стремятся получить значения $m = 0,2-0,5$.

Определение показателей η и μ по уравнению с известными коэффициентами является в общем случае такой же трудоемкой задачей, как и нахождение самих корней. Легче решается обратная задача – определение коэффициентов уравнения и параметров системы, при которых все корни лежат в области с заданной степенью устойчивости ([рис. 1.26, б](#)) или колебательности ([рис. 1.26, в](#)). Для этого может быть использован метод D-разбиения [\[1\]](#).

1.8. Модели объектов регулирования и методы их получения

Процессы, протекающие в объектах, могут быть формализованы, т.е. с достаточной степенью точности описаны с помощью математических зависимостей. Совокупность математических уравнений, отражающих взаимосвязь выходных и входных величин объекта, дополненная ограничениями, накладываемыми на эти величины условиями их физической реализации и безопасной эксплуатации, представляют собой *математическую модель* (*математическое описание*) объекта.

Математическая модель должна отражать особенности объекта, существенные с точки зрения его управления, быть адекватной моделируемому объекту (достаточно точно отражать его количественные и качественные свойства), а также быть по возможности более простой.

Математическая формализация объекта позволяет использовать его для исследования, а также для решения задачи управления этим объектом методами математического моделирования, которые обычно реализуют с применением средств вычислительной техники.

В соответствии с физической сущностью процессов, протекающих в объекте, математические модели делятся на *детерминированные* и *стохастические*.

В *детерминированных* моделях значения выходных величин однозначно определяются значениями входных величин, а исследуемый процесс описывается строгими законами физики, математики, химии и т.п. (например, законы термодинамики, материальный и энергетический балансы и т.д.). Для решения этих задач используют методы классического анализа и численные

методы. Детерминированные модели с успехом используют для исследования относительно простых систем.

В *стохастических* моделях отсутствует четкое соответствие между значениями входных и выходных величин, взаимозависимость между ними описывается случайными функциями времени. Для их решения используют аппарат теории вероятности и математической статистики.

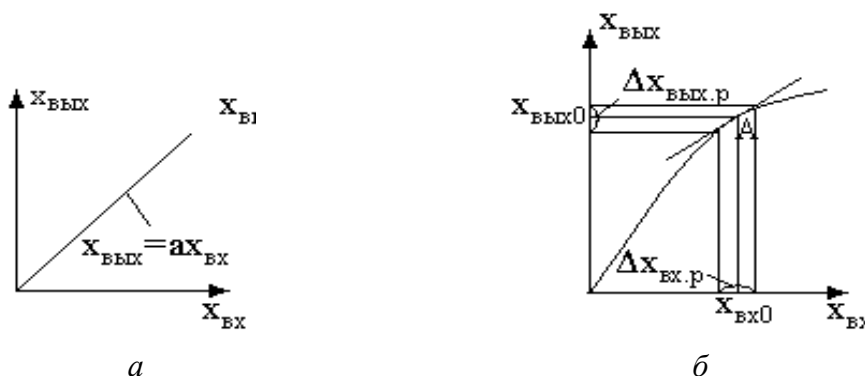


Рис. 1.27. Статические характеристики: *а* – линейная;
б – нелинейная

Математические модели описывают динамические и статические свойства АСР и звеньев. Статические характеристики позволяют рассчитать величину изменения выходной величины при известном изменении входного воздействия после достижения равновесного состояния (рис. 1.27). Звено или АСР будут линейными, если статическая характеристика описывается линейным алгебраическим уравнением, соответственно и ее график будет линейным (рис. 1.27, *а*). Большинство реальных систем регулирования и элементов АСР обладает нелинейными характеристиками, которые можно линеаризовать в окрестности рабочего режима, как показано на рис. 1.27, *б*. Рабочая точка *А* определяется номинальными значениями параметров $X_{ВХ.0}$, $X_{ВЫХ.0}$, через нее проводится касательная, которую можно рассматривать как рабочий участок статической характеристики. Линеаризацию можно осуществить аналитически, аппроксимацией нелинейного выражения линейным.

Динамические характеристики определяют закон изменения выходного параметра во времени для звена или АСР при известном законе изменения входного воздействия. Динамические характеристики могут быть заданы в аналитических формах временными дифференциальными уравнениями, передаточными функциями, частотными характеристиками. Форма представления математической модели динамики определяется методом, используемым при синтезе и анализе АСР.

Временные дифференциальные уравнения описывают динамические свойства АСР и звеньев любой сложности. Коэффициенты уравнений определяются конструктивно-режимными параметрами звена или АСР. Для неко-

торых систем уравнение может содержать частные производные. Процесс регулирования, т.е. изменение выходного параметра во времени при заданных внешних воздействиях, определяется общим решением уравнения динамики. Математическое выражение, определяющее решение уравнения при скачкообразном изменении одного из входных воздействий, является переходной функцией и может рассматриваться как одна из форм задания математической модели. График переходной функции является переходным процессом (или его еще называют процессом регулирования, кривой разгона). Динамические свойства бака как объекта регулирования уровня можно описать дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T_{об} \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = K_{\mu} \Delta G_{п} - K_f \Delta G_p, \quad (1.7)$$

где $T_{об}$ – постоянная времени, характеризующая инерционность объекта; K_{μ} , K_f – статические коэффициенты усиления; ΔH , $\Delta G_{п}$, ΔG_p – изменение уровня, подачи и расхода.

Общее решение уравнения (1.7) при скачкообразном изменении подачи $\Delta G_{п}$ и при $\Delta G_p = 0$ имеет вид

$$\Delta H = K_{\mu} [1 - \exp(-t/T_{об})] \cdot \Delta G_{п}.$$

График решения (экспонента) приведен на рис. 1.28. Динамика сложных систем регулирования описывается дифференциальными уравнениями высоких порядков. В общем случае

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = \\ = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dy}{dt} + b_m y + \\ + c_0 \frac{d^z f}{dt} + c_1 \frac{d^{z-1} f}{dt^{z-1}} + \dots + c_{z-1} \frac{df}{dt} + c_z f, \end{aligned}$$

где m , n , z — положительные целые числа, обычно $n \geq m$ и $n \geq z$; a_0 , a_1 , ..., a_n , b_0 , b_1 , ..., b_m ; c_0 , c_1 , ..., c_z – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами системы.

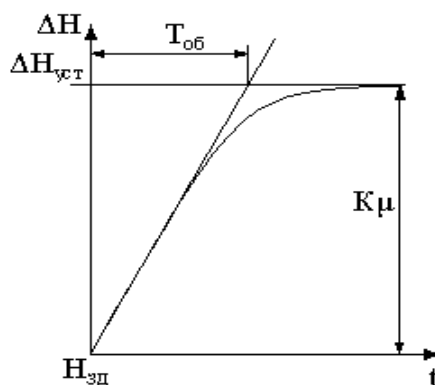


Рис. 1.28. Переходный процесс в объекте первого порядка с самовывравниванием

Если АСР нелинейная, то ее динамические свойства описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

Передаточные функции являются особой формой записи преобразованного по Лапласу дифференциального уравнения. Использование передаточных функций регулирования дает ряд преимуществ, особенно при построении процесса регулирования, т.е. при решении дифференциального уравнения динамики. Преобразование Лапласа позволяет представить функцию вещественного переменного (времени) как функцию комплексного переменного.

Переход из одного класса функций в другой позволяет вместо дифференциальных уравнений оперировать алгебраическими. При нулевых начальных условиях операторная форма записи уравнений совпадает с изображением по Лапласу. Она широко используется в теории автоматического регулирования, так как наряду с упрощением вычислительных операций позволяет легко переходить из временной области в частотную.

Действия дифференцирования и интегрирования заменяются при использовании операторных многочленов умножением и делением на оператор p .

2. ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ И ПРОЦЕССАМИ

2.1. Измерение температуры

В России применяются две температурных шкалы: *абсолютную термодинамическую* и *международную практическую*.

Началом отсчета термодинамической шкалы выбрана точка абсолютного нуля, а в качестве единственной реперной точки принята тройная точка воды, которой соответствует значение 273,1 К. Однако термодинамическая шкала не получила широкого практического применения из-за больших трудностей ее реализации с помощью газовых термометров.

Более удобной при измерениях является международная практическая температурная шкала (МПТШ), которая основана на ряде воспроизводимых температур фазового равновесия веществ (основные реперные точки), которые находятся в диапазоне от $-259,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тройная точка равновесного водорода) до $+1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка плавления золота). Числовые значения температуры в этой шкале сопровождаются знаком $^{\circ}\text{C}$.

Приборы для измерения температуры можно разделить на две группы: *контактные* (имеет место надежный тепловой контакт чувствительного элемента прибора с объектом измерения);

бесконтактные (отличаются тем, что чувствительный элемент термометра в процессе измерения не имеет непосредственного соприкосновения с измеряемой средой).

В зависимости от принципа действия приборы для измерения температуры контактным способом подразделяют следующим образом:

1. Термометры расширения. Принцип действия основан на изменении объема жидкости (жидкостные) или линейных размеров твердых тел (биметаллические) при изменении температуры. Предел измерения от -190 до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Манометрические термометры. Принцип действия основан на изменении давления жидкостей, парожидкостной смеси или газа в замкнутом объеме при изменении температуры. Пределы измерения от -150 до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Электрические термометры сопротивления. Основаны на изменении электрического сопротивления проводников или полупроводников при изменении температуры. Пределы измерения от -200 до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Термоэлектрические преобразователи (термопары). Они основаны на возникновении термоэлектродвижущей силы при нагревании спая разнородных проводников или полупроводников. Диапазоны температур от -200 до $+2300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

К бесконтактным приборам относятся пирометры излучения:

1. Пирометры частичного излучения (яркостные, оптические), основанные на изменении интенсивности монохроматического излучения тел в зависимости от температуры. Предел измерений от 800 до 6000 °С.

2. Радиационные пирометры, основанные на зависимости мощности излучения нагретого тела от его температуры. Предел – от 20 до 2000 °С.

3. Цветовые пирометры, основанные на зависимости отношения интенсивностей излучения на двух длинах волн от температуры тела. Пределы измерения – от 200 до 3800 °С.

2.1.1. Термометры расширения

Измерение температуры *жидкостными стеклянными термометрами* основано на различии коэффициентов объемного расширения жидкости и материала оболочки термометра.

Чувствительность жидкостных термометров тем выше, чем больше разность температурных коэффициентов расширения жидкости и стекла оболочки, поэтому для изготовления термометров применяют термометрические стекла с малым температурным коэффициентом расширения, равным приблизительно $2 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Наиболее распространены ртутные стеклянные термометры. Достоинства ртути: не смачивает стекло, почти не окисляется, легко получается в химически чистом виде и имеет значительный интервал между точкой плавления (–38,87 °С) и точкой кипения (356,58 °С). Недостатки ртути: сравнительно небольшой температурный коэффициент расширения, требуется осторожность при обращении с ней.

Коэффициент расширения ртути $\beta''_{0-100} = 18 \cdot 10^{-5}$ 1/град, а средний коэффициент расширения ртути в стеклянной оболочке $\beta''_{0-100} = 18 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5} = 16 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Нижний предел измерения у ртутных термометров ограничивается температурой затвердевания ртути и равен –38,87 °С, верхний предел определяется допустимыми температурами для стекла. При использовании кварцевого стекла верхний предел измерений увеличивается до 750 °С. Так как температура кипения ртути при нормальном атмосферном давлении равна 356,58 °С, то в высокотемпературных ртутных термометрах пустое пространство в капиллярной трубке заполняется инертным газом под давлением, например, в термометрах со шкалой до 500 °С давление газа достигает $2 \cdot 10^5$ Па. Для измерения температуры до –190 °С в качестве наполнителей применяют органические жидкости (этиловый спирт, толуол, керосин, эфир, пентан и др.). Из таких термометров наибольшее распространение получили спиртовые термометры с пределами измерений от –80 до +80 °С. Вследствие смачивания стекла термометры с органическими термометрическими жидкостями имеют меньшую точность отсчета.

К основным достоинствам стеклянных жидкостных термометров относятся: простота устройства и монтажа, дешевизна и достаточно высокая точ-

ность показаний. К недостаткам жидкостных стеклянных термометров относится невозможность регистрации и передачи показаний на расстояние.

Термометры линейного расширения подразделяют на биметаллические и дилатометрические. Действие *биметаллических* термометров основано на измерении разности линейных расширений пластин из двух разных материалов, жестко соединенных между собой по всей плоскости соприкосновения, при нагревании.

2.1.2. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего (манометрического) вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры.

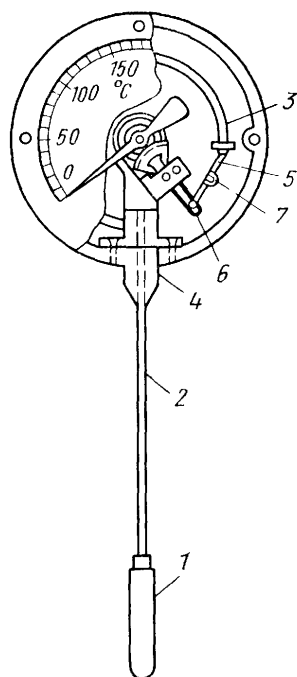


Рис. 2.1. Манометрический термометр с трубчатой пружиной

Манометрический термометр (рис. 2.1) состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 2 и манометрической части 3–7 (3 – манометрическая трубка (пружина); 4 – держатель; 5 – поводок; 6 – зубчатый сектор; 7 – биметаллический компенсатор). Вся система прибора заполнена рабочим веществом. Термобаллон помещают в зону измерения температуры. При нагревании термобаллона давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается. Увеличение давления воспринимается манометрической трубкой (пружиной), которая воздействует через передаточный механизм на стрелку или перо прибора. Термобаллон обычно изготавливают из коррозионно-стойкой стали, а капилляр – из медной или

стальной трубки с внутренним диаметром 0,15–0,5 мм. Длина капиллярной трубки может достигать 60 м.

Для защиты от механических повреждений капиллярную трубку помещают в защитную оболочку из стального плетеного рукава.

Манометрические термометры просты по устройству, надежны в работе.

Различают газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные) манометрические термометры.

Газовые манометрические термометры заполняют азотом, реже гелием или аргоном. Термометры, заполненные азотом, применяют в диапазоне температур от –150 до 600 °C.

Зависимость давления от температуры имеет вид

$$P_t = P_0 [1 + \beta(t - t_0)],$$

где P_0 – давление рабочего вещества при температуре t_0 ; β – температурный коэффициент расширения газа, $\beta = 1/273,15$; t_0 и t – начальная и конечная температуры.

К основным недостаткам газовых манометрических термометров относятся: сравнительно большая инерционность, обусловленная низким коэффициентом теплообмена между стенками термобаллона и наполняющим его газом и малой теплопроводностью самого газа; большие размеры термобаллона, что затрудняет его установку на трубопроводах малого диаметра; необходимость частой поверки.

Жидкостные манометрические термометры заполняют органической полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-5. Предел измерения температуры – от -50 до 300 °С. При повышении температуры термобаллона от t_0 до t жидкость в нем расширяется, избыточный объем вытесняется в капилляр и манометрическую трубку. Жесткость термобаллона и капилляра значительно больше жесткости манометрической трубки, поэтому увеличение объема системы происходит в основном за счет увеличения объема манометрической трубки. При деформации манометрической трубки ее свободный конец перемещается.

Жидкость практически несжимаема, поэтому изменение атмосферного давления не влияет на показания прибора.

В конденсационных манометрических термометрах термобаллоны на две трети объема заполняют низкокипящей жидкостью (фреон, хлористый метил, ацетон). Предел измерения составляет от -50 до 300 °С. Специально изготовленные конденсационные термометры применяются для измерения сверхнизких температур, например, при заполнении гелием для измерения температуры от $0,8$ К. Капилляр в этих термометрах опущен в термобаллон так, чтобы его открытый конец находился в жидкости и в том случае, когда при максимальной температуре в термобаллоне остается часть жидкости. Капилляр и манометрическая пружина заполняются обычно высококипящей жидкостью, которая служит для передачи давления от термобаллона к манометрической пружине.

Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара при температуре рабочей жидкости, которая, в свою очередь, равна температуре измеряемой среды с помещенным в нее термобаллоном.

К недостаткам манометрических термометров относятся невысокая точность измерений (основная погрешность составляет $1,0$ – $2,5$ % в зависимости от длины капилляра) и трудность ремонта при разгерметизации термосистемы.

2.1.3. Электрические термометры сопротивления и приборы, работающие в комплекте с ними

В основу работы этих термометров положено свойство проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от их температуры. Такой термометр состоит из собственно термометра сопротивления и устройства, измеряющего его электрическое сопротивление в функции температуры.

Термометры сопротивления применяют в тех случаях, когда требуется повышенная точность измерений в пределах от -200 до $+650$ °С.

На отечественных заводах изготавливаются платиновые термометры сопротивления (ТСП) для температур от -200 до $+650$ °С и медные термометры сопротивления (ТСМ) для температур от -50 до $+180$ °С.

Основными достоинствами термометров сопротивления являются: высокая степень точности измерения температуры, возможность передачи результатов измерения на расстояние, возможность непрерывного измерения и регистрации температуры, широкий диапазон измерений, централизация контроля.

Недостатками термометров сопротивления являются: необходимость источника питания, значительная инерционность, измерение температуры не в точке, а в определенном объеме, разрушаемость платиновых термометров при вибрации. У медных термометров сопротивления имеются такие недостатки, как малое удельное сопротивление медной проволоки и ее высокая окисляемость при температуре выше 100 °С.

Полупроводниковые термометры сопротивления, которые называются *термисторами* или *терморезисторами*, применяются для измерения температуры в интервале от -90 до $+180$ °С.

Чувствительные элементы термисторов изготавливаются из окислов меди, марганца, магния, никеля, кобальта и других металлов.

Термисторы подразделяются на два типа: кобальто-марганцевые (КМТ) и медно-марганцевые (ММТ). Каждый термистор градуируется индивидуально. Чаще всего термисторы используются не для измерения температуры, а для сигнализации, так как обладают высокой чувствительностью и малыми размерами. Благодаря своей дешевизне и малым размерам они нашли широкое распространение как датчики температуры нагрева подшипников различных агрегатов.

Приборы, работающие в комплекте с термометрами сопротивления, — это *уравновешенные мосты*, *неуравновешенные мосты*, *логометры*. Мосты бывают автоматические и неавтоматические.

Уравновешенный мост состоит из двух плеч, образованных сопротивлениями соединительных линий, постоянными сопротивлениями, переменным сопротивлением, и термометром сопротивления R_T . Равновесия схемы добиваются изменением переменного сопротивления, которое меняется при

изменении параметров термометра сопротивления R_T . В схеме *неуравновешенного моста* отсутствует переменное сопротивление. Применение их ограничено в виду того, что показания зависят от напряжения питания.

Логометры представляют собой разновидность электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы. Принцип действия логометра основан на зависимости угла поворота подвижной системы от величины отношения сил токов, протекающих в двух ветвях с общим источником постоянного тока. Эти токи изменяются с изменением сопротивления термометра R_T .

2.1.4. Термоэлектрические термометры и приборы, работающие в комплекте с ними

Принцип действия термопары основан на эффектах Томпсона и Зеебека. Они проявляются в том, что в спаяе различных проводников A и B возникают контактные разности потенциалов (термоэлектродвижущая сила (термоЭДС)), вызванные диффузией свободных электронов из проводника, где их концентрация больше, величина этой термоЭДС зависит от температуры.

Общая термоЭДС, обусловленная этими эффектами, является функцией температур t_0 , t_1 (рис. 2.2), и зависит от физической природы проводников A и B . Спай термопары с температурой t_1 называется *горячим* или *рабочим*, а спай с t_0 – *холодным* или *свободным*. ТермоЭДС термопары есть функция двух температур:

$$E_{AB} = f(t_1, t_0).$$

Если t_0 поддерживать постоянной, то E_{AB} является функцией только t_1 :
 $E_{AB} = f(t_1)$ при $t_0 = \text{const}$.

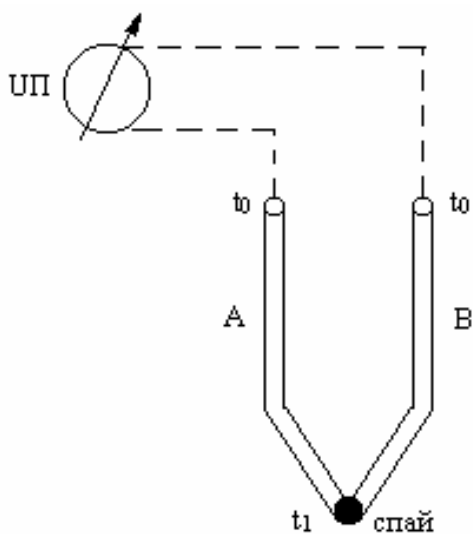


Рис. 2.2. Электрическая схема термоэлектрического термометра

Два любых разнородных проводника могут образовать термопару, но не любая термопара может использоваться для практических температурных

измерений. К материалам для термопар (термоэлектродным материалам) предъявляется ряд требований: жаропрочность, химическая стабильность, воспроизводимость материалов (для обеспечения взаимозаменяемости термопар), заключающаяся в одинаковой зависимости термоЭДС термопары от температуры (табл. 2.1) [6].

Т а б л и ц а 2.1

Термоэлектрические преобразователи стандартных градуировок

Термоэлектрический преобразователь	Химический состав термоэлектрода		Диапазон измеряемых температур при длительном измерении, °С	Предельная температура при кратковременном измерении, °С	Допустимые погрешности, °С
	Положительный	Отрицательный			
Хромель-копель (ТХК)	Хромель (89 % Ni, 9,8 % Cr, 1 % Fe, 0,2 % Mn)	Копель (55 % Cu, 45 % Ni)	–50÷600	800	±5,8
Хромель-алюмель (ТХА)	Хромель (89 % Ni, 9,8 % Cr, 1 % Fe, 0,2 % Mn)	Алюмель (94 % Ni, 2 % Al, 2,5 % Mn, 1 % Si, 0,5 % Fe)	–50÷1000	1300	±9,7
Термоэлектрический преобразователь	Химический состав термоэлектрода		Диапазон измеряемых температур при длительном измерении, °С	Предельная температура при кратковременном измерении, °С	Допустимые погрешности, °С
	Положительный	Отрицательный			
Платинородий-платина (ТПП)	Платинородий (90 % Pt, 10 % Rh)	Платина (100 % Pt)	0÷1300	1600	±3,6
Платинородий-платинородий (ТПР)	Платинородий (70 % Pt, 30 % Rh)	Платинородий (94 % Pt, 6 % Rh)	300÷1600	1800	±5,2
Вольфрамрений-вольфрамрений (ТВР)	Сплав вольфрама с рением		0÷2200	2500	±9,7
	(95 % W, 5 % Re)	(80 % W, 20 % Re)			

Термопара, как и термометр сопротивления, находится в защитной арматуре, обеспечивающей защиту термоэлектродов от воздействий измеряемой среды. В качестве термоэлектродов используется проволока диаметром 0,5–3,0 мм. Термоэлектроды электроизолированы фарфоровыми бусами от защитного чехла.

Приборы, работающие в комплекте с термопарами, – *магнитоэлектрические милливольтметры и автоматические потенциометры*.

Принцип действия *милливольтметра* основан на взаимодействии магнитного поля неподвижного постоянного магнита и постоянного тока, протекающего через подвижную рамку. Сила тока в измерительной цепи зависит от сопротивления измерительной цепи и величины термоЭДС, создаваемой термопарой.

Потенциометры являются наиболее распространенными вторичными приборами, работающими в комплекте с термопарами. Принцип их действия состоит в том, что измеряемая ЭДС уравнивается (компенсируется) равным ей по величине, но обратным по знаку известным напряжением от вспомогательного источника.

2.1.5. Бесконтактные методы измерения температуры

Основные законы теплового излучения

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его *теплового излучения*, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем большую энергию оно излучает.

Участок спектра в интервале длин волн 0,02 – 0,4 мкм соответствует ультрафиолетовому излучению, участок 0,4 – 0,76 мкм – видимому, участок 0,76 – 400 мкм – инфракрасному излучению. *Интегральное излучение* (полное излучение) – это суммарное излучение, испускаемое телом во всем спектре длин волн. *Монохроматическим* (спектральным) называется излучение определенной длины волны.

Измерение температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для абсолютно черного тела. Под абсолютно черным телом подразумевается такое тело, которое полностью поглощает весь падающий на него лучистый поток. В природе абсолютно черных тел нет и лишь некоторые из них по оптическим свойствам близки к ним (нефтяная сажа, платиновая чернь, черный бархат в видимой области спектра имеют коэффициенты поглощения, близкие к единице). В качестве модели абсолютно черного тела находит применение, например, полый многогранник из графита с небольшим отверстием в боковой стенке.

Зависимость интенсивности монохроматического излучения $I_{\lambda 0}$ абсолютно черного тела от температуры описывается уравнением Планка:

$$I_{\lambda 0} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1},$$

где λ – длина волны, м; T – температура, К; C_1 , C_2 – постоянные Планка, $C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-6}$ Вт·м², $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К.

При температуре до 3000 К формула Планка может быть с достаточной точностью (погрешность не более 1 %) заменена формулой Вина:

$$I_{\lambda 0} = C_1 \cdot \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (2.1)$$

Интеграл от интенсивности излучения по всем длинам волн дает плотность интегрального излучения E_0 , которая называется *полной мощностью излучения* (закон Стефана-Больцмана):

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.2)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

Реальные тела при одинаковых температурах обладают меньшей плотностью потока излучения, которая характеризуется степенью черноты ε (спектральной ε_λ или полной ε_Σ). Коэффициенты ε_λ и ε_Σ зависят от температуры, химического состава и состояния поверхности.

Виды пирометров

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называются *пирометрами*. Они позволяют контролировать температуру от 100 до 6000 °С и выше. Одним из главных достоинств данных устройств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, т.к. в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название бесконтактных.

Оптические и фотоэлектрические пирометры относятся к пирометрам частичного излучения. Их принцип действия основан на измерении интенсивности монохроматического излучения путем сравнения спектральных энергетических яркостей нагретого тела и эталонной пирометрической лампы накаливания.

Из полного спектра излучения при помощи специального светофильтра выделяется узкий интервал с заданной длиной волны $\lambda + \Delta\lambda$. Для выделения узкой области спектра в этих пирометрах используют красный светофильтр из стекла типа КС-15 толщиной 2 мм. Такой светофильтр пропускает излучение длиной волны 0,63 – 0,68 мкм.

При измерении температуры реальных серых тел пирометром частичного излучения, градуированным по излучению абсолютно черного тела, определяется не истинная температура T , а кажущаяся, называемая яркостной температурой T_λ , которая всегда меньше истинной.

Яркостной температурой реального тела T_λ называют температуру, при которой интенсивность спектрального излучения абсолютно черного тела равна интенсивности спектрального излучения реального тела при истинной температуре T . Соотношение между температурами T и T_λ записывается в следующем виде:

$$\frac{1}{T_\lambda} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}.$$

Из этого уравнения по величине T_{λ} определяется истинная температура T с учетом реальных λ и ε_{λ} . Величина λ определяется цветом светофильтра. Монохроматическая степень черноты ε определяется по справочникам.

Принцип действия *радиационных пирометров* (или *пирометров полного излучения*) основан на зависимости мощности излучения нагретого тела от его температуры.

В этих пирометрах тепловой поток нагретого тела концентрируется с помощью собирающей линзы или вогнутого зеркала на теплоприемнике. Пирометры с линзой называются *рефракторными*, а с вогнутым зеркалом – *рефлекторными*. В качестве теплоприемника используют обычно термобатарею (несколько последовательно соединенных термопар) или термометр сопротивления. В качестве вторичных приборов применяют милливольтметры, автоматические потенциометры и мосты.

Наибольшее распространение в металлургии получили радиационные пирометры рефракторного типа. Рефлекторные пирометры используют лишь для бесконтактного измерения температур от 20 до 300 °С, когда максимум энергии излучения значительно смещен в область длинных волн.

Измеряемая ими температура реального тела называется *радиационной* T_p . При этой температуре полная мощность излучения абсолютно черного тела равна полной мощности излучения реального тела при истинной температуре T .

Используя закон Стефана-Больцмана (2.2), получим

$$T = T_p \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_{\Sigma}}}.$$

Радиационная температура T_p всегда меньше истинной T , так как степень черноты $\varepsilon_{\Sigma} < 1$. Значение ε_{Σ} приводится в справочниках. Так как радиационный пирометр воспринимает энергию во всем спектре излучения, то на его показания влияют пыль и сажа, содержащиеся в воздухе, а также углекислый газ и водяные пары. На показания же пирометров частичного излучения эти газы как оптически прозрачные не влияют.

Принцип действия *цветовых пирометров* (или *пирометров спектрального отношения*) основан на зависимости отношения интенсивности монохроматического излучения для двух заранее выбранных длин волн λ_1 и λ_2 от температуры нагретого тела.

Этот метод измерения основан на том, что при повышении температуры максимум распределения энергии в спектре по закону Вина смещается в сторону более коротких длин волн. Длина волн λ_1 и λ_2 выбирается обычно в красной, синей или красной и зеленой областях спектра.

Температура, измеренная таким образом, называется *цветовой температурой* $T_{\text{ц}}$. Она связана с истинной температурой T соотношением, которое легко находится из уравнения Вина (2.1):

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)},$$

где $\varepsilon_{\lambda 1}$, $\varepsilon_{\lambda 2}$ – монохроматические степени черноты тела для длин волн λ_1 и λ_2 .

Из приведенного выражения следует, что для реальных тел, у которых монохроматические степени черноты не зависят от длины волны, температуры $T_{\text{и}}$ и T совпадают [7].

2.2. Измерение давления

Давление – это результат воздействия какой-либо силы на единицу поверхности. За единицу давления принят Паскаль (Па) – сила в один Ньютон, приложенная к поверхности в 1 м^2 (Н/м^2).

Различают следующие виды давления:

атмосферное (барометрическое), т.е. давление воздушного столба земной атмосферы;

избыточное (манометрическое), т.е. превышение давления над атмосферным;

абсолютное (полное), т.е. сумма атмосферного и избыточного давления.

Если абсолютное давление меньше атмосферного, то избыточное давление становится отрицательным. В этом случае говорят о *разрежении* или *вакууме*, т.е. о разности между барометрическим и абсолютным давлениями.

Для движущейся среды существуют понятия статического давления, динамического (скоростной напор) и полного давления, равного сумме статического и динамического давлений.

Приборы для измерения давления классифицируют по виду измеряемого давления и принципу действия.

По виду измеряемого давления приборы подразделяют следующим образом:

на манометры – для измерения избыточного и абсолютного давления;

барометры – для измерения атмосферного давления;

вакуумметры – для измерения вакуума (разрежения);

мановакуумметры – для измерения избыточного давления и вакуума (разрежения);

напорометры (микроманометры) – для измерения малых избыточных давлений (до 40 кПа);

тягомеры (микроманометры) – для измерения малых разрежений (с верхним пределом измерения не более 40 кПа);

тягионапорометры (микроманометры) – для измерения малых давлений и разрежений (с диапазоном измерений от –20 до +20 кПа);

дифференциальные манометры – для измерения разности двух давлений, ни одно из которых не является давлением окружающей среды.

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяют на жидкостные, деформационные (пружинные), электрические.

2.2.1. Жидкостные манометры и дифманометры

В этих приборах измеряемое давление уравнивается давлением столба рабочей жидкости, заполняющей прибор. Они подразделяются на манометры с U-образной трубкой, чашечные, с наклонной трубкой, кольцевые весы, поплавковые, колокольные.

U-образный манометр (рис. 2.3, а) – наиболее простой жидкостный прибор для измерения давления, вакуума или разности двух давлений. Он состоит из стеклянной трубки 1, 2, согнутой в форме буквы U и укрепленной на основании 3 с миллиметровой шкалой 4. Двусторонняя шкала имеет нулевую отметку в середине. U-образная трубка до нулевой отметки заполняется рабочей жидкостью (ртуть, спирт, вода). При измерении давления или разрежения один конец трубки присоединяется к источнику давления (разрежения), а второй свободно сообщается с атмосферой. В зависимости от того, измеряется ли избыточное давление или разрежение, уровень рабочей жидкости в трубке, сообщающейся с атмосферой, в первом случае повысится, а во втором – понизится.

Верхний предел измерения U-образным манометром не выше 200 кПа, но обычно этот манометр применяют для измерения более низких давлений.

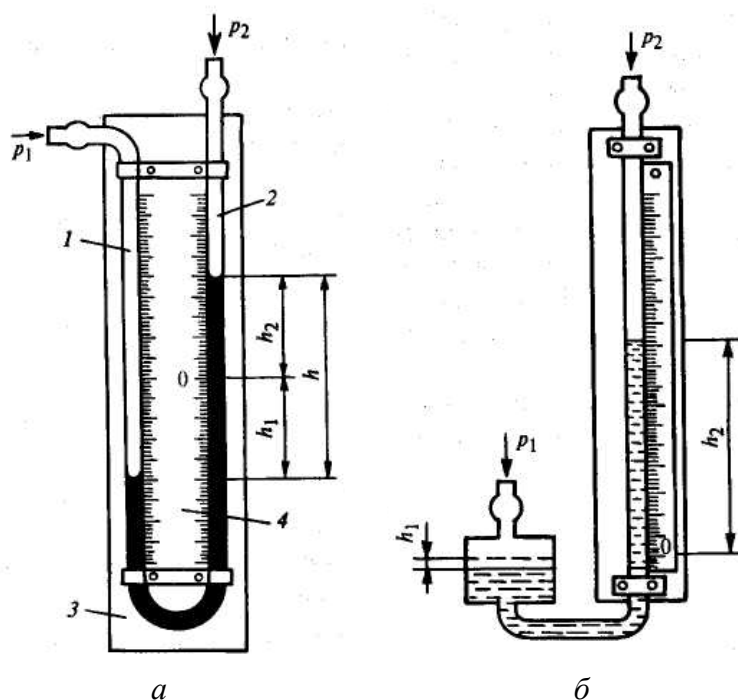


Рис. 2.3. Схемы U-образного манометра (а) и чашечного манометра (б)

Чашечные манометры (рис. 2.3, б) являются разновидностью U-образных манометров. Они отличаются тем, что у них второе колено заменено сосудом (чашкой) диаметром примерно в 20 раз больше, чем стеклянная трубка. Это позволяет производить отсчет только по одному уровню, что по сравнению с U-образным манометром, когда складываются показания двух отсчетов, значительно проще.

У чашечных манометров с вертикальной трубкой верхний предел измерения составляет 1600, 4000, 6000 и 10000 Па. Приведенная погрешность равняется 0,025 % [6].

Дифманометр типа «кольцевые весы» (рис. 2.4) состоит из полого кольца 1, разделенного перегородкой на две части и заполненного наполовину рабочей жидкостью (вода, трансформаторное масло или ртуть). Кольцо при помощи переключателя 2 и призмы 3 свободно висит на подушке 4. В стенку кольца вделаны два патрубка 5, по которым во внутренние полости кольца подаются импульсы давления.

В нижней части кольца симметрично с перегородкой укреплен груз 6, а на переключателе имеются передвижные балансировочные грузики 7. Если давления в обеих полостях кольца равны между собой, т.е. $P_1 = P_2$, то и уровни жидкости в них будут одинаковы, а перегородка и груз 6 будут находиться на вертикальной оси, проходящей через центр кольца. Если, например, $P_1 > P_2$, то жидкость в левой части кольца опустится, а в правой поднимется так, что разность уровней жидкости будет равна

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}.$$

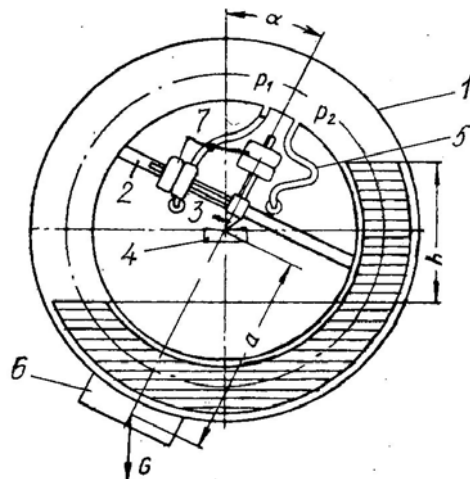


Рис. 2.4. Дифманометр типа «кольцевые весы»

Столб жидкости в правой части кольца высотой h уравнивает разность давлений в полостях кольца $P_1 - P_2$, действующих на поверхности жидкости. Кроме воздействия на поверхность жидкости, давление будет действовать на внутренние стенки кольца и на перегородку, разделяющую кольцо на две полости. Действие давления на внутренние стенки кольца радиально и поэтому не создаёт вращающего момента. Действие давления на разделяющую перегородку создаёт вращающий момент, поворачивающий кольцо по часовой стрелке. Противодействующий момент создаётся грузом 6.

Верхний предел измерения таких приборов при использовании в качестве рабочей жидкости воды или трансформаторного масла составляет 2,425 кПа, а если рабочая жидкость – ртуть, то верхний предел составляет 33,325 кПа [7].

Класс точности «кольцевых весов» 1; 1,5.

2.2.2. Деформационные (пружинные) манометры

В металлургических процессах измерение давлений в большинстве случаев осуществляется деформационными приборами.

Принцип действия деформационных приборов основан на уравнивании измеряемой величины (давления, разрежения, разности давлений) силами деформации различных упругих элементов, причем величина этой деформации служит мерой измеряемой величины.

Деформационные приборы широко применяют как в производственных условиях, так и в лабораторной и поверочной практике. Они имеют простую и надежную конструкцию, широкий диапазон измерений и обладают возможностью дистанционной передачи.

В качестве упругих элементов в приборах для измерения давления применяют следующие устройства: трубчатые, винтовые и гармониковые пружины (или сильфоны), мембраны упругие и «вялые», мембранные коробки.

Наиболее распространенный вид деформационных приборов – *трубчато-пружинные манометры*. Они представляют собой изогнутую по окружности металлическую упругую трубку овального сечения. Под действием измеряемого давления внутри трубки она частично раскручивается вследствие деформации ее сечения, которое стремится принять форму круга.

На основе трубчатых пружин строят и вакуумметры. Они имеют устройство, аналогичное манометру, но при разрежении трубка скручивается и стрелка будет двигаться справа налево. В промышленности применяют мановакуумметры, которые имеют двухстороннюю шкалу: слева от нуля отсчитывается вакуум, справа – избыточное давление.

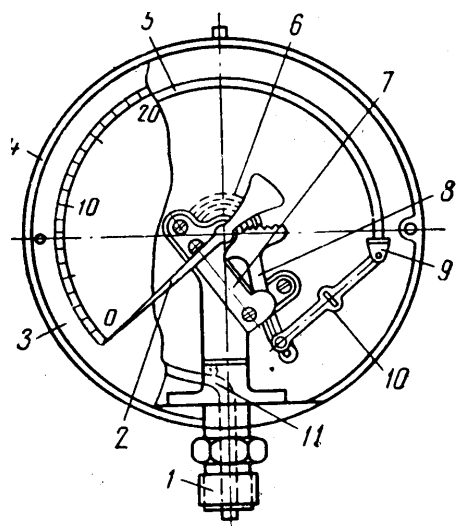


Рис. 2.5. Манометр с одновитковой трубчатой пружиной

На [рис. 2.5](#) показан манометр с одновитковой трубчатой пружиной 5, изогнутой по кругу, которая имеет в сечении форму эллипса или удлинённого овала. Эта пружина одним концом впаяна в держатель 11 и соединена с измеряемой средой, другой конец трубки пружины заглушен пробкой 9 и соединен поводком 10 с зубчатым сектором 8. В корпусе манометра 4 также находится спиральная пружина (волосок) 6 и пластина 7.

Давление подаётся через штуцер 1 внутрь пружины, т.е. прибор измеряет перепад давлений внутри и снаружи трубчатой пружины. Под действием перепада давлений внутри и снаружи трубчатой пружины её поперечное сечение деформируется, в слоях материала пружины возникают растягивающие и сжимающие напряжения, которые

вызывают перемещение её подвижного конца. Распрямление или скручивание пружины происходит до тех пор, пока силы упругости пружины не уравновесят силы, созданные перепадом давлений. При этом поводок 10 поворачивает зубчатый сектор 8, а связанная с ним шестерня поворачивает ось со стрелкой 2, перемещающейся вдоль шкалы 3. Средняя длина трубчатой пружины во время работы остается неизменной.

Манометры с одновитковой трубчатой пружиной применяются для измерения давления от 0,025 до 1000 МПа.

Гармониковые пружины (сильфоны) представляют собой тонкостенные цилиндрические сосуды с кольцевыми складками (гольфами). Измеряемое давление подводится через штуцер. При этом сильфон сжимается или растягивается и перемещает шток, с которым связана стрелка, передвигающаяся относительно шкалы. С помощью сильфона можно измерить разность давлений, если к штуцеру подвести большее, а к внутренней полости сильфона меньшее давление.

Сильфоны рассчитаны на максимальное давление не выше $4 \cdot 10^5$ Па; их изготавливают из латуни, фосфористой и бериллиевой бронзы.

2.2.3. Электрические манометры

Электрические приборы используются главным образом для специальных целей, например, при измерениях сверхвысоких давлений, вакуума или давлений, пульсирующих с высокой частотой. Действие этих приборов основано на преобразовании давления в электрический параметр, функционально связанный с давлением. Находят применение следующие электрические приборы: манометры с тензопреобразователями, пьезоэлектрические манометры, тепловые, электронные (или ионизационные), радиоактивные.

Пьезоэлектрические манометры

В пьезоэлектрических манометрах используется *пьезоэлектрический эффект*: образование на поверхности пластинки из некоторых кристаллов (кварц, турмалин, сегнетовая соль, титанат бария и др.) электрических зарядов при сжатии или растяжении. В большинстве случаев для изготовления пьезоэлектрических датчиков применяют кварц из-за его механической прочности и постоянства пьезоэлектрической константы в интервале температур от 0 до 500 °С.

Для измерения пьезоэлектрических зарядов применяют электрометры или электрометрические усилители (усилители с большим входным сопротивлением) с выходом на обычный измерительный прибор. Пьезоэлектрические манометры с кварцевыми чувствительными элементами имеют верхние пределы измерений 2,5–100 МПа. Классы точности – 1,5; 2,0. Применяются для измерения быстроизменяющихся давлений.

Манометры с тензопреобразователями

Манометры применяют для измерения высоких и сверхвысоких давлений, достигающих 3000 МПа. Принцип действия этих манометров основан на изменении электрического сопротивления проводников (например, манганина) в зависимости от приложенного давления.

Принцип действия *тензометрического преобразователя* состоит в преобразовании усилия или пропорциональной ему деформации в изменение сопротивления проволоки, наклеенной на поверхность тела, которое подвергается деформации. Тензометр представляет собой тонкую проволоку (диаметром 0,01–0,05 мм), наклеенную на изоляционное основание (бумагу или пластмассу). В качестве материала для проволоки используют манганин, никром, константан и др. К концам проволоки припаивают выводы. В таком виде тензометр наклеивают на поверхность детали, подвергающуюся деформации.

К преимуществам тензометров относятся: малая инерционность, линейность характеристики $R = f(P)$, возможность размещения в труднодоступных местах и достаточно малая погрешность, не превышающая $\pm 2\%$. Недостатки – малая чувствительность и зависимость от температуры.

Измерительными приборами служат обычно мостовые схемы, в одно плечо которых включается измерительный тензометр, а в смежное плечо – компенсационный тензометр. Компенсационный тензометр не подвергается деформации и служит для компенсации температурных влияний окружающей среды.

Кроме проволочных получили распространение полупроводниковые тензорезисторы, изготавливаемые из кремния и германия. Сопротивление полупроводниковых тензорезисторов составляет от $5 \cdot 10^{-2}$ до 10 кОм.

2.3. Измерение расхода, количества жидкостей и газов

Расход вещества – это количество вещества, проходящее в единицу времени через сечение трубопровода, канала и т.п.

Количество вещества – это суммарный объем или масса вещества, хранящаяся в каких-либо емкостях или выданная потребителю за любой произвольный интервал времени.

Расход вещества выражают в объемных единицах измерения (л/ч, м³/с, м³/ч) или массовых (кг/с, кг/ч, т/ч). Количество вещества можно измерять в единицах объема (л, м³) или единицах массы (кг, т).

Приборы, измеряющие расход, называют *расходомерами*. Количество вещества измеряется при помощи *счетчиков* и *весов*.

Измерительные приборы в соответствии с применяемыми методами измерений подразделяют на следующие группы: расходомеры переменного перепада давления, расходомеры постоянного перепада давления, вихревые,

расходомеры электромагнитные, ультразвуковые, калориметрические и др. К устройствам для измерения расхода относятся также дозирующие устройства.

2.3.1. Расходомеры переменного перепада давления

Принцип действия расходомеров этого типа заключается в том, что в трубопроводе устанавливают устройство для сужения потока и измеряют перепад давления до и после сужающего устройства, величина которого функционально связана с расходом. Ввиду большой точности и удобства эти расходомеры получили наибольшее распространение.

Сужение сечения трубопровода производят диафрагмами, соплами или соплом Вентури (рис. 2.6), а перепад давления замеряют дифференциальными манометрами различных конструкций.

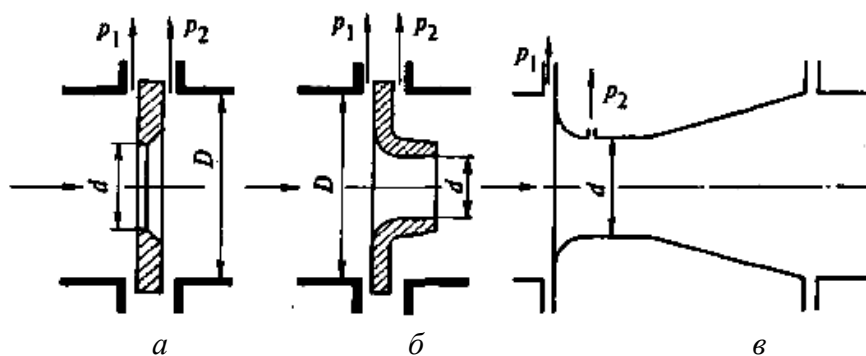


Рис. 2.6. Стандартные сужающие устройства:
а – диафрагма; б – сопло; в – сопло Вентури

Скорость потока в суженном сечении повышается, поэтому статическое давление в данном сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Сужающее устройство имеет круглое отверстие, расположенное концентрично относительно стенок трубы, диаметр которого меньше внутреннего диаметра трубопровода.

Разность (перепад) давлений до и после сужающего устройства прямо пропорциональна расходу вещества, поэтому может служить мерой расхода. Вывод основных зависимостей между расходом несжимаемых жидкостей и перепадом давлений выполняют, используя закон сохранения энергии Бернулли и уравнение неразрывности струй.

Объемный Q и массовый расход Q_m рассчитывают по следующим уравнениям:

$$Q = 0,01252 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}, \quad (2.3)$$

$$Q_m = 0,01252 \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p / \rho}, \quad (2.4)$$

где a – коэффициент расхода, безразмерная величина, определяемая экспериментально, показывает, во сколько раз действительный расход отличается

от теоретического; ε – поправочный множитель, учитывающий изменение плотности среды; d – диаметр сужающего отверстия, м; Δp – перепад давления, создаваемый сужающим устройством, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Уравнения (2.3) и (2.4) показывают, что расход связан с перепадом давления квадратичной зависимостью.

Нормализованные сужающие устройства могут применяться в трубопроводах диаметром не менее 50 мм при значениях модуля m , равного квадрату отношений площадей проходных сечений сужающего устройства d и трубопровода D :

$$m = \frac{d^2}{D^2}.$$

Для диафрагм $m = 0,5–0,7$, для сопл $m = 0,05–0,65$, для сопл Вентури $m = 0,05–0,6$.

Расчет сужающего устройства сводится к определению диаметра отверстия по заданному максимальному и среднему измеряемому расходу среды.

2.3.2. Расходомеры постоянного перепада давления

Принцип действия расходомеров обтекания основан на восприятии динамического напора контролируемой среды чувствительным элементом (поплавок, поршень), помещенным в поток (рис. 2.7). При этом чувствительный элемент перемещается, и величина перемещения служит мерой расхода. В момент равновесия чувствительного элемента разность давлений, действующих на него с обеих сторон, с некоторым приближением считается постоянной, поэтому устройство называют *расходомером постоянного перепада*.

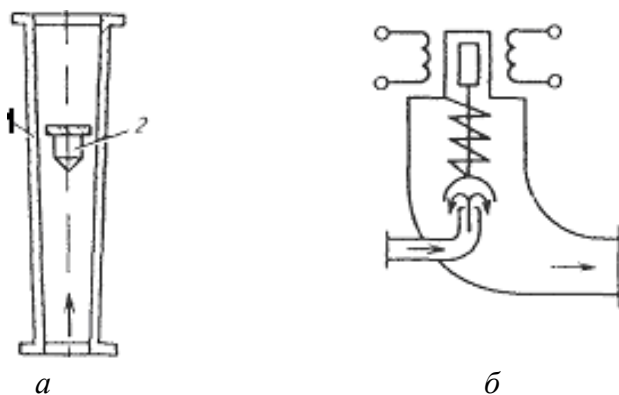


Рис 2.7. Схемы расходомеров обтекания

В качестве тел обтекания применяют: поплавки, поршни, поворотную заслонку, поворотный диск, гидродинамическую трубку. На рис. 2.7, а показана схема расходомера обтекания – *ротаметра*. Он выполнен в виде вертикальной конусной трубы 1, расширяющейся кверху, внутри которой помещен

поплавок 2, свободно плавающий в потоке измеряемого вещества.

Поплавок имеет форму цилиндра, нижняя часть которого коническая, а на верхней части сделан бортик с вырезанными косыми канавками, вызывающими непрерывное вращение поплавка. Вращение поплавка необходимо для его центрирования, предохранения от соприкосновения с трубой, сигнализации засоренности трубки. Часто центровку поплавка производят при помощи направляющих. В зависимости от пределов измерения и контролируемой среды поплавки изготавливают из эбонита, нержавеющей стали, стекла, дюралюминия.

Ротаметр работает следующим образом. Поток контролируемого вещества поступает в трубку снизу и увлекает за собой поплавок, перемещая его вверх. Это приводит к увеличению зазора между поплавком и стенкой конической трубы, в результате чего скорость жидкости уменьшается и возрастает давление над поплавком. Равновесие поплавок наступает только при постоянном перепаде давления.

Объемный расход вещества можно подсчитать по формуле

$$Q = C \cdot (S_k - S_n) \sqrt{\Delta p / \rho},$$

где C – коэффициент, зависящий от размеров и конструкции ротаметра; S_k – площадь сечения конической трубки в положении равновесия поплавка (его верхней торцевой поверхности); S_n – площадь верхней торцевой поверхности поплавка; Δp – перепад давления; ρ – плотность измеряемой среды.

Показания прибора отсчитываются по вертикальной шкале ротаметра, а затем при помощи таблицы или графика определяется значение расхода.

Конструкции ротаметров отличаются большим разнообразием. Труба выполняется из стекла или металла. Ротаметры со стеклянной трубой выполняются для измерения расходов, при которых давление контролируемой среды не превышает $5,9 \cdot 10^5$ Па, а температура – 100°C . Ротаметры с металлической трубой применяют при более высоком давлении (до $6,3 \cdot 10^6$ Па). Основная погрешность ротаметров $\pm 2,5\%$.

К расходомерам обтекания можно отнести расходомеры с преобразователями «лобового сопротивления». Они представляют собой трубу, в которой располагается измерительный преобразователь усилий и перемещений, на него воздействует струя контролируемой среды ([рис. 2.7, б](#)). Усилие, с которым действует струя на измерительный преобразователь, пропорционально расходу.

2.3.3. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия *электромагнитных расходомеров* основан на измерении ЭДС, индуктируемой в потоке электропроводящей жидкости под действием внешнего магнитного поля. Электромагнитные расходомеры применяют для измерения расхода жидкостей, электропроводность которых составляет не менее $1 \cdot 10^{-4}$ См/м. Преобразователи электромагнитных расходомеров могут быть как с внешним магнитом, так и с внутренним ([рис. 2.8](#)).

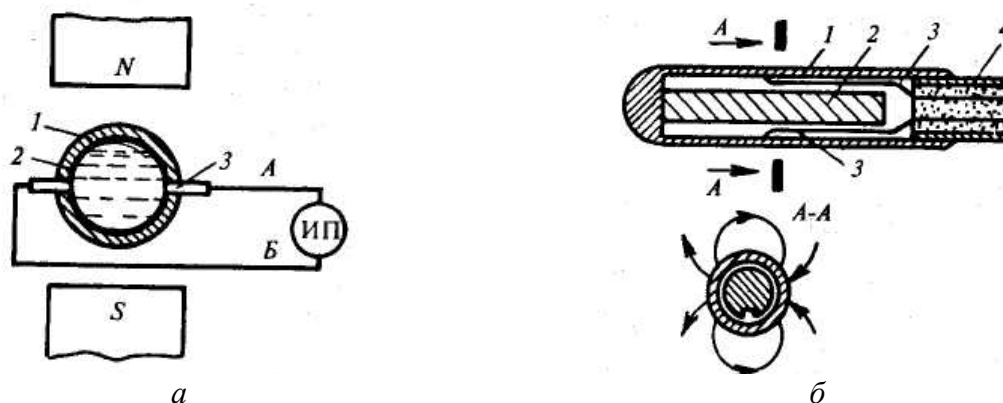


Рис. 2.8. Схемы преобразователей электромагнитных расходомеров: *а* – с внешним магнитом: 1 – преобразователь; 2 – электрическая изоляция; 3 – электроды; ИП – измерительный прибор; *б* – с внутренним магнитом: 1 – обтекаемый корпус; 2 – магнит; 3 – электроды; 4 – кабель

Трубопровод из немагнитного материала (фторопласта, эбонита и т.д.) помещен между полюсами магнита. Под действием магнитного поля ионы, находящиеся в трубопроводе жидкости, перемещаются между электродами, создавая в них ЭДС, пропорциональную скорости течения жидкости. К электродам подключен измерительный прибор, шкала которого отградуирована в единицах расхода [6].

Величина ЭДС в случае постоянного магнитного поля определяется основным уравнением электромагнитной индукции:

$$E = BdV_{\text{ср}},$$

где B – магнитная индукция в зазоре между полюсами; d – внутренний диаметр трубопровода; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока жидкости. Выражая скорость через объемный расход Q , получаем

$$E = \frac{4B}{\pi d} Q. \quad (2.5)$$

Из формулы (2.5) следует, что величина ЭДС прямо пропорциональна объемному расходу.

Недостатком электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем является возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации, которые затрудняют правильное измерение ЭДС, индуцируемой магнитным полем в движущейся жидкости.

Более широкое применение получили электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем, в которых электрохимические процессы оказывают меньшее влияние.

Достоинство электромагнитных расходомеров заключается в том, что они не препятствуют протеканию жидкости, поэтому могут применяться для измерения расхода загрязненных, химически активных жидкостей с твердыми включениями.

Выпускаются электромагнитные расходомеры нескольких типоразме-

ров с диаметром трубы от 10 до 1000 мм и пределами измерения расхода от 0,32 до 5000 м³/ч. Основная погрешность расходомеров составляет ± 1 и $\pm 1,5$ %.

2.3.4. Калориметрические (тепловые) расходомеры

Принцип действия *калориметрических расходомеров* основан на измерении тепловой энергии, переносимой потоком жидкости или газа от нагревателя к измерителю, пропорциональной скорости потока (рис. 2.9). Применяют эти расходомеры преимущественно для измерения расхода газа. В корпус калориметрического расходомера вмонтированы два термометра сопротивления 1 и 2 и нагреватель 3.

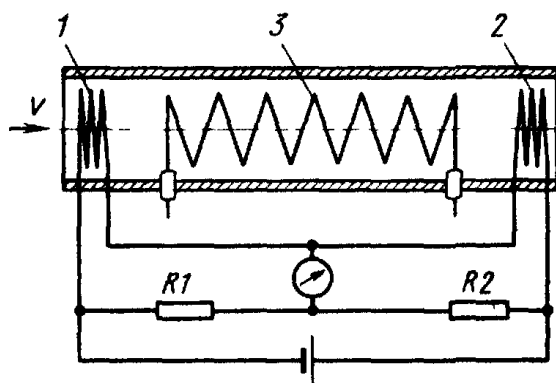


Рис. 2.9. Принципиальная схема калориметрического расходомера

Термометры сопротивления включают в плечи мостовой измерительной схемы, два других плеча которой составляют резисторы постоянного сопротивления R_1 и R_2 . При постоянной мощности нагревателя (если пренебречь теплотой, отдаваемой потоком в окружающую среду) уравнение теплового баланса имеет вид

$$q_t = k \cdot Q_m \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (2.6)$$

где q_t – количество теплоты, отдаваемой нагревателем газу; k – поправочный коэффициент на неравномерность распределения температуры по сечению трубы; Q_m – массовый расход газа; C_p – удельная теплоемкость газа при температуре $t = (t_1 + t_2)/2$; Δt – разность температур нагреваемой среды до и после нагревателя.

Из равенства (2.6) следует, что

$$Q_m = q_t / k \cdot C_p \cdot \Delta t.$$

Достоинствами калориметрических расходомеров являются: высокая точность (погрешность $\pm 0,5$ – 1 %); большой диапазон измерений; возможность измерения очень малых расходов (даже в трубках с внутренним диаметром 2–3 мм), а также расходов пульсирующих потоков.

2.3.5. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия *ультразвуковых расходомеров* основан на явлении смещения звукового колебания движущейся жидкой средой. Фактическая скорость распространения ультразвука в движущейся среде равна геометрической сумме средней скорости движения среды и собственной скорости звука в этой среде.

Для измерения расхода используют два метода: метод, основанный на измерении разности фазовых сдвигов двух ультразвуковых колебаний, направленных по потоку и против него, и метод, основанный на измерении разности частот повторения коротких импульсов ультразвуковых колебаний, направленных по потоку и против него. Приборы, основанные на первом методе, называют *фазовыми расходомерами*, а на втором – *частотными расходомерами*.

Разность частот в направлении потока и против него пропорциональна скорости движения жидкости. Разность частот не зависит от скорости распространения ультразвука в среде, т.е. не зависит от плотности и температуры среды. Это преимущество частотного метода.

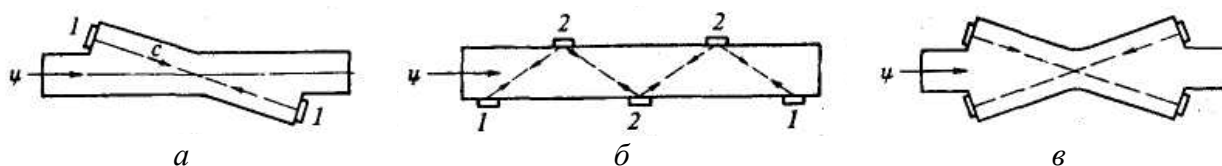


Рис. 2.10. Схемы ультразвуковых преобразователей расходомеров:
а – одноканального; б – с отражателями; в – двухканального

Расходомеры по конструктивному исполнению подразделяются на одно- и двухканальные (рис. 2.10). В одноканальной схеме (рис. 2.10, а) каждый пьезоэлемент работает попеременно в режиме излучателя и приемника, что обеспечивается системой переключателей. Для увеличения чувствительности ход луча в среде может быть увеличен применением рефлекторов (рис. 2.10, б). В двухканальной схеме (рис. 2.10, в) каждый пьезоэлемент работает только в одном режиме – излучателя или приемника. Двухканальные схемы проще одноканальных (нет сложных схем переключения), но точность их меньше вследствие возможной акустической асимметрии обоих каналов.

Все ультразвуковые расходомеры являются микропроцессорными, они имеют цифровой дисплей, цепь сигнализации, многие приборы могут измерять расход реверсивного потока.

Диапазон измерения расхода ультразвуковыми расходомерами теоретически неограничен. Их погрешность составляет $\pm 2\%$.

Недостатками ультразвуковых расходомеров являются ограничение их применения для контроля сред, имеющих твердые и газовые включения, ко-

торые отражают ультразвуковые колебания; сложность и высокая стоимость приборов; ограничения по минимальной скорости потока.

2.3.6. Счетчики количества вещества

Различают объемный и скоростной методы измерения количества вещества.

Сущность *объемного метода* заключается в суммировании отмеренных объемов жидкости в единицу времени. *Объемные (камерные) расходомеры* преимущественно применяют для измерения расхода вязких жидкостей (жирные кислоты, мазуты, масла и другие нефтепродукты). Измеряющим органом прибора является калиброванная камера, устанавливаемая в сечение трубопровода. Прибор отсчитывает количества объемов жидкости, вытесненных из измерительной камеры прибора под действием разности давлений среды до и после камеры. На этом принципе устроены мазутомеры, бензомеры.

Скоростной метод основан на измерении скорости протекания жидкости по трубопроводу, поскольку скорость эквивалентна расходу. Скоростные расходомеры служат для измерения расхода воды, масел и называются по этому *водо- и масломерами*. Скоростной расходомер врезают в технологический трубопровод, по которому протекает измеряемая среда. В результате измерительный орган такого расходомера (крыльчатка, турбинка, шарик) оказывается в потоке жидкости. Прибор отсчитывает число оборотов измерительного органа в единицу времени.

При диаметрах трубопроводов от 15 до 40 мм применяются крыльчатые расходомеры, а от 50 до 250 мм – турбинные. На [рис. 2.11](#) схематично показано устройство турбинного преобразователя расхода жидкости. Корпус преобразователя *1* представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса установлены струевыпрямители *2* и *3*, соединенные осью, на которой расположена турбинка *4*. В расходомерах частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу, с помощью тахометрического преобразователя *5* преобразуется в частоту импульсов выходного сигнала.

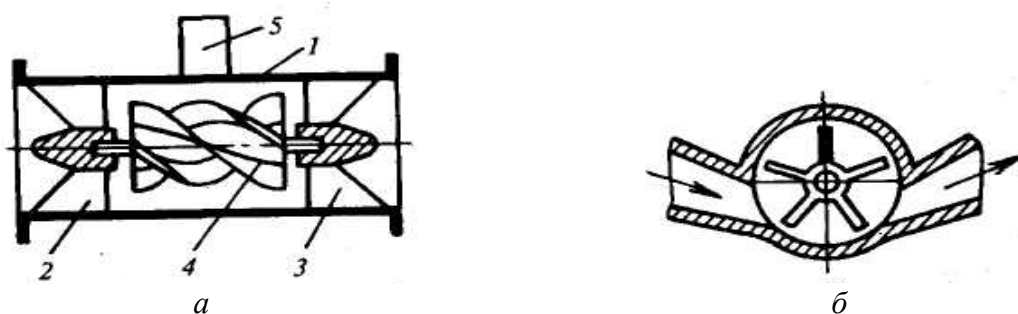


Рис. 2.11. Устройство турбинных преобразователей расхода: *а* – четырехлопастная турбина; *б* – турбина одноструйных водосчетчиков

Турбинки подразделяются на *аксиальные* и *тангенциальные*. У первых – ось совпадает с направлением потока, у вторых – она перпендикулярна потоку [6].

2.3.7. Измерение расхода сыпучих материалов

Различают расходомеры для измерения сыпучих материалов *порционные* (объемные) и *непрерывного действия*.

Автоматические весоизмерители расхода сыпучих материалов регистрируют мгновенный расход твердого вещества и используются (кроме контроля) для автоматической стабилизации расходов отдельных потоков.

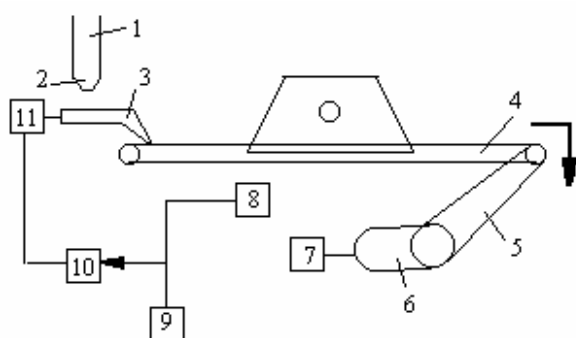


Рис. 2.12. Схема автоматического контроля и стабилизации расхода

Из порционных расходомеров наиболее часто в промышленности используются весоизмерители *ковшового типа*. Среди расходомеров непрерывного действия наиболее распространены *ленточные весоизмерители*, в которых материал непрерывно взвешивается на движущемся ленточном транспортере (рис. 2.12).

Материал из бункера 1 через насадку 2 поступает на вибрлоток 3, вибрирующий с определенной частотой и изменяемой амплитудой. Под действием вибрации материал поступает на ленточный весоизмеритель 4, транспортерная лента которого приводится в движение с помощью электродвигателя 7, редуктора 6 и цепной передачи 5. Лента весоизмерителя вместе с материалом взвешивается тензодатчиком 8, сигнал которого идет на вторичный регистрирующий и показывающий прибор 9 и на регулятор 10. При отклонении этого сигнала от заданного значения регулятор вырабатывает управляющий сигнал, поступающий на катушку 11 вибрлотка. В результате чего изменяется амплитуда (но не частота) колебаний вибрлотка и, соответственно, количество материала, сбегаящего с вибрлотка на весоизмеритель. Таким образом, достигается автоматическое измерение и стабилизация расхода сыпучего материала.

2.4. Измерение уровня

Уровнем называют высоту заполнения технологического аппарата рабочей средой – жидкостью или сыпучим материалом.

Технические средства для измерения уровня называются *уровнемерами*. Приборы, предназначенные для сигнализации предельных значений уровня рабочей среды, называются *сигнализаторами уровня*.

2.4.1. Приборы для измерения уровня жидкостей

В производственной практике для измерения уровня применяются указательные стекла, поплавковые, буйковые, гидростатические, электрические, ультразвуковые и радиоизотопные уровнемеры.

Указательные стекла

Принцип действия *указательных стекол* основан на законе сообщающихся сосудов (рис. 2.13).

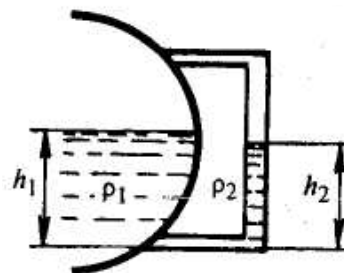


Рис. 2.13. Схема уровнемера с визуальным отсчетом

Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разрежением). По положению уровня жидкости в указательном стекле судят об изменении уровня в объекте измерения.

Из-за низкой механической прочности указательные стекла обычно выполняют длиной не более 0,5 м.

Поплавковые уровнемеры

В *поплавковом уровнемере* перемещение поплавка на поверхности жидкости передается на показывающее устройство или преобразователь для преобразования перемещения или силы в выходной сигнал ([рис. 2.14](#)).

Получили распространение поплавковые уровнемеры узкого и широкого диапазонов измерений. В поплавковых уровнемерах узкого диапазона ([рис. 2.14, а, б](#)) в качестве чувствительного элемента используется шарообразный поплавок диаметром 80–200 мм, выполненный из нержавеющей стали. Поплавок плавает на поверхности жидкости и через штангу и специальное сальниковое уплотнение соединяется либо со стрелкой, либо с преобразователем I угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигналы. Уровнемеры узкого диапазона выпускаются двух

типов: *фланцевые* (рис. 2.14, а) и *камерные* (рис. 2.14, б), отличающиеся способом их установки на технологических объектах. Минимальный диапазон измерений этих уровнемеров составляет ± 10 мм, максимальный – достигает ± 200 мм.

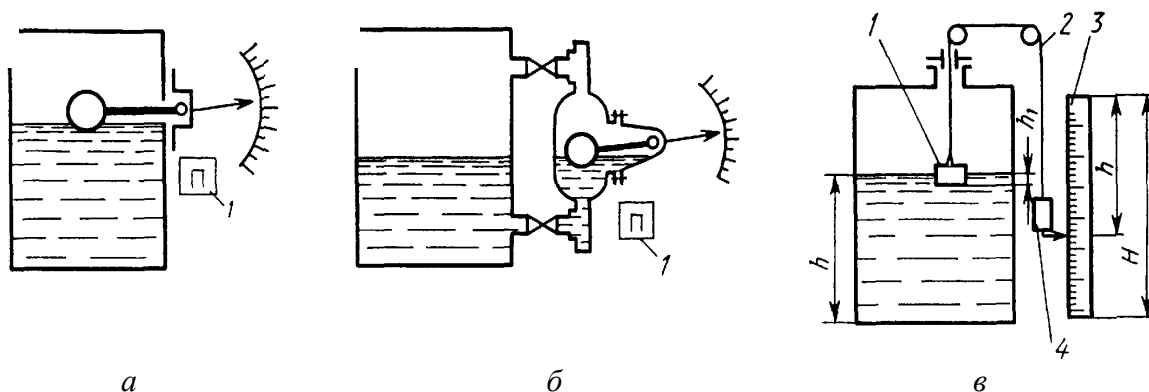


Рис. 2.14. Схемы поплавковых уровнемеров

Поплавковые уровнемеры широкого диапазона (рис. 2.14, в) представляют собой поплавок 1, связанный с противовесом 4 гибким тросом 2. В нижней части противовеса укреплен стрелка, указывающая по шкале 3 значения уровня жидкости в объекте.

Недостатками уровнемера являются перевернутая шкала (с нулем у верхнего края емкости), погрешность из-за изменения силы, натягивающей трос (при подъеме уровня к силе тяжести противовеса добавляется сила тяжести троса).

Гидростатические уровнемеры

В основу принципа действия *гидростатических уровнемеров* положена зависимость гидростатического давления P , создаваемого столбом жидкости h постоянной плотности ρ :

$$P = \rho gh.$$

На [рис. 2.15](#) приведена схема измерения уровня манометром 1, который непосредственно воспринимает гидростатическое давление столба жидкости h .

Измерение гидростатического давления манометрами целесообразно в резервуарах, работающих при атмосферном давлении. В противном случае показания манометра складываются из гидростатического и избыточного давлений.

Для измерения уровня жидкости в резервуарах, находящихся под давлением, широкое применение получили дифференциальные манометры. С помощью дифференциальных манометров возможно измерение уровня жидкости и в открытых резервуарах.

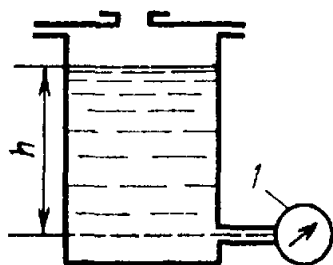


Рис. 2.15. Схема измерения уровня гидростатическим уровнемером

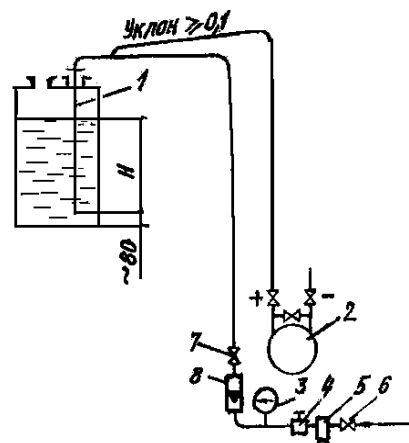


Рис. 2.16. Схема пьезометрического уровнемера

Уровнемеры, в которых измерение гидростатического давления осуществляется путем измерения давления воздуха или газа, продуваемого по трубке, погруженной на фиксированную глубину в жидкость, заполняющую резервуар, называют *пьезометрическими* ([рис. 2.16](#)).

Пьезометрическая трубка 1 опущена в резервуар до глубины, относительно которой измеряют уровень h жидкости. К верхнему концу трубки присоединяют дифманометр 2. Сжатый воздух подается в трубку через запорный вентиль 6, фильтр 5, редуктор давления 4 и ротаметр 8 с игольчатым вентилем 7. Расход воздуха устанавливается с помощью ротаметра 8 так, чтобы при максимальной глубине погружения трубки он был равен 0,6–2 л/мин. Давление воздуха контролируется манометром 3.

Пьезометрические уровнемеры могут также использоваться для измерения уровня агрессивных жидкостей. Их недостатком является зависимость результатов измерений от плотности жидкости, уровень которой измеряется, а следовательно, и от ее температуры [\[7\]](#).

Электрические уровнемеры

В *электрических уровнемерах* положение уровня жидкости преобразуется в какой-либо электрический сигнал. Из электрических уровнемеров наибольшее распространение получили емкостные и кондуктометрические (омические) уровнемеры.

В *емкостных уровнемерах* используется зависимость электрической емкости преобразователя от уровня жидкости ([рис. 2.17](#)). Преобразователи емкостных уровнемеров выполняют цилиндрического и пластинчатого типов, а также в виде жесткого стержня.

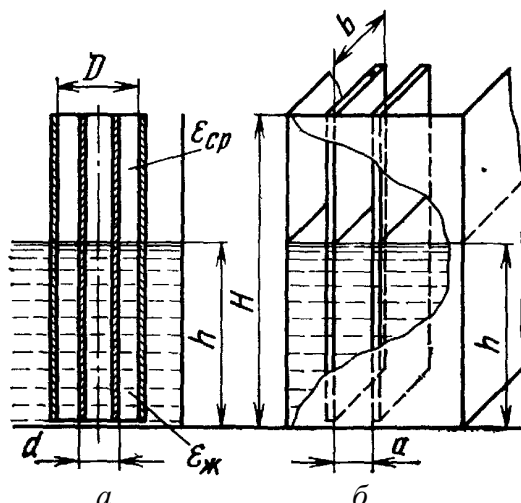


Рис. 2.17. Схемы емкостных преобразователей (датчиков) уровнемеров

Цилиндрический емкостной преобразователь (рис. 2.17, а) выполнен из двух или нескольких коаксиально расположенных труб, а пластинчатый (рис. 2.17, б) – из двух или нескольких параллельных пластин, между которыми находится контролируемая жидкость.

Емкость преобразователя равна сумме емкостей двух участков – погруженного в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$ и находящегося в окружающей среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{сп}$ (для воздуха $\epsilon_{сп} = 1$).

Электрическую емкость преобразователей измеряют обычно с применением резонансных или мостовых схем.

Емкостные уровнемеры выпускаются следующих классов точности: 0,5; 1,0; 2,5. Их минимальный диапазон измерений составляет 0–0,4 м, максимальный – 0–20 м.

Этот метод используется в большей части *емкостных сигнализаторов уровня*.

Кондуктометрические уровнемеры используют главным образом для сигнализации и поддержания в заданных пределах уровня электропроводящих жидкостей.

Принцип действия таких уровнемеров основан на изменении сопротивления между электродами, помещенными в контролируемую жидкость. При этом в зависимости от уровня жидкости изменяется сопротивление между электродами и корпусом резервуара или между двумя электродами.

Практически кондуктометрические уровнемеры могут применяться для сред с проводимостью от $2 \cdot 10^{-3}$ См/см и более. В состав приборов входят электромагнитные реле, включаемые в цепь между электродами и контролируемым материалом. В качестве электродов применяют стальные стержни или трубы и угольные электроды (для агрессивных жидкостей).

Основной недостаток всех электродных приборов – невозможность их применения в вязких, кристаллизующихся, образующих твердые осадки и налипающих на электроды средах.

Радиоизотопные уровнемеры

Радиоизотопные уровнемеры предназначены для бесконтактного дистанционного измерения уровней жидкостей и сыпучих материалов. Измерение уровня такими уровнемерами основано на поглощении γ -лучей при прохождении их через слой вещества.

В качестве источников γ -излучения в радиоизотопных уровнемерах наиболее часто применяют изотопы ^{60}Co и ^{137}Cs .

Выпускаемые радиоизотопные уровнемеры со следящей системой позволяют измерять уровень жидких сред (в том числе металлов) до 10 м с погрешностью, не превышающей ± 10 мм. Источник γ -лучей устанавливается с одной стороны емкости, а счетчик – с противоположной. Излучение от источника γ -лучей, проходя через стенки емкости и расплавленный металл или другое измеряемое вещество, попадает на счетчик. При понижении уровня измеряемого вещества поглощение уменьшается и интенсивность γ -излучения, прошедшего через емкость, возрастает.

Ультразвуковые и радиолокационные уровнемеры

Ультразвуковые и радиолокационные уровнемеры позволяют измерять уровень без непосредственного контакта с контролируемой средой и в труднодоступных местах.

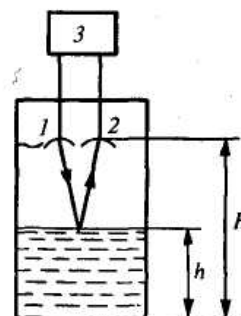


Рис. 2.18. Схема радиолокационного уровнемера

Радиолокационный уровнемер (рис. 2.18) состоит из излучателя 1, приемника электромагнитной энергии 2 и преобразователя измерения интервала времени 3. В ультразвуковых уровнемерах используется принцип отражения ультразвуковых колебаний со стороны жидкости, а в радиолокационные – со стороны газовой среды [6].

2.4.2. Приборы для измерения уровня сыпучих материалов

Для измерения уровня сыпучих материалов применяют поплавковые, мембранные, весовые, электрические, ультразвуковые и радиоизотопные уровнемеры.

Имеется ряд обстоятельств, усложняющих задачу измерения уровня сыпучих материалов по сравнению с измерением уровня жидкостей. Прежде всего, это неоднородность вещества в объеме, связанная с наличием пространства между твердыми частицами. Следующая трудность измерения уровня обусловлена ограниченной подвижностью частиц из-за действия сил

трения и сцепления между частицами, результатом чего является отсутствие горизонтальной плоскости раздела газ – материал. Поверхность сыпучего материала расположена к горизонтали под углом естественного откоса, причем этот угол при заполнении или опорожнении емкости может быть различным. Ограниченная подвижность частиц приводит к сводообразованию, нарушающему нормальную работу измерительных устройств.

Отрицательными качествами сыпучих материалов является способность к налипанию и абразивное воздействие. Усложнить работу уровнемеров может также запыленность газового пространства, что влияет на электрические свойства среды, а также предъявляет повышенные требования к обеспечению взрывобезопасности.

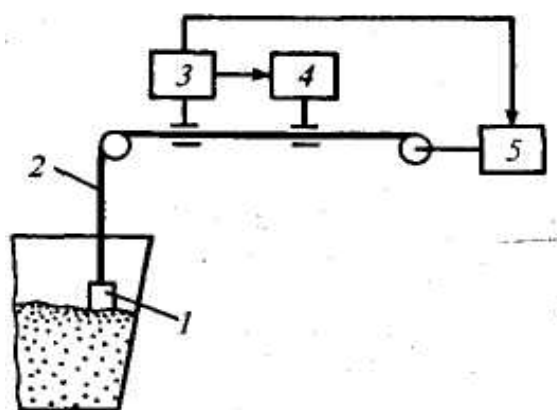


Рис. 2.19. Схема лотового уровнемера сыпучих материалов

Специфическим уровнемером для сыпучих материалов является *лотовый* (рис. 2.19). Чувствительный элемент таких уровнемеров представляет массивное тело – лот 1, подвешенное на гибком тросе 2. В начале цикла измерений лот зафиксирован в предельном верхнем положении. Цикл измерения уровня начинается с момента растормаживания лота, при этом под действием собственного веса он начинает опускаться. В этот же момент сигнальным устройством 3, реагирующим на натяжение троса, включается отсчетное устройство 4, регистрирующее смещение лота относительно первоначального предельного положения. В момент касания лотом поверхности натяжение троса уменьшается, и сигнальное устройство отключает отсчетное устройство, одновременно включая механизм подъема лота 5, возвращающий лот в исходное положение, после чего цикл измерения повторяется. Показания отсчетного устройства позволяют определить текущее значение уровня. Перед началом следующего цикла измерения показания отсчетного устройства должны быть сброшены. По такой схеме работает уровнемер сыпучих тел УСТ-2 (пределы измерения 0–25 м, погрешность $\pm 2,5\%$).

2.5. Измерение химического состава газов и жидкостей

На металлургических предприятиях контролируют газы различных видов: горючие газы, продукты сгорания, защитные атмосферы, газы технологических процессов, вредные и взрывоопасные примеси в воздухе промышленных помещений и др. Контроль состава газов в ряде случаев позволяет судить о правильности проведения технологического процесса. Например, по составу колошниковых газов в доменной печи ведут процесс плавки; по составу продуктов сгорания определяют полноту сгорания топлива в печах; по составу защитных газов, в атмосфере которых происходит нагрев металла в печи под термообработку, определяют качество продукции и т.д.

Характер протекания металлургических процессов в большой мере зависит также и от состава растворов и жидкой фазы пульпы. Селективное и достаточно полное извлечение ценных компонентов возможно при оптимальном значении рН среды и концентрации различных реагентов в растворах и пульпах.

2.5.1. Измерение состава газов

Для автоматического анализа состава газов в металлургическом производстве применяются тепловые, термомагнитные, абсорбционно-спектральные, хроматографические, масс-спектрометрические и другие газоанализаторы.

Абсорбционный метод спектрального анализа газов основан на свойстве веществ избирательно поглощать часть проходящего через них электромагнитного излучения. Спектры поглощения различных веществ (газов, жидкостей, твердых тел) охватывают все диапазоны электромагнитного излучения (от γ -лучей до радиоволн). Для газового анализа используют ультрафиолетовый ($\lambda = 0,2\text{--}0,4$ мкм) и инфракрасный ($\lambda = 2\text{--}10$ мкм) диапазоны электромагнитного спектра.

Пневматические газоанализаторы основаны на использовании таких газодинамических процессов, как дросселирование потоков, взаимодействие струй, вихреобразование, преобразование ламинарного течения в турбулентное и некоторых других. Применяются они в условиях, где использование электрических методов затруднено или недопустимо.

Хроматографический метод – это физический метод разделения многокомпонентных смесей, при котором компоненты смеси в процессе разделения распределяются между двумя фазами, одной из которых является неподвижный слой с большой поверхностью, а другой – поток, фильтрующийся через неподвижный слой. Сущность хроматографического разделения газовых смесей заключается в различии сорбируемости компонентов при движении смесей через слой сорбента.

Принцип действия *масс-спектрометрических газоанализаторов* основан на разделении газовой смеси по массам составляющих ее компонентов. Масс-спектрометры позволяют осуществлять полный анализ многокомпонентных газовых смесей [8].

Термохимические газоанализаторы

Термохимические газоанализаторы относятся к группе тепловых газоанализаторов. Принцип действия *термохимических газоанализаторов* основан на измерении теплового эффекта химических реакций анализируемых компонентов в присутствии катализаторов.

На [рис. 2.20](#) приведена схема термохимического газоанализатора, в работе которого используется тепловой эффект реакции окисления горючих газов на каталитически активной поверхности.

В газоанализаторе применяется насыпной катализатор. Его температура, изменяющаяся при сгорании на нем определяемого компонента, измеряется платиновым терморезистором. Анализируемый газ с постоянным объемным расходом поступает через теплообменник 6 в сравнительную камеру 7, а затем в измерительную камеру 1. Эти камеры выполнены в корпусе 5 из нержавеющей стали, температура которого автоматически стабилизируется на значении $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$ с помощью электронагревателя 4. Камера 7 заполнена неактивной массой 9, а камера 1 – катализатором 3 (платина, нанесенная на оксид алюминия). Терморезисторы 8 и 2, размещенные, соответственно, в неактивной массе и в катализаторе, включены в неравновесный мост 10, сигнал которого измеряется автоматическим потенциометром 11.

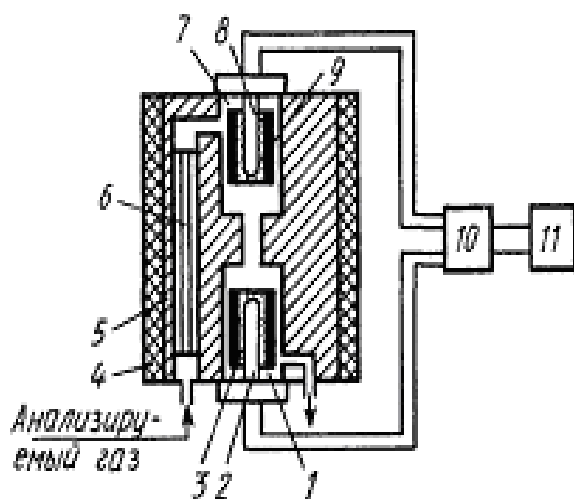


Рис. 2.20. Схема термохимического газоанализатора

В качестве катализатора используют гапколит ($60\% \text{MnO}_2 + 40\% \text{CuO}$) и платину, нанесенную на поверхность пористого носителя. Анализируемый газ не должен содержать пыли, влаги, масла, агрессивных газов и паров (Cl_2 , H_2S , паров щелочей).

Термохимические газоанализаторы применяются для измерения содержания CO , CH_4 , O_2 , H_2 и смесей ($\text{CO} + \text{H}_2$). Основная погрешность измерений составляет 2–5 %.

Термомагнитные газоанализаторы

Термомагнитные газоанализаторы применяются для определения содержания кислорода в анализируемой газовой смеси. Действие газоанализаторов основано на использовании парамагнитных свойств кислорода. Магнитные свойства веществ проявляются в способности намагничиваться под действием внешнего магнитного поля.

Из всех газов наибольшей магнитной восприимчивостью обладает кислород, у которого она на 2–3 порядка больше по сравнению с другими газами (единственный газ, имеющий повышенную магнитную восприимчивость, – окись азота (NO и NO_2), но он в большинстве промышленных газовых смесей практически отсутствует).

Удельная магнитная восприимчивость газа зависит от давления и температуры:

$$\chi = \frac{CM}{R} \cdot \frac{P}{T^2},$$

где C – константа Кюри; M – молекулярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; P – давление; T – абсолютная температура.

В термомагнитных газоанализаторах измеряется не сама магнитная восприимчивость, соответствующая процентному содержанию кислорода, а величина ее уменьшения при повышении температуры газа. С увеличением температуры до 200 °С магнитная восприимчивость кислорода уменьшается практически до нуля.

В основе термомагнитного метода лежит явление *термомагнитной конвекции*, сущность которого заключается в следующем. Если нагретый электрическим током проводник поместить в неоднородное магнитное поле, то вследствие уменьшения магнитной восприимчивости кислорода, обусловленного нагреванием газовой смеси вблизи проводника, создается движение газовой смеси в направлении от большей напряженности магнитного поля к меньшей.

Повышение температуры приводит к возникновению вынужденного потока газовой смеси, в котором нагретая газовая смесь непрерывно вытесняется холодной смесью. Создающийся поток называют *потокотермомагнитной конвекции*.

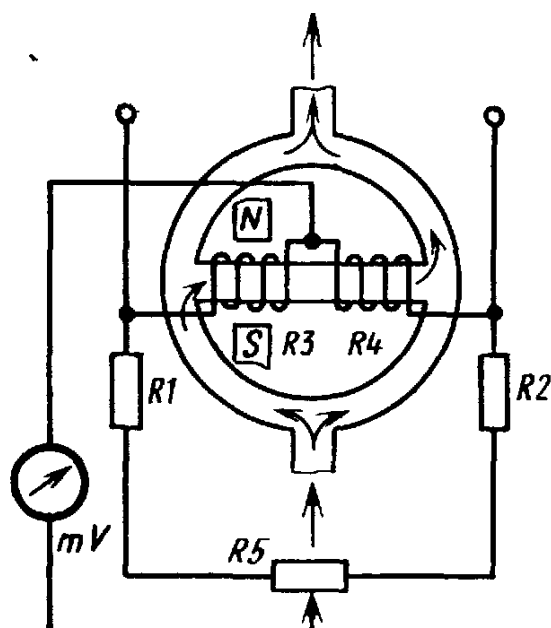


Рис. 2.21. Принципиальная схема термомагнитного газоанализатора

В термомагнитном газоанализаторе (рис. 2.21) датчик выполнен в виде кольцевой камеры с горизонтальной поперечной перемычкой из стеклянной трубки. На стеклянной перемычке расположены две нагревательные обмотки ($R3$ и $R4$) из тонкой платиновой проволоки, включенные в смежные плечи неуравновешенного моста и являющиеся измерительными элементами. Двумя другими плечами мостовой схемы являются резисторы $R1$ и $R2$, выполненные из манганина. Одна из нагревательных обмоток ($R3$) расположена между полюсами постоянного магнита.

При наличии в газовой смеси кислорода часть потока втягивается в перемычку, где образуется поток газа в направлении слева на право (от большей напряженности магнитного поля к меньшей).

Образующийся конвекционный поток газа переносит теплоту от обмотки $R3$ к $R4$, вследствие чего изменяются температуры обмоток ($R3$ охлаждается, $R4$ нагревается) и их сопротивление, что приводит к нарушению условия равновесия мостовой схемы. Напряжение разбаланса мостовой схемы измеряется вторичным прибором, шкала которого отградуирована в единицах концентрации кислорода.

В качестве вторичного прибора используют милливольтметр или автоматический потенциометр.

Термомагнитные газоанализаторы в металлургии используют для определения содержания кислорода в отходящих из печей продуктах сгорания, для контроля качества кислорода, получаемого на кислородных станциях, для контроля обогащенного кислородом воздушного дутья в металлургических процессах.

2.5.2. Измерение ионного состава растворов и жидкой фазы пульп

В настоящее время для контроля состава растворов и жидкой фазы пульпы наибольшее распространение получили потенциометрический, кондуктометрический и спектрофотометрический методы.

Потенциометрический метод измерения концентрации ионов в растворе основан на измерении разности электрических потенциалов двух специальных электродов, помещенных в исследуемый раствор, причем один электрод – вспомогательный – в процессе измерения имеет постоянный потенциал.

В общем случае при погружении электрода из какого-нибудь металла в раствор соли данного металла между электродом и раствором возникает электродный потенциал. Величина электродного потенциала E зависит от концентрации ионов данного металла в растворе и определяется уравнением Нернста:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln C,$$

где E_0 – нормальный потенциал, численное значение которого равно потенциалу электрода при концентрации катионов данного металла в растворе; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; n – валентность катиона; F – число Фарадея; C – концентрация (активность) катионов металла в растворе.

Таким образом, по величине электродного потенциала можно определить концентрацию ионов металла, из которого изготовлен электрод.

В электродной системе, представленной на [рис. 2.22](#), вспомогательный электрод находится в резервуаре 2, заполненном насыщенным раствором KCl. Электрическая цепь между стеклянным электродом 3, погруженным в анализируемый раствор 4, и вспомогательным электродом 1 замыкается через раствор KCl, стекающий по резиновой трубке 5 в анализируемый раствор. На конце этой трубки находится винт с микропористой прокладкой 6, с помощью которого устанавливается медленный сток раствора, достигающий 15–30 мл/сут.

Кондуктометрический метод анализа основан на зависимости электропроводности растворов от концентрации растворённых веществ.

В растворах электролитов часть молекул диссоциирует на положительные и отрицательные ионы. Это придаёт растворам способность проводить электрический ток, которая характеризуется его удельной электрической проводимостью χ_0 . *Электрическая проводимость* χ вещества есть величина, обратная электрическому сопротивлению R . Электропроводность растворов в большой мере зависит от температуры.

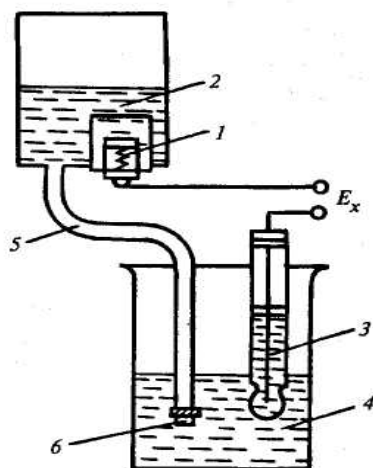


Рис 2.22. Схема электродной системы pH-метра с выносным вспомогательным электродом

Вид функции, связывающей удельную электропроводность раствора с концентрацией, определяется значением последней. Эта функция линейна только для разбавленных растворов (обычно до концентраций, не превышающих 100 мг/л), пока малы силы электростатического межионного взаимодействия.

Сущность *спектрофотометрического метода* анализа состоит в том, что при пропускании потока излучения через исследуемый раствор наблюдается селективное поглощение излучения определённой длины волны ионами или молекулами анализируемого вещества. Наиболее широко используются излучения видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра [8].

2.6. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Непосредственное воздействие на технологический процесс осуществляют с помощью регулирующих органов, которые изменяют подачу веществ в аппараты. Исполнительные механизмы управляют работой регулирующих органов.

2.6.1. Исполнительные механизмы

По виду используемой энергии исполнительные механизмы разделяют на электрические, пневматические и гидравлические.

Электрические исполнительные механизмы

Электрические исполнительные механизмы можно подразделить на две основные группы: электромагнитные (соленоидные) и электродвигательные.

Электромагнитные исполнительные механизмы выполнены на основе электромагнита, обеспечивающего поступательное перемещение регули-

рующего органа. Они применяются в схемах двухпозиционного регулирования (открыто – закрыто). Электромагнитный исполнительный механизм, как правило, состоит из главного электромагнита и электромагнитной защелки. На [рис. 2.23, а](#) показана схема включения вентиля с электромагнитным исполнительным механизмом. При подаче от регулятора сигнала на открытие вентиля замыкается контакт «Больше».

Включается обмотка главного электромагнита ЭГ, якорь втягивается в катушку соленоида и полностью открывает вентиль. Специальная защелка фиксирует якорь в этом положении, а блокировочный контакт КГ размыкается, обесточив обмотку главного электромагнита. Если регулятор подает команду на закрытие вентиля, замыкается контакт «Меньше», под током оказывается обмотка электромагнита ЭЗ, которая освобождает защелку, и плунжер вентиля под действием возвратной пружины закрывается, замкнув блокировочный контакт КГ.

Более широко применяются *электродвигательные исполнительные механизмы*, которые состоят из электродвигателя и понижающего механического редуктора. По характеру движения выходного звена они подразделяются на поворотные (однооборотные), многооборотные и прямоходные.

На [рис. 2.23, б](#) показана схема включения электродвигательного многооборотного исполнительного механизма, который кинематически связан через редуктор с регулирующим органом. Электродвигатель вращается в ту или другую сторону при замыкании контактов ВО или НО. Пуск электродвигателя осуществляется контактами 1РБ и 2РБ реле регулятора. При замыкании контакта 1РБ встает под ток обмотка В реверсивного магнитного пускателя. В результате этого главные контакты ВО включают в сеть электродвигатель М и блок-контакт В1 шунтирует контакт 1РБ. Когда электродвигатель достигает крайнего положения открытия, микропереключатель КВО переключает контакт из положения 1 в положение 2, обесточив обмотку электромагнитного пускателя В. Двигатель останавливается, и загорается лампа ЛО, сигнализирующая о полном открытии регулирующего органа. При замыкании контакта 2РБ под ток попадает обмотка Н реверсивного магнитного пускателя. Двигатель, соответственно, отработывает в другую сторону до полного закрытия регулирующего органа. Кнопка КС служит для аварийной остановки двигателя.

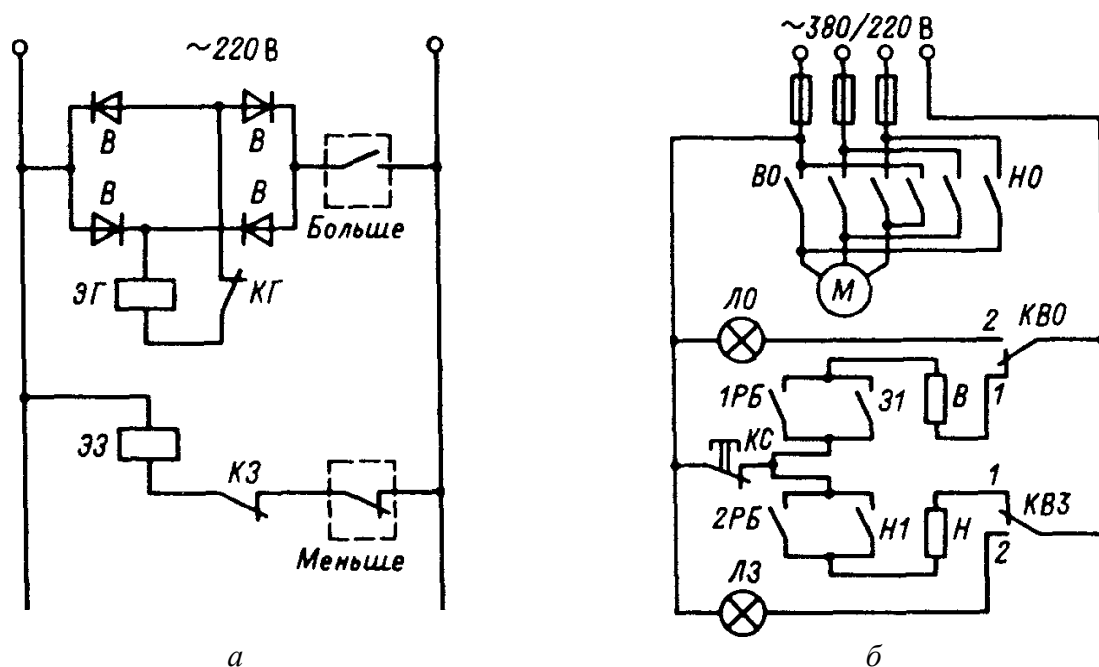


Рис. 2.23. Схемы включения электрических исполнительных механизмов

В качестве исполнительных двигателей применяют главным образом двигатели постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронные двухфазные двигатели.

Пневматические и гидравлические и исполнительные механизмы

Пневматические исполнительные механизмы применяют двух модификаций: мембранные и поршневые.

Схема мембранного исполнительного механизма с поступательным перемещением штока приведена на [рис. 2.24, а](#). В корпусе 1 болтами 6 зажата по периметру мембрана 2. В центре мембраны закреплен металлический диск 3, соединенный со штоком 4 и пружиной 5.

В корпус исполнительного механизма поступает от пневматического регулятора воздух под давлением P , что вызывает перемещение мембраны вниз или вверх в зависимости от величины давления и, соответственно, перемещение регулирующего органа РО.

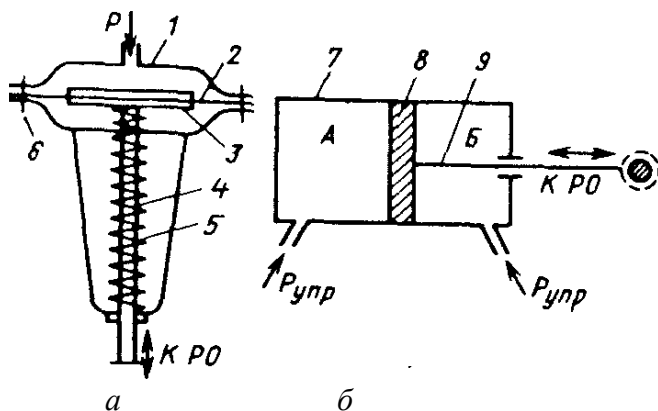


Рис. 2.24. Схемы мембранного (а) и поршневого (б) исполнительных механизмов

Поршневой исполнительный механизм (рис. 2.24, б) состоит из цилиндра 7 с поршнем 8, шток 9 которого соединен с регулирующим органом РО. Поршень перемещается вправо или влево в зависимости от того, в какую полость цилиндра (А или Б) поступает управляющий сигнал $P_{упр}$ от регулятора.

Гидравлические исполнительные механизмы выпускают двух типов: прямого хода и кривошипные (имеющие поворотный вал). Гидравлический исполнительный механизм прямого хода по принципу действия аналогичен пневматическому поршневому исполнительному механизму (рис. 2.24, б), но в полости цилиндра поступает под давлением масло от гидравлического регулятора. Если шток 9 исполнительного механизма соединить с кривошипом, то получим схему кривошипного гидравлического исполнительного механизма, управляющего поворотными регулирующими органами.

2.6.2. Регулирующие органы

Регулирующий орган непосредственно воздействует на технологический процесс путем изменения пропускной способности. Он представляет собой переменное гидравлическое сопротивление. Применяются регулирующие органы следующих типов: дисковые (заслоночные), односедельные и двухседельные (клапаны), трехходовые (клапаны), шланговые и диафрагмовые.

Дисковые (заслоночные) регулирующие органы (рис. 2.25, а) содержат заслонку (диск), помещенную в специальную обойму, которая поворачивается относительно горизонтальной оси. Заслонка служит для регулирования больших расходов. Она не может служить запорным органом, так как не обладает герметичностью.

Одно- и двухседельные регулирующие клапаны (рис. 2.25, б, в) содержат затвор (плунжер), который, перемещаясь поступательно, изменяет гидравлическое сопротивление расхода среды. Данные клапаны обладают герметичностью. Недостатком односедельных клапанов (рис. 2.25, б) является то, что их плунжеры испытывают большое выталкивающее усилие со стороны регулируемой среды, поэтому требуются мощные исполнительные механизмы. В двухседельных плунжерах (рис. 2.25, в) усилие, развиваемое регулируемой средой, действует одновременно на оба жестко связанных плунжера.

Трехходовые регулирующие клапаны (рис. 2.25, г) предназначены для смешения двух потоков или для разделения одного потока на два. При перемещении исполнительным механизмом штока в вертикальном направлении зазоры между плунжерами и седлами изменяются (один зазор уменьшается, другой – увеличивается), что приводит к изменению расхода через эти клапаны.

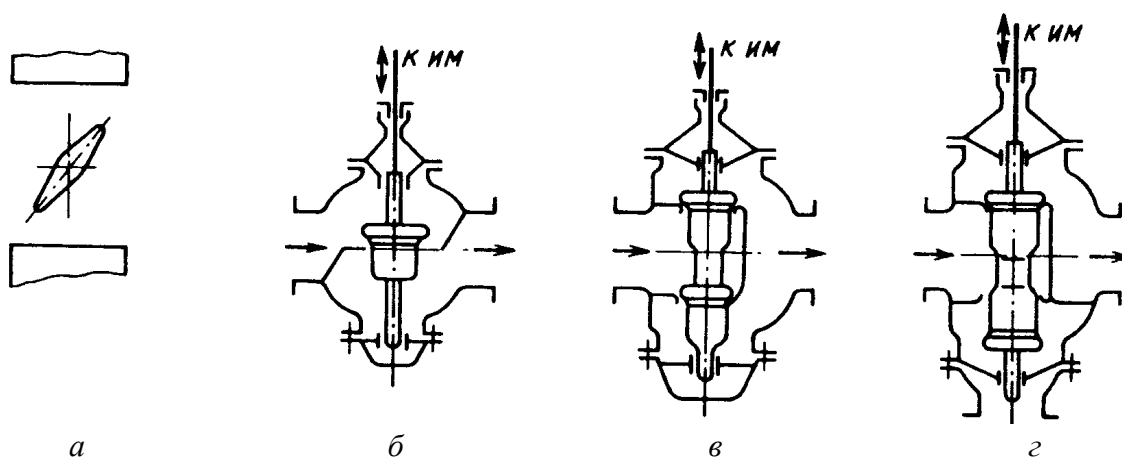


Рис. 2.25. Схемы регулирующих органов

Шланговые регулирующие органы отличаются тем, что регулируемое вещество проходит в них через эластичный патрубок (шланг), который деформируется под действием исполнительного механизма, изменяя при этом площадь проходного сечения и, соответственно, расход. В качестве привода используется мембранный пневматический исполнительный механизм.

Диафрагмовые регулирующие клапаны изменяют свое гидравлическое сопротивление благодаря поступательному перемещению центра диафрагмы относительно седла, представляющего собой перегородку в корпусе.

Тип регулирующего органа, конструктивную и расходную характеристики выбирают с учетом факторов, влияющих на его работу: параметров регулируемой среды (температура, плотность, давление и т.д.), свойств регулируемой среды (химическая активность, наличие примесей и т.д.). Кроме того, должны быть учтены вид энергии для питания привода и характеристика окружающей среды (пожаро- и взрывоопасность и т.п.).

От рабочих характеристик регулирующего органа существенно зависит качество процесса регулирования. Подбор размера регулирующего органа производится на основании его расчета.

3. ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

3.1. Цели, задачи и стадии проектирования

Надежная и безаварийная работа АСУ ТП зависит от правильных проектных решений, принятых при проектировании систем автоматизации, качественного выполнения проектной и технической документации, качества монтажных работ и строгого соблюдения технических условий монтажа, а также правильной наладки и эксплуатации смонтированных систем.

Создание любого устройства, процесса или системы начинается с проекта (от лат. «брошенный вперед»), т.е. с замысла, плана какого-либо изделия, сооружения, системы и др. Это также совокупность документов (расчетов, схем, чертежей и других материалов) для создания этих сооружений, изделий, систем. Процесс разработки проекта называется *проектированием*, т.е. созданием чего-то нового.

При проектировании систем автоматизации решают все вопросы, связанные с разработкой схем контроля, регулирования; выбором приборов и средств автоматизации; расчетами измерительных и регулирующих органов, определением количества сортамента материалов, необходимых для монтажа.

Проектирование выполняют, как правило, в две стадии – технический проект и рабочая документация. Для технически несложных объектов или для объектов, строительство которых будет осуществляться по типовым проектам, проектирование выполняют в одну стадию – технорабочий проект (ТРП) [\[9\]](#).

Технический проект разрабатывают, чтобы принять основные технические решения по системам контроля и автоматического регулирования, определить технико-экономические показатели (ТЭП), получаемые в результате внедрения этих решений, и сметную стоимость оборудования и монтажа. После утверждения технический проект служит основанием для выполнения рабочей документации.

Основанием для разработки проектной документации является *задание на проектирование*, или *техническое задание*, которое составляет заказчик. К составлению задания привлекают организацию, выполняющую проект автоматизации (разработчика) [\[10\]](#).

На данном этапе заказчик выдвигает требования, играющие основную роль. К ним относятся: надежность; требования, обуславливаемые физическими условиями, в которых будет работать будущая система (искробезопасность, вибростойкость, брызгозащищенность, температура, влажность, агрессивность среды и т.д.); весовые и габаритные требования; требования к функциональной гибкости системы; повышенные требования по контролю и ремонтпригодности (обслуживание неспециалистами в области систем управления); требования инженерной психологии, связанные с недопустимо-

стью ошибок при эксплуатации системы человеком (организация рабочего места оператора).

И для заказчика, и для разработчика важно, чтобы эти основные требования были бы сформулированы в самом начале их переговоров.

Для разработчика существенным в объекте управления представляется следующее:

- из каких блоков состоит объект с точки зрения управления;
- какие функциональные и управляющие связи имеются между этими блоками и системой управления;
- каковы внешние воздействия на объект;
- какими режимами обладают блоки и объект в целом;
- какими параметрами описываются режимы работы;
- каковы датчики, регулирующие органы и исполнительные механизмы системы управления;
- какими временными диаграммами описываются последовательности управляющих сигналов.

Желательно, чтобы накопленные знания об объекте управления разработчик мог представить в компактной и удобной для дальнейшей работы форме.

Переговоры между заказчиком и разработчиком системы управления касаются и таких вопросов, как стоимость будущей системы и время ее разработки. Результаты переговоров фиксируются в специальном документе, называемом техническим заданием на разработку системы управления [11].

Техническое задание должно быть полным и конкретным. Основными разделами технического задания обычно являются:

- 1) основание для разработки системы управления, ее назначение и область применения;
- 2) условия эксплуатации системы управления;
- 3) эксплуатационно-технические характеристики системы управления;
- 4) объем выполняемых разработчиком работ;
- 5) технические требования к системе управления;
- 6) требования к художественно-конструкторскому оформлению системы;
- 7) требования к патентной защищенности СУ;
- 8) требования к заказчику по обеспечению разработки, внедрения и эксплуатации системы управления.

К техническому заданию прилагают следующие исходные материалы: технологические схемы с трубопроводными коммуникациями и указанием их диаметров, чертежи производственных помещений с расположением технологического оборудования, трубопроводов и рекомендуемых мест установки щитов и пультов управления, строительные чертежи зданий, ведомости приборов и устройств автоматики, поставляемых комплектно с оборудованием, расчет технико-экономической эффективности, сетевой график разработки.

В состав *технического проекта (первая стадия)* входят:

структурная схема управления и контроля (для сложных систем управления);

схемы автоматизации (функциональные) технологических процессов (для объектов с несложным технологическим процессом и простыми системами автоматизации допускается вместо функциональных схем автоматизации составлять перечни систем контроля, регулирования, управления и сигнализации);

планы расположения щитов пультов и т.п.;

заявочные ведомости (приборов и средств автоматизации, электроаппаратуры, трубопроводной арматуры, щитов и пультов, основных монтажных материалов, нестандартизированного оборудования);

тематические карточки на разработку новых средств автоматизации;

технические требования на разработку нестандартизированного оборудования;

смета на приобретение и монтаж технических средств систем автоматизации;

пояснительная записка;

задание генпроектировщику на разработки, связанные с автоматизацией объекта для обеспечения систем автоматизации электроэнергией, сжатым воздухом, гидравлической энергией, теплоносителями, хладагентами и т.п., проектирование помещений для установки оборудования систем автоматизации, кабельных сооружений, проемов и закладных устройств в строительных конструкциях; размещением и установкой на технологическом оборудовании и трубопроводах закладных устройств, первичных приборов, регулирующих органов, запорной арматуры и т.п.

На стадии *рабочей документации (вторая стадия)* в состав проектных материалов входят:

структурная схема управления и контроля;

функциональные схемы автоматизации технологических процессов;

принципиальные электрические, пневматические, гидравлические схемы контроля, автоматического регулирования, управления, сигнализации и питания;

общие виды щитов и пультов;

монтажные схемы щитов и пультов;

схемы внешних электрических и трубных проводок;

планы расположения средств автоматизации, электрических и трубных проводок;

нетиповые чертежи установки средств автоматизации;

общие виды нестандартизированного оборудования;

пояснительная записка;

расчеты регулирующих органов;

заказные спецификации приборов и СА, электроаппаратуры, щитов, и пультов, трубопроводной арматуры, кабелей и проводов, основных материалов и изделий, нестандартизированного оборудования.

В состав технорабочего проекта включают материалы, выполняемые на стадии рабочей документации, и дополнительно смету на приобретение оборудования и монтаж [\[12\]](#).

3.2. Структурные схемы управления и контроля

Структурные схемы отражают укрупненную структуру системы управления и взаимосвязи между пунктами контроля и управления объектом и отдельными должностными лицами.

На структурной схеме отражаются в общем виде основные решения проекта по функциональной, организационной и технической структурам АСУ ТП с соблюдением иерархии системы и взаимосвязей между пунктами контроля и управления, оперативным персоналом и технологическим объектом управления. Принятые при выполнении структурной схемы принципы организации оперативного управления технологическим объектом сохраняются во всех проектных документах на АСУ ТП: функциональных схемах автоматизации, принципиальных схемах контроля и управления и т.д.

Структурная схема разрабатывается на стадиях технического проекта и рабочей документации. На стадии рабочей документации при двухстадийном проектировании структурная схема разрабатывается только при изменении технологической части проекта или решений по автоматизации, принятых при утверждении технического проекта [\[13\]](#).

На структурной схеме показывают: технологические подразделения автоматизируемого объекта (отделения, участки, цеха, производства); пункты контроля и управления (местные щиты, операторские и диспетчерские пункты и т.д.); технологический (эксплуатационный) персонал и специализированные службы, обеспечивающие оперативное управление и нормальное функционирование технологического объекта; основные функции и технические средства, обеспечивающие их реализацию; взаимосвязь подразделений технологического объекта, пунктов контроля и управления и технологического персонала между собой и с вышестоящей системой управления.

Элементы структурной схемы изображаются, как правило, в виде прямоугольников. Для отдельных функциональных служб допускается изображение в виде окружностей.

Внутри прямоугольников, изображающих участки, подразделения технологического объекта, раскрывается их производственная структура.

Внутри прямоугольников, изображающих пункты контроля и управления, указываются:

наименование пункта;

технологический персонал, ответственный за принятие решений (диспетчер, оператор и т.д.), а также персонал, управляющий технологическим процессом с местных щитов и постов (аппаратчик, электролизник, дробильщик и т.д.);

наименование основных устройств (комплекса технических средств), установленных в данном пункте (например, щит контроля, пульт управления, управляющий вычислительный комплекс, средства связи и т.д.);

основные функциональные группы устройств комплекса технических средств;

основные функции системы, реализуемые технологическим персоналом и комплексом технических средств на данном уровне управления.

На структурной схеме технические средства и функциональные группы устройств комплекса технических средств указывают условными буквенными обозначениями (например, Д – датчик, Р – регулятор и т.д.). Функции системы обозначаются цифрами (1, 2, 3 и т.д.).

Расшифровка обозначений дается в виде таблиц на чертеже структурной схемы.

Взаимосвязи между пунктами контроля и управления, технологическим персоналом и объектом управления изображаются на схеме сплошными линиями. Слияние и разветвление линий показываются на чертеже линиями с изломом [\[14, 15\]](#).

3.3. Функциональные схемы автоматизации

Функциональные схемы отражают функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, сигнализации, управления и регулирования технологического процесса и определяют оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

Функциональная схема автоматизации является основным техническим документом, определяющим функциональную структуру и объем автоматизации технологических установок.

К составлению функциональных схем приступают после подробного изучения объекта автоматизации.

При составлении функциональных схем разрабатываются следующие основные вопросы:

получения первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;

непосредственного воздействия на технологический процесс для управления им;

стабилизации технологических параметров процесса;

контроля и регистрации технологических параметров процесса и состояния технологического оборудования.

Эти вопросы решают на основании анализа работы технологического оборудования, законов и критериев управления объектом, а также требований, предъявляемых к точности стабилизации, контроля и регистрации технологических параметров, к качеству регулирования и надежности.

В процессе разработки функциональных схем осуществляют:
выбор методов измерения технологических параметров;
выбор основных технических средств автоматизации;
определение приводов исполнительных механизмов, регулирующих органов технологического оборудования;

размещение средств автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании и трубопроводах и определение способов представления информации о состоянии технологического процесса и оборудования.

Функциональную схему выполняют в виде чертежа, на котором схематически условными изображениями показывают: технологическое оборудование, коммуникации, органы управления и технические средства автоматизации с указанием связей между ними [\[9, 10\]](#).

Технологическое оборудование и коммуникации на функциональных схемах изображают, как правило, упрощенно, без указания вспомогательных устройств, на которых не устанавливаются средства автоматизации. Однако схема должна давать ясное представление о принципе работы оборудования и взаимодействии его со средствами автоматизации.

На технологических трубопроводах обычно показывают ту регуливающую и запорную арматуру, которая непосредственно участвует в контроле и управлении процессом, а также ту, которая необходима для определения относительного расположения мест отбора импульсов.

Технологические трубопроводы изображают сплошной основной линией, над которой помещают наименование транспортируемой среды. Направление потока указывают стрелками.

У изображения технологического оборудования и отдельных его элементов приводят соответствующие поясняющие надписи: наименование технологического оборудования, его номер (если таковой имеется) и т.п.

Отдельные агрегаты и установки технологического оборудования могут быть изображены оторвано друг от друга, но при этом всегда приводятся необходимые указания на их взаимосвязь.

Технологическую установку вычерчивают тонкими линиями в верхней части чертежа без соблюдения масштаба.

Для обозначения технологического оборудования и трубопроводов на функциональной схеме автоматизации могут быть применены и условные обозначения, принятые в технологических схемах [\[13, 16\]](#).

Условные графические и буквенные обозначения приборов и средств автоматизации принимают по ГОСТ 21.404.

Для всех *измерительных преобразователей (датчиков)*, а также приборов, установленных по месту, принято единое графическое изображение в виде окружности диаметром 10 мм или овала в зависимости от объема вписываемых буквенных обозначений. То же обозначение, но разделенное горизонтальной чертой, соответствует приборам, установленным на щите или пульте.

В верхней части графического обозначения наносят буквенные обозначения измеряемой величины и функционального признака прибора, определяющего его назначение (табл. 3.1). В нижней части графического обозначения указывают цифровое (позиционное) обозначение прибора или комплекта средств автоматизации.

Т а б л и ц а 3.1
Буквенные условные обозначения

Обозначение	Измеряемая величина		Функции, выполняемые прибором		
	Основное значение первой буквы	Дополнительное значение, уточняющее значение первой буквы	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
<i>A</i>	—	—	Сигнализация	—	—
<i>B</i>	Резервная буква	—	—	—	—
<i>C</i>	—	—	—	Регулирование, управление	—
<i>D</i>	Плотность	Разность, перепад	—	—	—
<i>E</i>	Любая электрическая величина	—	—	—	Чувствительный элемент
<i>F</i>	Расход	Соотношение, доля, дробь	—	—	—
Обозначение	Измеряемая величина		Функции, выполняемые прибором		
	Основное значение первой буквы	Дополнительное значение, уточняющее значение первой буквы	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
<i>G</i>	Размер, положение, перемещение	—	—	—	—
<i>H</i>	Ручное воздействие	—	—	—	Верхний предел измеряемой величины
<i>I</i>	—	—	Показание	—	—
<i>J</i>	—	Автоматическое переключение, обегание	—	—	—
<i>K</i>	Время, временная программа	—	—	—	Станция управления
<i>L</i>	Уровень	—	—	—	Нижний предел измеряемой величины
<i>M</i>	Влажность	—	—	—	—

Продолжение табл. 3.1

<i>O</i>	Резервная буква	—	—	—	—
<i>N</i>	Резервная буква	—	—	—	—
<i>P</i>	Давление, вакуум	—	—	—	—
<i>Q</i>	Величина, характеризующая качество: состав, концентрация и т.п.	Интегрирование, суммирование по времени	—	—	—
<i>R</i>	Радиоактивность	—	Регистрация	—	—
<i>S</i>	Скорость, частота	—	—	Включение, отключение, переключение, сигнализация	—
<i>T</i>	Температура	—	—	—	Дистанционная передача
<i>U</i>	Несколько различных измеряемых величин	—	—	—	—
<i>V</i>	Вязкость	—	—	—	—
<i>W</i>	Масса	—	—	—	—
<i>Y</i>	—	—	Преобразование	—	—

Порядок расположения букв в буквенном обозначении принимают следующим:

- 1) основное обозначение измеряемой величины;
- 2) дополнительное обозначение измеряемой величины (при необходимости);
- 3) обозначение функционального признака прибора.

Принцип построения условного обозначения прибора приведен на [рис. 3.1](#).

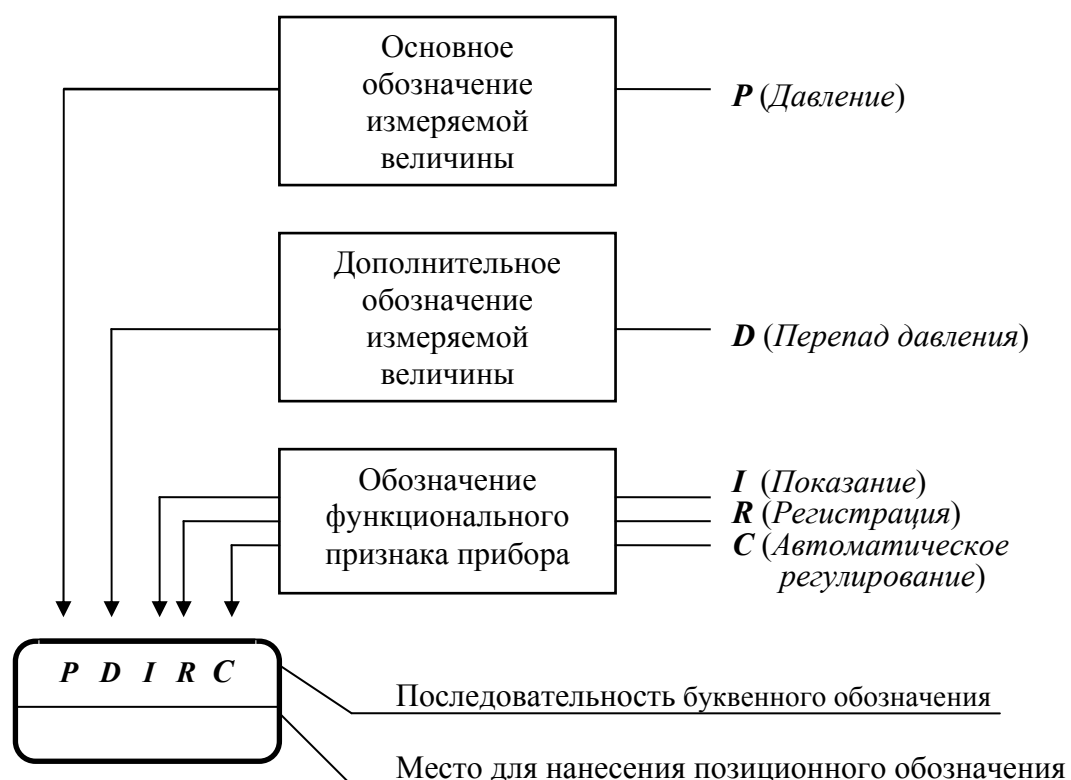


Рис. 3.1. Принцип построения условного обозначения прибора

При наличии у прибора нескольких функциональных признаков они должны быть расположены в следующем порядке: *I*, *R*, *C*, *S*, *A*.

При построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств справа от графического обозначения прибора наносят надписи, определяющие вид преобразования или операции, осуществляемые вычислительным устройством.

Дополнительные обозначения, применяемые для построения условных обозначений преобразователей сигналов, вычислительных устройств, приведены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Дополнительные обозначения

Наименование	Обозначение
1. Род энергии сигнала:	
электрический	<i>E</i>
пневматический	<i>P</i>
гидравлический	<i>G</i>

Продолжение табл. 3.2

2. Виды форм сигнала:	
аналоговый	A
дискретный	D
3. Операции, выполняемые вычислительным устройством:	
суммирование	Σ
умножение сигнала на постоянный коэффициент k	k
перемножение двух и более сигналов друг на друга	\times
деление сигналов друг на друга	$:$
возведение величины сигнала f в степень n	f^n
извлечение из величины сигнала корня степени n	$\sqrt[n]{}$
логарифмирование	\lg
дифференцирование	dx/dt
интегрирование	\int
изменение знака сигнала	$x(-1)$
ограничение верхнего значения сигнала	\max
ограничение нижнего значения сигнала	\min
4. Связь с вычислительным комплексом:	
передача сигнала на ЭВМ	B_i
вывод информации с ЭВМ	B_0

Все *отборные устройства* обозначаются окружностью диаметром 2 мм. *Исполнительные механизмы* обозначаются окружностью диаметром 5 мм. Дополнительный *ручной привод* обозначают буквой Н, вписанной в окружность. *Регулирующий орган* изображают аналогично трубопроводной арматуре.

Условные графические обозначения на схемах выполняют сплошной толстой основной линией, а горизонтальную разделительную черту внутри графического обозначения и линии связи – сплошной тонкой линией по ГОСТ 2.303-68.

Шрифт буквенных обозначений принимают по ГОСТ 2.304-81 равным 2,5 мм.

Линии связи между приборами и контурами контроля и управления изображают на схемах сплошной тонкой линией независимо от вида сигналов и количества проводов и труб.

Приборы, встраиваемые в технологические коммуникации, показывают в разрыве линии изображения коммуникаций (рис. 3.2), устанавливаемые на технологическом оборудовании (с помощью закладных устройств) – рядом (рис. 3.3).



Рис. 3.2. Обозначение встраиваемых приборов

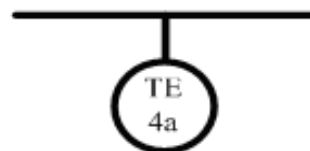


Рис. 3.3. Обозначение приборов, устанавливаемых на оборудовании

Остальные технические средства показывают условными графическими обозначениями в прямоугольниках, расположенных в нижней части схемы. Каждому прямоугольнику присваивают заголовки, соответствующие показанным в них техническим средствам.

Первым располагают прямоугольник, в котором показаны внештитовые приборы, конструктивно не связанные с технологическим оборудованием, с заголовком «Приборы местные», ниже – прямоугольники, в которых показаны щиты и пульты, а также комплексы технических средств.

Заголовки прямоугольников, предназначенных для изображения щитов и пультов, принимают в соответствии с наименованиями, используемыми в эскизных чертежах общих видов, для комплексов технических средств – в соответствии с их записью в спецификации оборудования.

На функциональных схемах буквенно-цифровые обозначения приборов указывают в нижней части окружности (овала), обозначения электроаппаратов – справа от их условного графического обозначения.

При этом обозначения техническим средствам присваивают по спецификации оборудования и составляют из цифрового обозначения соответствующего контура и буквенного обозначения (прописными буквами русского алфавита) каждого элемента, входящего в контур (в зависимости от последовательности прохождения сигнала).

При большом количестве приборов допускается применять обозначения, в которых первый знак соответствует номеру контура, а второй знак – порядковому номеру прибора в пределах этого контура.

Электроаппараты, входящие в систему автоматизации (звонки, сирены, сигнальные лампы, табло, электродвигатели и др.), показывают на схеме графическими условными обозначениями по ГОСТ 2.722, ГОСТ 2.732, ГОСТ 2.741 и присваивают им буквенно-цифровые обозначения по ГОСТ 2.710.

Линии связи изображают с разрывом. Места разрывов выносят на одну линию (горизонтальную или вертикальную) и нумеруют арабскими цифрами в порядке их расположения в прямоугольнике с заголовком «Приборы местные».

Допускается пересечение линий связи с изображениями технологического оборудования. Пересечение линий связи с обозначениями приборов не допускается.

На линиях связи со стороны прямоугольника «Приборы местные» указывают предельные (максимальные или минимальные) рабочие значения измеряемых (регулируемых) величин по ГОСТ 8.417 или в единицах шкалы выбираемого прибора. Для обозначения разрежения (вакуума) ставят «минус». Для приборов, встраиваемых непосредственно в технологическое оборудование и не имеющих линий связи с другими приборами, предельные значения величин указывают рядом с обозначением приборов.

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание

Рис. 3.4. Перечень элементов по ГОСТ 2.701

Если функциональная схема разрабатывается отдельно (без принципиальных схем), над основной надписью помещают таблицу перечня элементов (рис. 3.4). При наличии принципиальных схем таблица перечня элементов не выполняется [17–19].

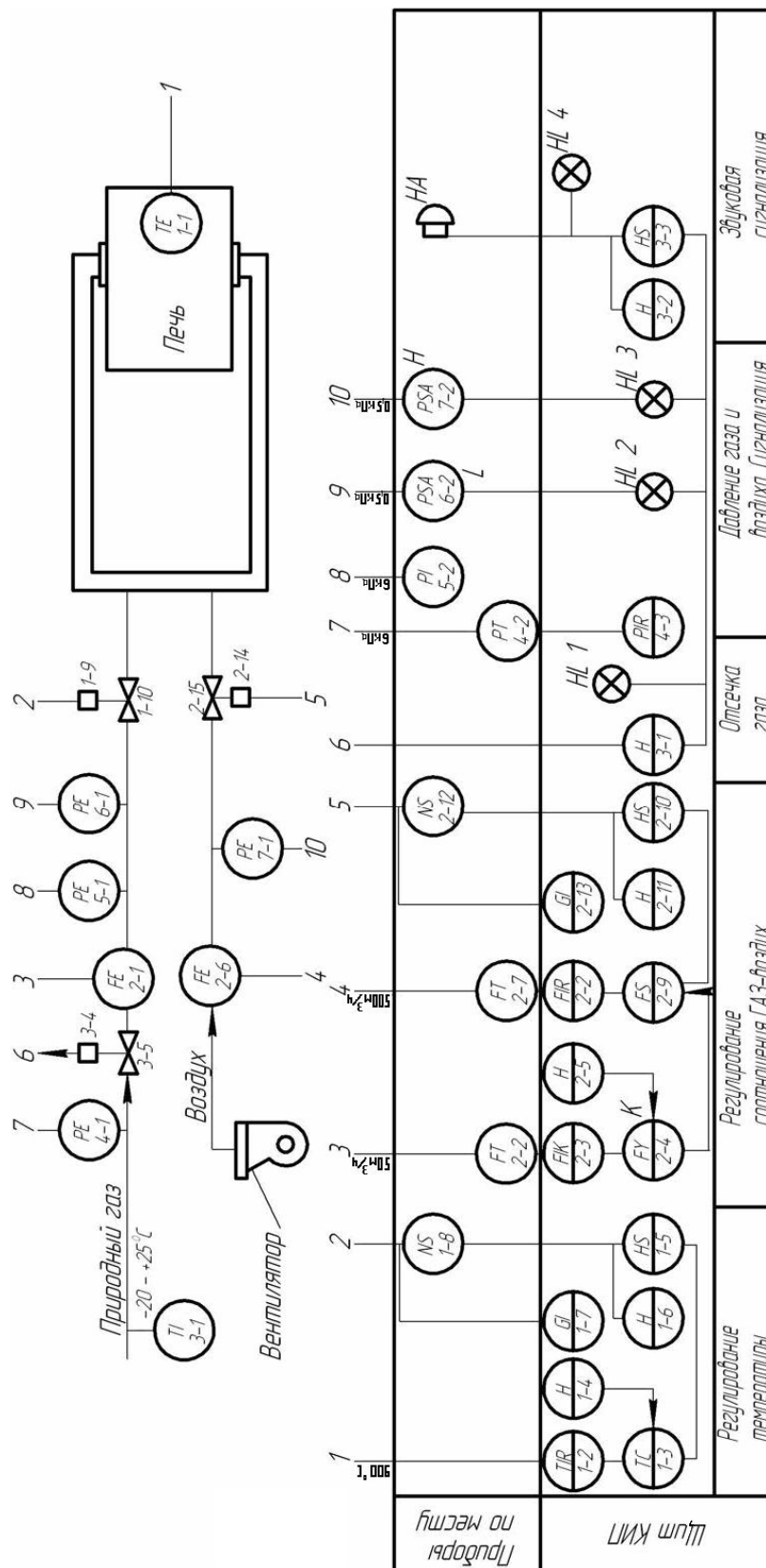


Рис. 3.5. Функциональная схема автоматизации нагревательной печи

На примере схемы автоматизации нагревательной печи (рис. 3.5) показаны контуры регулирования температуры в печи, соотношение расхода газ–воздух, подаваемых в печь, а также контуры контроля давления природного

газа и воздуха в трубопроводах. Предусмотрена звуковая и световая сигнализация основных параметров.

4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

4.1. Иерархия управления. Назначение, цели и функции АСУ ТП

Основными условиями эффективной работы АСУ ТП являются готовность объекта к автоматизации, психологическая настроенность персонала, приспособленность технологии и оборудования и др. Без указанных факторов будет происходить дискредитация автоматизации, а предприятия вместо ожидаемой прибыли получат убыток.

Иерархический принцип управления заключается в многоступенчатой организации процесса, где каждая ступень управления имеет свои объекты и цели.

На первом уровне (ступени) системы осуществляют автоматический контроль и стабилизацию основных параметров процесса. Здесь функционируют локальные системы автоматического контроля и регулирования температуры, расхода, уровня и др.

На втором уровне – контроль комплексных параметров, которые получают в результате несложных математических операций над поступающей информацией (фильтрации, усреднения, суммирования и т.п.). На этом уровне функционируют устройства централизованного контроля и специализированные аналоговые и цифровые вычислительные устройства.

На третьем уровне – текущее управление технологическим процессом; разработка технологических рекомендаций, оптимизирующих процесс; коррекция математических выражений и заданий локальным АСР, используемых на втором уровне. На данном уровне используют универсальные ЭВМ, реализующие функции управления.

На четвертом уровне – диспетчеризация и оперативный анализ работы производственного участка, в том числе расчет технико-экономических показателей.

Перечисленные ступени процесса управления называют *иерархическими уровнями управления*. Иерархичность системы, ее многоуровневость обуславливаются сложностью систем управления.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами вырабатывают и реализуют управляющие воздействия на технологическом объекте управления в соответствии с принятым критерием управления. АСУ ТП свойственны следующие признаки, общие для всех АСУ:

АСУ ТП – это человеко-машинная система, в которой человек играет важнейшую роль, принимая в большинстве случаев содержательное участие в выработке решений по управлению;

существенное место в АСУ ТП занимают автоматические устройства (в том числе средства вычислительной техники), выполняющие трудоемкие операции по сбору, обработке и переработке информации;

целью функционирования АСУ ТП является оптимизация работы объекта путем соответствующего выбора управляющих воздействий.

Назначение любой автоматизированной системы управления, ее необходимые функциональные возможности, желаемые технические характеристики и другие особенности в решающей степени определяются тем объектом, для которого создается данная система. Для АСУ ТП управляемым объектом является так называемый *технологический объект управления*, представляющий собой совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим инструкциям или регламентам технологического процесса производства целевого продукта.

Создание и функционирование каждой АСУ ТП должно быть направлено на получение вполне определенных технико-экономических результатов (снижение себестоимости продукции, уменьшение потерь, повышение производительности труда, качества целевых продуктов и т.д.).

Степень достижения поставленных целей принято оценивать с помощью *критериев управления*, т.е. показателей, достаточно полно характеризующих качество ведения технологического процесса и принимающих численные значения в зависимости от вырабатываемых системой воздействий. В строгой, обычно математической, форме критерий управления конкретизирует *цель* создания данной системы. Одна из общих постановок вопроса о критерии управления сводится к стремлению получить наибольший экономический эффект, который определяется разностью стоимостей получаемой готовой продукции и сырья, энергии, рабочей силы и прочих затрат. Оптимальным будет такое управление процессом, которое позволит добиться максимального значения этой разности.

Не меньшую роль, чем критерий, играют *ограничения*, которые должны соблюдаться при выборе управляющих воздействий. Ограничения бывают двух видов: *физические*, которые не могут быть нарушены даже при неправильном выборе управляющего воздействия, и *условные*, которые могут быть нарушены, но нарушение приводит к незначительному ущербу, не учитываемому критерием. При управлении часто наиболее существенные факторы учитываются именно ограничениями, а не критерием.

Чтобы добиться желаемого (в том числе оптимального) хода технологического процесса, в системе управления необходимо в требуемом темпе выполнять множество взаимосвязанных различных действий: собирать и анализировать информацию о состоянии процесса, регистрировать значения одних переменных и стабилизировать другие, принимать и реализовывать соответствующие решения по управлению и т.д.

Перечисленные действия (функции) АСУ ТП относят к основным и разделяют на информационные и управляющие.

Целью *информационных функций* является сбор, преобразование, хранение информации о состоянии технологического объекта управления, пред-

ставление этой информации оперативному персоналу или передача ее для последующей переработки.

Источниками информации в АСУ ТП служат: 1) датчики и контрольно-измерительные приборы, установленные на самом объекте управления и на вспомогательных участках производства (часто информация вводится в виде унифицированного токового сигнала 0–5 мА); здесь информация поступает автоматически от датчиков автоматического ввода информации; 2) датчики ручного ввода такой информации, которую невозможно вводить автоматически на современном уровне развития контрольно-измерительной аппаратуры. Важное место в системе ввода информации занимают контрольные лаборатории, где осуществляются химический, гранулометрический, физико-механический и другие виды контроля сырья и готовой продукции. Пробы в контрольные лаборатории подают главным образом пневмопочтой.

Управляющие функции подчинены задаче непосредственно управления технологическими процессами. Их целью являются выработка решений и осуществление управляющих воздействий на объект управления.

Вспомогательные функции, которые существенно различаются в разных системах, соответствуют их определению. Они обеспечивают решение внутрисистемных задач.

Рассмотренные функции реализуются с помощью различных подсистем (управления, контроля, идентификации, регулирования, защиты), входящих в состав АСУ ТП.

При создании второго и высших уровней иерархии АСУ ТП решающее значение приобретают математические модели технологических объектов управления. В настоящее время математические описания металлургических объектов уже достигли такой глубины и сложности, что использование их возможно только в рамках АСУ ТП с вычислительной техникой. Кроме того, резко возросла сложность алгоритмов управления, представляющих собой формальные инструкции, в которых говорится о том, как надо обработать информацию об управляемом процессе, чтобы получить целесообразные управляющие воздействия. Поэтому в АСУ ТП центральное место занимают управляющие вычислительные комплексы (УВК).

В современных УВК все устройства выполнены по блочно-модульному типу и могут быть объединены в единый комплекс в различных сочетаниях. Этот способ позволяет компоновать состав УВК применительно к задачам конкретной АСУ ТП.

4.2. Разновидности АСУ ТП

Современные АСУ ТП очень разнообразны и могут отличаться друг от друга по функциональному составу, структуре (централизованные, децентрализованные), степени автоматизации управления объектом, применяемым техническим средствам и многим другим признакам и характеристикам. Однако имеются характерные разновидности таких систем, различающихся способами выполнения основных информационных и управляющих функций.

АСУ ТП, функционирующие без вычислительного комплекса. Подобные человеко-машинные системы обычно применяются для управления отдельными относительно простыми технологическими агрегатами, установками или группами аппаратов, т.е. в тех случаях, когда применение вычислительного комплекса (ВК) экономически нецелесообразно. В общей структуре управления производством такие системы занимают самую нижнюю ступень иерархии и характеризуются тесной связью с объектом, сравнительно малой зависимостью от других ступеней иерархии, наибольшей оперативностью контроля и управления.

Основными функциями этих систем являются контроль параметров технологического процесса, стабилизация параметров технологического процесса на заданном постоянном режиме (определяется регламентом производства), программное управление (включая пуск и останов процесса), защита оборудования от аварий, оперативная связь со старшими ступенями управления.

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим информационные функции. Системы этого вида содержат все функциональные и аппаратные элементы, присущие предыдущей системе, но отличаются от нее наличием вычислительного комплекса.

ВК получает всю необходимую информацию о состоянии объекта, вычисляет комплексные технические и технико-экономические показатели, а также контролирует работу и состояние оборудования. Однако задачи анализа поступающей информации, принятие решений, а также осуществление управляющих воздействий в таких системах возлагаются на оператора [3].

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим управляющие функции в режиме «советчика». Кроме функций, реализуемых ВК в предыдущей системе, на него возлагают задачи анализа поступающей информации и поиска оптимальных решений с выдачей рекомендаций по управлению (советов) оператору. Окончательный выбор и осуществление управляющих воздействий по-прежнему остается за оператором. Такая АСУ ТП функционирует следующим образом. Через заданные промежутки времени (в зависимости от конкретных условий обычно 1 раз через 2–10 мин) полученные ВК данные о состоянии объекта и комплексные технические и технико-экономические показатели анализируются с помощью математической модели управляемого процесса. Путем вычислений по математической модели определяются воз-

действия, необходимые для приближения процесса к оптимуму; результаты представляются оператору, который управляет процессом, изменяя настройки регуляторов или выполняя другие действия в соответствии с рекомендациями, вырабатываемыми ВК.

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим функции центрального управляющего устройства (супервизорное управление). Характерной особенностью таких систем управления является включение ВК в замкнутый контур автоматического управления с целью выработки управляющих воздействий, поступающих как сигналы заданий непосредственно на входы к системам автоматического регулирования ([рис. 4.1](#)).

Данные об объекте, полученные с помощью ВК, кроме вывода на централизованные средства отображения информации, могут либо передаваться в вышестоящую АСУ для дальнейшей обработки непосредственно, либо выводятся для этой цели на внешние накопители (перфоленты, перфокарты и др.). В результате накапливается информация, позволяющая построить и (или) уточнить математическую модель процесса, которым нужно управлять. Сбор данных не оказывает воздействия на процесс; однако, даже после внедрения самых сложных методов управления с использованием ВК сбор данных для анализа и уточнения модели оказывается полезным и почти всегда предусматривается как одна из задач вычислительной машины. Кроме того, на ВК возлагаются задачи анализа поступающей информации и поиска оптимальных решений. Решаются эти задачи следующим образом. Через заданные промежутки времени (в зависимости от конкретных условий обычно 1 раз через 2–10 мин) полученные в ВК данные о состоянии объекта и комплексные технические и технико-экономические показатели анализируются с помощью математической модели управляемого процесса. Путем вычислений по модели определяются воздействия, необходимые для приближения процесса к оптимуму; результаты преобразуются в форму, пригодную для изменения задания и настроек регуляторов. Так, например, если регуляторы воспринимают сигналы в форме постоянного тока, то управляющее воздействие, вырабатываемое ВК, превращается в ток соответствующего уровня и знака (чаще всего 0–5 мА).



Рис. 4.1. АСУ ТП с вычислительным комплексом

Поскольку в таких системах контур управления замкнут через ВК, то функции оператора сводятся к общему наблюдению за ходом процесса. Вмешательство человека требуется лишь при возникновении каких-то редких, непредвиденных (например, аварийных) ситуаций.

Важное достоинство систем супервизорного управления состоит в том, что в них ВК не только непрерывно контролирует процесс, но и автоматически управляет им вблизи оптимальной точки.

АСУ ТП с вычислительным комплексом, выполняющим функции непосредственного (прямого) цифрового управления. В АСУ ТП, ВК которой работает в режиме непосредственного цифрового управления, сигналы, используемые для приведения в действие исполнительных механизмов, поступают непосредственно от ВК, а соответствующие регуляторы вообще исключаются из системы (или используются как резерв). В остальном работа данных АСУ ТП аналогична работе АСУ ТП с ВК, выполняющим функции центрального управляющего устройства.

Одно из главных преимуществ применения АСУ ТП с ВК, работающем в режиме непосредственного цифрового управления, заключается в возможности изменения алгоритмов управления для контуров простым внесением

изменений в хранимую программу. Но поскольку для реализации таких систем необходимо располагать средствами вычислительной техники повышенной надежности (отказ УВК ведет к полной потере управления), а также выделения довольно большого объема памяти для реализации регуляторов, то чаще строят АСУ ТП с супервизорным управлением.

4.3. Состав АСУ ТП. Основные компоненты

В состав любой АСУ ТП входят следующие компоненты (части системы): оперативный персонал, информационное, организационное, программное и техническое обеспечение ([рис. 4.2](#)).

Процесс функционирования АСУ ТП (как и любой другой системы управления) по существу является процессом целенаправленного преобразования входной информации в выходную. В АСУ ТП это преобразование выполняется совместно двумя компонентами: *оперативным персоналом* и *техническим обеспечением* (комплексом технических средств); именно они собирают входную информацию от объекта и вырабатывают решения по управлению и реализуют их, формируя соответствующие управляющие воздействия на объект и посылая другие сигналы, несущие выходную информацию как своеобразную продукцию системы. Поэтому оперативный персонал и технические средства можно считать главными компонентами АСУ ТП.

Чтобы и люди, и комплекс технических средств (КТС) могли функционировать правильно, согласно принятым критериям, необходимо обеспечить их соответствующими правилами и инструкциями. Для оперативного персонала эту задачу выполняют документы *организационного обеспечения* АСУ ТП, а для основной части КТС (цифровой ЭВМ) – *программное обеспечение* (ПО), т.е. совокупность программ.

Между указанными компонентами АСУ ТП в процессе ее функционирования существует интенсивное взаимодействие ([см. рис. 4.2](#)): организационное и программное обеспечение определяют поведение оперативного персонала и ЭВМ; кроме того, персонал активно взаимодействует с техническим обеспечением и при необходимости корректирует программное обеспечение. Все эти взаимодействия внутри системы, а также с внешней средой носят прежде всего информационный характер, так как сводятся к передаче и приему информации в виде различных сигналов, данных, сообщений, текстов и т.д. Такой информационный обмен требует наличия определенных соглашений о принятых формах и возможных значениях (содержании, смысле) тех или иных информационных элементов. Совокупность этих соглашений, т.е. множество принятых форм массивов данных документов, перечней и шкал используемых сигналов, кодов и правил их расшифровки, образует еще один условно выделяемый основной компонент АСУ ТП, называемый ее *информационным*

обеспечением. Важная роль этого компонента состоит в том, что с его помощью осуществляются все процессы обмена информации как внутри АСУ ТП, так и с внешней средой.

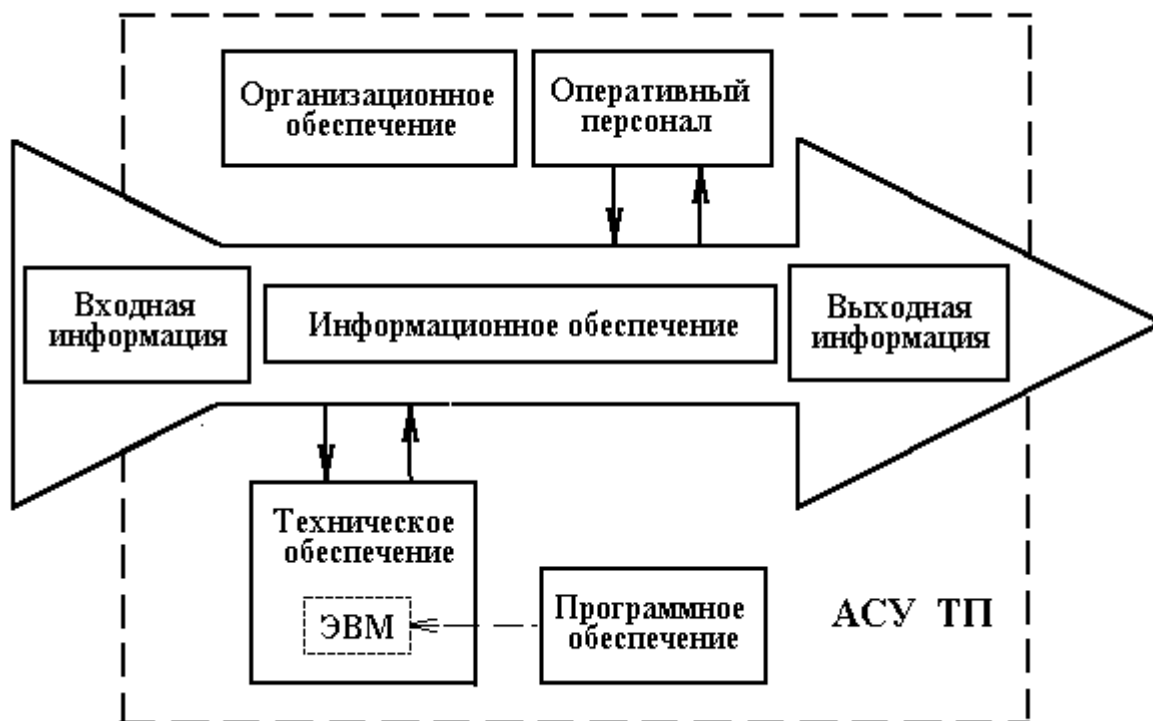


Рис. 4.2. Упрощенная схема взаимодействия основных компонентов АСУ ТП

Оперативный персонал АСУ ТП состоит из технологов-операторов (диспетчеров), осуществляющих контроль и управление объектом, и эксплуатационного персонала, обеспечивающего правильность функционирования всех технических и программных средств системы. Состав оперативного персонала конкретной АСУ ТП и установленные взаимоотношения между его работниками определяют *организационную структуру* системы.

Организационное обеспечение АСУ ТП представляет собой совокупность документов, устанавливающих порядок и правила функционирования оперативного персонала данной системы. Сюда входят технологические инструкции и регламенты, определяющие ведение процесса, инструкции по эксплуатации системы, описание ее функциональной, организационной и технической структур, а при необходимости другие документы аналогичного содержания.

Техническое обеспечение АСУ ТП включает в себя полный набор средств автоматизации и вычислительной техники, используемых в системе. В состав технического обеспечения АСУ ТП должны также входить приборы и устройства, необходимые для наладки и проверки работоспособности ком-

плекса технических средств АСУ ТП, и запасные приборы. Технические характеристики используемых средств АСУ ТП должны допускать взаимозаменяемость одноименных технических средств, быть выбраны с учетом воздействий окружающей среды и обеспечить безопасную эксплуатацию системы.

Программное обеспечение входит в состав каждой АСУ ТП с цифровым вычислительным комплексом. При этом, если математическое обеспечение (совокупность математических методов и алгоритмов, используемых в АСУ ТП) фиксирует идейные аспекты организации управления, то построенное на его основе программное обеспечение представляет собой конкретную реализацию комплекса машинных алгоритмов функционирования системы управления. Понятие «программное обеспечение АСУ ТП» охватывает совокупность всех программных средств, участвующих в функционировании АСУ ТП.

Различают общее и специальное программное обеспечение. *Общее программное обеспечение* АСУ ТП – это часть программного обеспечения системы, представляющая собой совокупность программ, необходимых для функционирования собственного вычислительного комплекса вне зависимости от особенностей данной АСУ и конкретного набора выполняемых ею функций.

Специальное программное обеспечение – это часть ее программного обеспечения, разрабатываемая при создании конкретной системы и включающая в себя программы реализации управляющих, информационных и вспомогательных функций (обеспечение заданного функционирования технических средств системы, проверка правильности ввода информации, контроль за работой системы и т.п.); оно разрабатывается на базе и с использованием программ общего программного обеспечения.

По мере развития применения вычислительной техники в АСУ ТП их математическое обеспечение вместе с программным приобретает все большее значение и становится соизмеримым, а иногда и превышает по стоимости комплекс используемых технических средств.

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 технологическим процессом.

4.4. Принципы построения распределенных систем контроля и управления

При *централизованной структуре управления* все измерительные сигналы с управляемого объекта передаются в одну центральную ЭВМ, которая перерабатывает полученную информацию и выдает управляющие воздействия на объект. Один центральный процессор не только успешно заменил большое число местных терминалов в управлении производством, но и позволил строить системы, выполняющие неизмеримо более сложную обработку информации, в частности, расчеты по модели технологического процесса, оптимизацию режима производственного процесса, адаптивное управление, выявление и ликвидацию аварийных ситуаций и др.

Однако по мере усложнения технологических объектов, увеличения их единичной мощности, роста требований к повышению эффективности управления производством стало ясно, что централизованные системы обладают рядом существенных недостатков:

- недостаточной надежностью, поскольку с выходом из строя центрального вычислительного комплекса теряется большая часть функций системы;

- трудностью создания программного обеспечения, требующего разработки сложных многозадачных операционных систем реального времени, что приводит к снижению быстродействия системы;

- ограниченной гибкостью – наращивание функций в процессе развития системы возможно лишь до некоторого предела, определяемого производительностью ЭВМ, после чего резко возрастают трудности из-за небольшого объема оперативной памяти, процесса программирования и т.д.;

- сложностью процесса управления, обусловленной характером одновременно протекающих процессов в отдельных технологических агрегатах и последовательным (поочередным) обслуживанием их центральной ЭВМ, что порождает проблему увязки взаимодействия отдельных прикладных программ, снижает оперативность управления и другие показатели.

В начале 1970-х гг. появились экономичные средства обработки данных – микропроцессоры и микроЭВМ. Микропроцессоры стали вводить в состав отдельных средств автоматики и контроля, повышая возможности этих средств по обработке данных или, как принято говорить, их интеллект. Таким образом, разгружались ЭВМ, а автономность периферийных устройств возрастала. Если прежде аналоговые сигналы преобразовывались в цифровую форму, как правило, только для ввода в ЭВМ, то теперь цифровые сигналы вырабатываются с помощью аналоговых преобразователей на микросхемах непосредственно возле датчиков, и это дало возможность не только обрабатывать сигналы с помощью цифровых устройств, но и передавать их от одного устройства к другому в цифровой форме, что помимо всего прочего повысило помехозащищенность.

АСУ ТП новой архитектуры, предусматривающей цифровую связь между отдельными устройствами обработки данных, получили название *децентрализованных* или *распределенных*. Таким образом, *распределенной АСУ ТП* называется система, в которой несколько взаимосвязанных процессоров выполняют различные функции. Из-за факта взаимной связи процессоров вытекает наличие в такой АСУ сети передач данных.

Принцип построения многопроцессорных систем с распределенной архитектурой базируется на функциональной и топологической децентрализации.

Функциональная децентрализация – это разделение сложного процесса или функции на простые (меньшие) части – процессы или функции по функциональному признаку. Например, анализ базовых технологий в цветной металлургии позволил выделить следующий состав функциональных задач: измерение и сбор информации, первичное преобразование информации, регистрация, сигнализация об аварийных и опасных отклонениях, формирование управляющих воздействий, идентификация и т.д.

Топологическая децентрализация предполагает пространственное распределение микропроцессоров (микроЭВМ) в соответствии с управляемым технологическим процессом (например, базовые установки с микроЭВМ устанавливаются ближе к датчикам и исполнительным механизмам). В топологической оптимальной распределенной многопроцессорной системе число и места установки микроЭВМ выбирают так, чтобы минимизировать суммарную длину кабельных линий связи.

Как правило, на практике функциональная оптимальная децентрализация не совпадает с оптимальной технологией. Из-за высокой стоимости и дефицитности кабельной продукции часто выгоднее оказывается топологическая децентрализация.

Распределенные многопроцессорные системы с точки зрения подключения микроЭВМ имеют три базовых структуры:

1. *Радиальная звездообразная* ([рис. 4.3](#)). В такой системе весь обмен данными идет через центральную микроЭВМ. Она координирует работу машин-сателлитов и осуществляет обмен информацией между ними. Достоинство радиальной структуры состоит в легкости расширения (нужно изменить программное обеспечение только центральной машины) и независимости работы машин-сателлитов, что упрощает взаимодействие. Недостатком является трудность взаимодействия сателлитов.

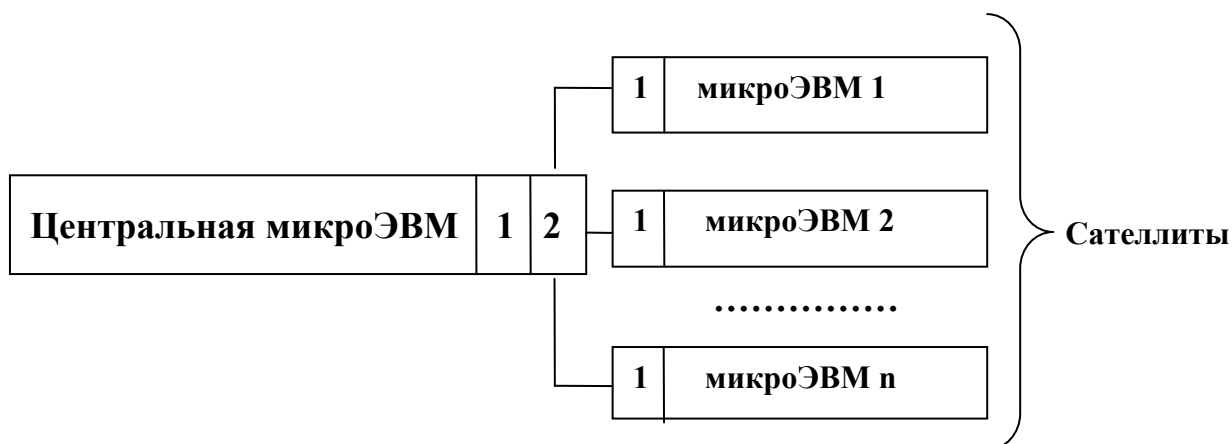


Рис. 4.3. Звездообразная структура локальной вычислительной сети микроЭВМ:
1 – сетевой адаптер (устройство сопряжения); 2 – узел коммутации

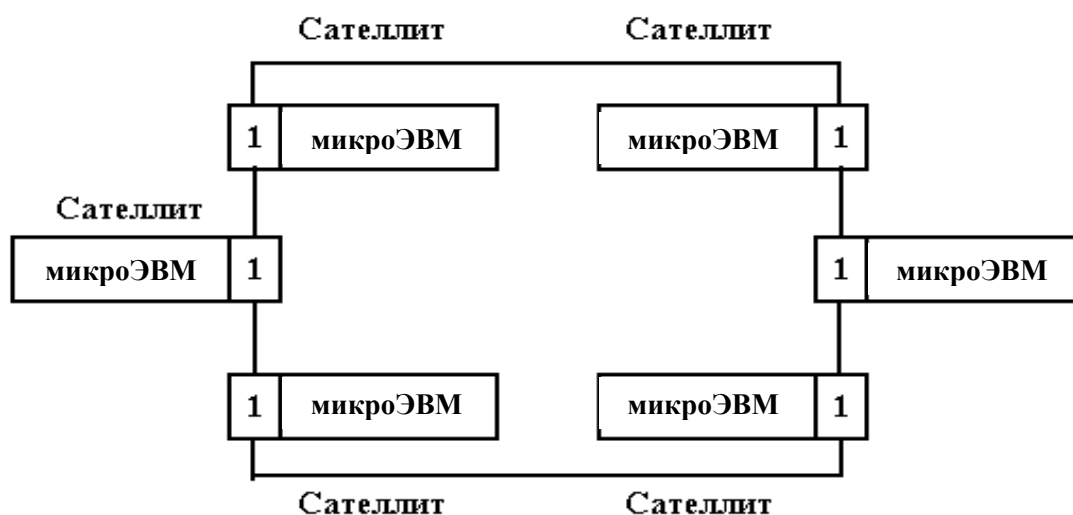


Рис. 4.4. Кольцевая структура локальной вычислительной сети микроЭВМ: 1 – сетевой адаптер

2. *Кольцевая структура* (рис. 4.4). Она позволяет взаимодействовать сателлитам и использовать свободные ресурсы соседних микроЭВМ. Недостатками такой структуры являются сложность программного обеспечения (сложность взаимодействия) и необходимость при расширении кольца менять ПО каждой машины сателлита.

3. *Магистральная, или шинная* (рис. 4.5). При такой структуре данные, передаваемые любой микроЭВМ, равнодоступны для остальных микроЭВМ.

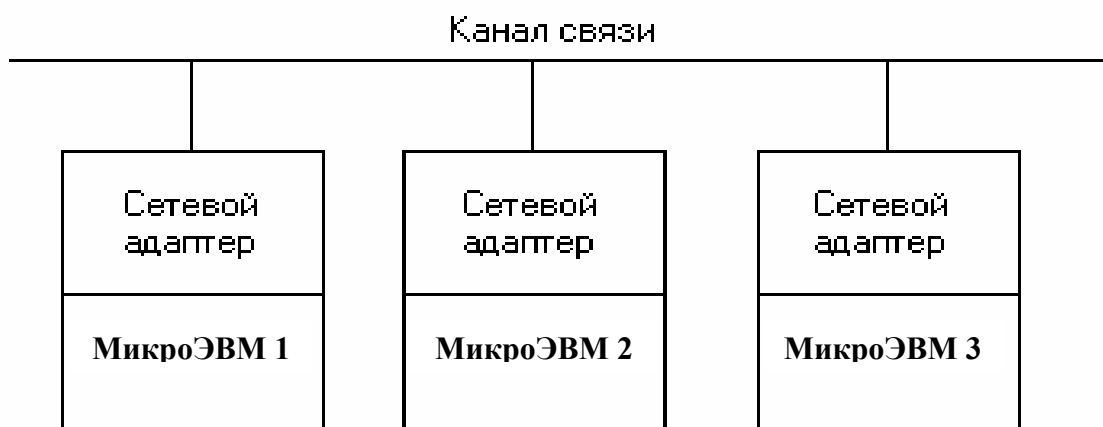


Рис. 4.5. Магистральная структура локальной вычислительной сети микроЭВМ

В качестве канала связи в сети используют, как правило, последовательный интерфейс. В них для передачи электрических сигналов применяют пары для скрученных проводов, коаксиальные и волокно-оптические кабели.

4.5. Операторские пункты управления в АСУ ТП

В состав АСУ ТП централизованной и распределенной структур входят *операторские пункты управления* (ОПУ), представляющие собой комплекс помещений для работы оператора системы управления технологического объекта управления (ТОУ) и размещения операторского оборудования (щиты, пульта, панели управления и т.п.).

Помещение ОПУ условно подразделяют на операторский и аппаратный залы. *Операторский зал* представляет собой зону активной работы оператора по управлению ТОУ. В этом зале располагается основная часть операторского оборудования. В *аппаратном зале* сосредоточены технические средства АСУ ТП: устройства связи с объектом, управляющие вычислительные комплексы, цифропечатающие устройства и т.п.

ОПУ оснащают наборами операторского оборудования, основу которого составляют щиты, пульта, приборные панели. Однако широкое применение микроЭВМ и микропроцессоров позволило во многом заменить щитовые приборы в ОПУ на электронно-лучевые индикаторы или дисплеи. Характерной особенностью этого операторского оборудования, созданного в 1980-е гг., является уменьшение сенсорно-моторных полей рабочих мест операторов, минимизация количества и размеров используемых технических средств автома-

тизации, сокращение или даже полное исчезновение щитовых панелей, щитовых приборов и регуляторов.

Распространенной компоновкой ОПУ является изолированное расположение операторского и аппаратного залов на одном этаже. Функциональную изоляцию залов подкрепляют чаще всего сооружением капитальных стен-перегородок или выгораживанием операторской зоны с помощью щитов контроля и управления. Такое конструктивное оформление ОПУ удобно как для оператора, так и для персонала, обслуживающего технические средства. Его целесообразно применять для АСУ ТП любой информационной мощности.

4.6. Представление информации на видеотерминалах и программное обеспечение ЭВМ для визуализации процессов

Функционирование АСУ ТП связано с необходимостью получения и представления в удобной для восприятия форме информации о ходе технологического процесса. Для создания таких систем используются компьютеры, связанные информационными каналами с системами управления оборудованием, и специальное программное обеспечение, позволяющее обработать полученную информацию и представить результаты в наиболее удобном и наглядном виде.

В современных АСУ ТП главным средством представления информации становятся экраны дисплеев, снабженных клавиатурой для формирования запросов и команд и связанных с УВМ и УВК. Для этого используют как монохроматические (черно-белые) дисплеи, выводящие на экран алфавитно-цифровые данные, так и цветные графические дисплеи с высокой разрешающей способностью. При этом из-за ограниченности размеров экранов дисплея возникает задача разбиения информационной модели ТОУ на функционально соподчиненные видеокadres (видеопрограммы) более мелких участков объекта управления или фрагментов АСУ. Для решения этой задачи применяют так называемые «видеоокна» и иерархическую систему видеокadres.

«Видеоокно» – это прямоугольный участок экрана дисплея, в котором на фоне укрупненной видеокартинки представляется разнохарактерная информация об отдельных более мелких фрагментах этой картины. Например, при изображении на экране дисплея мнемосхемы всего ТОУ в «видеоокне» демонстрируют графики переходных процессов отдельных АСР, цифровые значения сигналов, тренды некоторых координат и т.п. «Видеоокно» допускает представление информации в форме таблиц, графиков, мнемосхем, текстовых сообщений. В случае необходимости размеры «видеоокна» можно увеличить до размеров экрана дисплея.

Иерархическая система видеокадров – это последовательность соподчиненных видеопрограмм некоторой видеокартины, спроектированных по принципу от «общего к частному». При таком способе представления информации оператор вызывает на экран дисплея вначале обзорный видеокадр, охватывающий всю укрупненную видеокартину. Затем, после анализа этой обзорной информации, оператор вызывает на экран этого же дисплея тот или иной соподчиненный видеокадр, на котором более детально изображен отдельный фрагмент видеокартины. При наличии в АСУ ТП нескольких резервных дисплеев допускается одновременное представление на разных экранах как видеокартины, так и ее отдельных фрагментов. После анализа фрагмента видеокартины оператор может перейти к рассмотрению других фрагментов того же уровня иерархии или вызвать на экран еще более мелкий участок анализируемого видеокадра. Глубина разбиения всей обзорной видеокартины на соподчиненные видеокадры устанавливается при проектировании СОИ.

Вызов тех или иных видеокадров оператор производит с помощью алфавитно-цифровой или предметно-указательной клавиатуры дисплея, световых карандашей или тактильных воздействий – касания пальцами определенных символов или точек видеокартины на экране.

Типовые видеокадры содержат обычно графическую и текстовую информацию о состоянии ТОУ, АСУ или их отдельных участков, частей. *Графическая видеоинформация* чаще всего представляет собой изображение мнемосхем, графики изменений координат во времени (тренды), гистограммы, статические (заданные) и динамические циклограммы и др. К *текстовой и цифровой видеоинформации* относят сведения о технологическом регламенте, рекомендации оператору, таблицы данных нормальной и аварийной обстановки, состояния оборудования и т.п.

Для привлечения внимания оператора к графической и реже к текстовой видеоинформации широко используют мигание символов, изменение цвета и интенсивности окраски отдельных цифр, букв, изображений. Применяют перемещения и повороты символов на видеокадре.

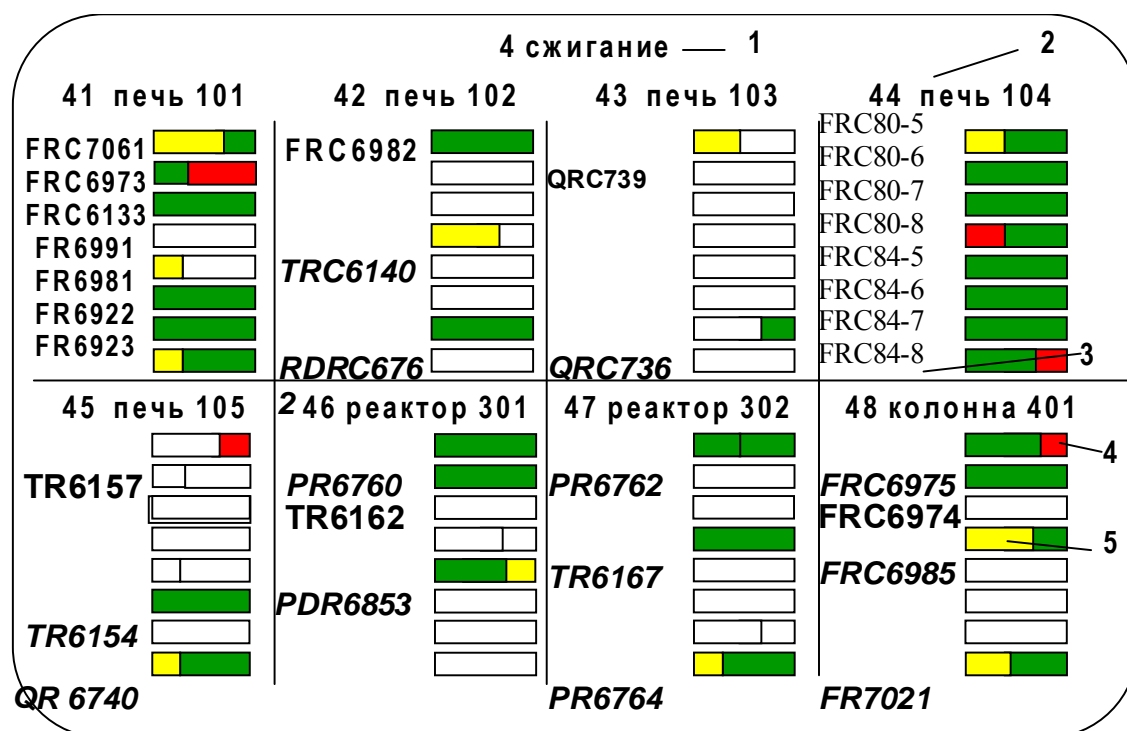


Рис. 4.6. Видеокадр с обзорной информацией по технологическому участку

Типовые обзорные и соподчиненные видеокадры представления графической информации о состоянии ТООУ даны на рис. 4.6. Так, на этом рисунке показан видеокадр с обзором состояния технологического участка сжигания полупродуктов, состоящего из пяти печей, двух реакторов и одной разделительной колонны. На каждом из этих аппаратов контролируют до 8 координат (расходы, температуры, давления, составы). Для каждой регулируемой координаты показаны в виде светящейся горизонтальной полосы ее наличие и относительная величина отклонения от заданного значения. Отрицательные отклонения координаты от задания в пределах технологического допуска представляются зеленой полосой слева (одинарная штриховка на рис. 4.6), положительные отклонения – зеленой полосой справа. Длина такой полосы характеризует величину относительного отклонения от задания. Отклонения координаты, превышающие допуск, высвечиваются желтым цветом (двойная штриховка на рис. 4.6). При возникновении аварийных отклонений координат желтый цвет полосы заменяется на красный (зачерненная полоса на рис. 4.6). На видеокадре приведены номер и название участка 1, номера и названия каждого аппарата 2, условные обозначения и номера контролируемых координат 3, а также значения аварийного 4 и нормального отклонений координаты 5.

Состояние каждой координаты отдельного аппарата участка сжигания может быть охарактеризовано видеокадром более низкой иерархии, содержащим графическую или цифровую информацию о ее изменении за несколько часов, смену, сутки. На [рис. 4.7](#) показано изменение расхода этана за смену. Видеокадр содержит информацию о номере, обозначении и названии координаты 1, графики координаты 2 и задания 3, а также дату и астрономическое время 4.

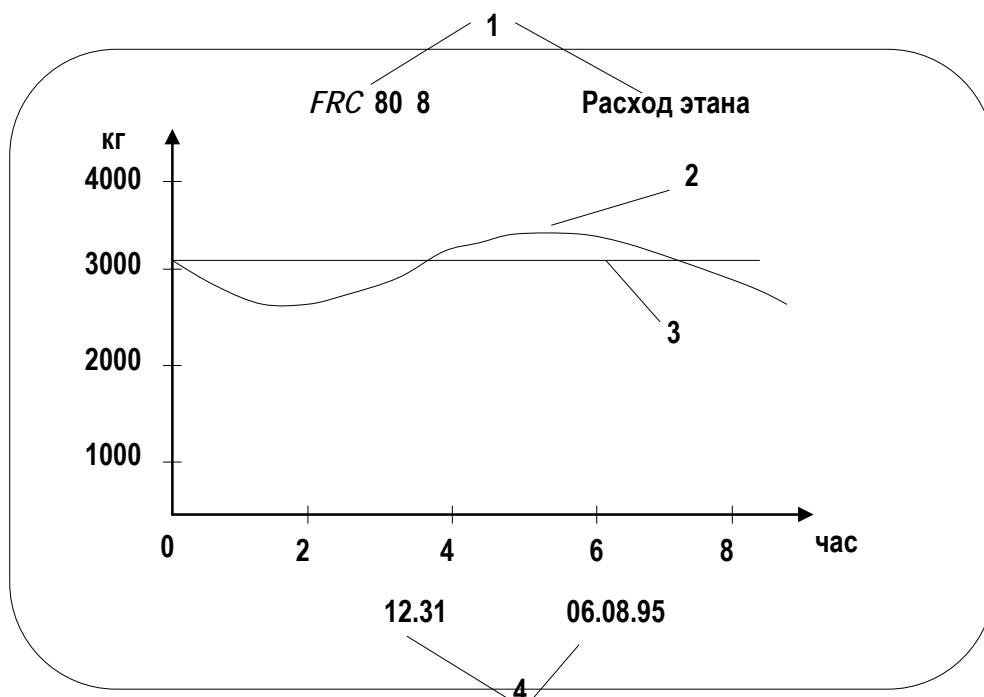


Рис. 4.7. Видеокадр с графиком изменения расхода этана

В состав программного обеспечения АСУ ТП, как правило, входит *пакет программ отображения*, с помощью которого изображение выводится на экран дисплея. Обновление изображения, отражающее состояние ТООУ, осуществляется циклическим опросом каналов связи.

Пакет программ отображения на экранах дисплеев, как правило, содержит средства формирования стандартных и нестандартных видеограмм. К *стандартным видеограммам* относят следующие виды отображений: графики изменения контролируемых величин во времени (период обновления обычно 2–60 с); изображения, имитирующие лицевые панели аналоговых регуляторов или приборов; изображения аналоговых, дискретных или расчетных координат в числовой форме или в виде гистограмм (для каждой координаты указывают имя, числовое значение, размерность, допустимые границы и величину отклонения от нормы), список текущих нарушений работы ТООУ.

4.7. АСУ ТП металлургического производства на примере системы управления процессом электролиза алюминия

Производительность электролизера, как следует из закона Фарадея, зависит от силы тока и выхода по току. Сила тока устанавливается при проектировании ванны и практически не изменяется. Значит, основным фактором, определяющим производительность ванны, является выход по току. Поэтому основная цель автоматизации – поддержание параметров работы ванны в таких пределах, которые обеспечивают максимальный выход по току при минимальном расходе электроэнергии и сырья.

Выход по току в общем случае зависит от двух основных факторов: эффективности использования тока и величины потерь металла в ванне. Рассмотрим влияние каждого фактора.

В промышленном электролизере основной ток проходит между анодом и катодом, и именно он определяет количество наработанного ванной алюминия. Однако имеют место и утечки тока: при нарушении изоляции между бортовым блоком и катодным кожухом и при растворении настыли часть тока проходит между анодами и бортовой футеровкой ванны. Изоляция бортового блока от кожуха нарушается, как правило, на старых электролизерах вследствие пропитки бортовых блоков электролитом и механического воздействия машин по обработке корки электролита.

При нарушении изоляции электролизера по отношению к земле или между ваннами ток может стекать с элементов его конструкции (ошиновка, катодный кожух, рифленки и пр.) на землю, обходить часть ванн и вновь возвращаться в цепь. Следует заметить, что все электролизеры по отношению к земле включены параллельно, и поэтому эквивалентное сопротивление их изоляции обычно не превышает нескольких омов, а на сериях, расположенных в одноэтажных корпусах, составляет лишь десятые доли ома. Отсюда ясно, что величина утечек тока может быть значительна; средние утечки тока на одноэтажных сериях могут достигать 0,1 % от силы тока серии, а на отдельных группах ванн и намного больше. Помимо ущерба от недовыработки металла, утечки тока разрушают подземные сооружения – трубопроводы, кабели, арматуру железобетонных конструкций и т.д. Для борьбы с утечками тока, прежде всего, необходим контроль за изоляцией серии.

Утечки тока имеют место и при несвоевременном снятии пены и накоплении ее в междуполюсном пространстве. Влияние этих утечек может уменьшить выход по току не более чем на 2 %.

Основной же причиной снижения выхода по току являются потери алюминия вследствие его растворения в электролите и последующего окисления анодными газами, кислородом воздуха, углеродом, компонентами электролита, а также других причин. По некоторым данным применительно к электролизерам с предварительно обожженными анодами снижение выхода

по току от окисления алюминия углекислым газом достигает 3–5 %; из-за взаимодействия алюминия с кислородом, углеродом и компонентами электролита и потерь с газами в виде фторида алюминия выход по току снижается еще на 1 %; окислительно-восстановительные реакции на электродах ванны и выделение примесей уменьшают этот показатель еще на 2 %, а ряд других причин – дополнительно еще на 1 %. Таким образом, общее снижение выхода по току может достигать 9–11 %. На отечественных заводах, оснащенных в основном электролизерами с самообжигающимися анодами, потери выхода по току составляют 11–18 %.

На величину выхода по току влияют многие технологические параметры. Отметим, что основными из них являются: температура и плотность тока в электролите, величина междуполюсного расстояния (МПР), состав электролита и конструкция ошиновки. Рассмотрим их с точки зрения возможности использования в качестве регулирующих параметров.

Влияние температуры электролита. Обычно считают, что повышение температуры электролита на 10 °С снижает выход по току на 2–4 %. С повышением температуры электролита потери металла возрастают, так как увеличивается растворимость алюминия в электролите, снижается вязкость расплава, вследствие чего повышаются скорость его циркуляции и перенос алюминия к аноду, где он и окисляется.

Влияние на величину потерь металла оказывает не столько температура электролита, сколько степень его перегрева относительно температуры плавления электролита. Промышленные электролиты кристаллизуются (плавятся) около 930 °С; если температура в ванне равна 960 °С, то перегрев составляет около 30 °С; если же температура электролита поднимается до 975 °С, то перегрев достигает 45 °С, или увеличивается на 50 %, в то время как фактическая температура возрастает только на 1,5 %. Пропорционально увеличению перегрева возрастают и все последствия горячего хода ванны; уменьшаются настывы, увеличивается растворение алюминия в электролите, повышается его науглероженность, растут потери газообразных фторидов и т.д. Однако слишком низкая температура электролита (ниже 950 °С) недопустима, так как при этом ухудшается растворимость глинозема в электролите и возрастает частота анодных эффектов, а вместе с ней и расход электроэнергии.

Расчеты и практические замеры температуры показывают, что изменение прихода мощности в ванну (путем изменения силы тока или напряжения) даже на 10 % в течение нескольких часов приводит лишь к незначительному ее изменению, соизмеримому с обычным дрейфом температуры, вызванным обработками корки электролита, выливкой металла, анодными эффектами и пр.

Учитывая большую зависимость выхода по току от температуры расплава, казалось бы, что ее и следует принять за регулируемый параметр. Однако организация постоянного измерения температуры расплава наталкивается на ряд непреодолимых трудностей, главной из которых является раство-

рение в электролите практически всех материалов, идущих на изготовление чехлов для термопар. На практике температура электролита контролируется эпизодически переносными термопарами с соблюдением особых мер, повышающих точность измерений, поэтому использовать температуру как параметр для регулирования, к сожалению, не представляется возможным.

Влияние катодной плотности тока. С увеличением катодной плотности тока выход по току, при прочих неизменных условиях, возрастает. Это объясняется тем, что абсолютная величина потерь металла при электролизе не зависит от плотности тока, но с ее повышением выделение алюминия на катоде возрастает, а величина потерь металла остается неизменной, благодаря чему наблюдается рост выхода по току. Плотность тока определяется конструктивными размерами электролизера и силой тока серии, т.е. является величиной практически постоянной, и поэтому не может быть использована для регулирования электролизера.

Влияние междуполюсного расстояния. От расстояния между электродами, т.е. между подошвой анода и «зеркалом» металла, в значительной степени зависит выход по току. При прочих неизменных условиях выход по току возрастает с увеличением МПР и падает с его уменьшением.

На промышленных электролизерах МПР находится в пределах 4,5–5,0 см, но с увеличением МПР выше оптимального значения выход по току растет незначительно, а расход электроэнергии и перегрев электролита повышаются в прямой пропорции, снижая производительность электролизера. Поскольку МПР легко изменяется перемещением анода, этот параметр может быть использован в качестве регулирующего в системах АСУ ТП.

Влияние состава электролита. Влияние химического состава электролита на выход по току определяется свойствами компонентов, входящих в его состав. Наиболее существенное влияние на выход по току оказывают такие свойства электролита, как температура его кристаллизации, растворимость в нем глинозема и алюминия, а также электрическая проводимость. Чем ниже температура плавления электролита, тем при более низкой температуре можно вести процесс электролиза с большим выходом по току. Однако невозможность непрерывного измерения состава электролита не позволяет использовать его в качестве регулирующего параметра.

Эффективность работы электролизера в значительной степени зависит от расхода электроэнергии на производство 1 т алюминия, поскольку в себестоимости алюминия затраты на электроэнергию нередко достигают 30–45 %. Поэтому одна из основных задач автоматизации производства – поддержание на ванне оптимального напряжения, так как снижение, например, величины МПР приведет к уменьшению выхода по току и потере производительности.

Расход электроэнергии определяется средним напряжением $U_{\text{ср}}$, В, которое в общем виде может быть выражено

$$U_{\text{ср}} = E_0 + R_3 I,$$

где E_0 – напряжение поляризации с учетом перенапряжения на угольном аноде, В; R_3 – омическое падение напряжения во всех элементах ванны – электролите, анодном и катодном узлах, ошиновке и пр.; I – сила тока, А.

Напряжение на электролизере обуславливает расход электроэнергии на производство алюминия.

Таким образом, единственным параметром, в наибольшей степени определяющим выход по току и расход электроэнергии, является значение МПР, которое измерить непосредственно не представляется возможным. Если же принять, что обратная ЭДС, падение напряжения в катоде и ошиновке – величины постоянные, а изменения падения напряжения в аноде (вследствие перестановки штырей) могут быть учтены, то электрическое сопротивление ванны, не зависящее от колебаний силы тока серии, адекватно отражает значение МПР.

В общем виде сопротивление электролизера R_3 равно

$$R_3 = (U_p - E_0) / I,$$

где U_p – рабочее напряжение ванны, В; E_0 – обратная ЭДС, В; I – сила тока, А.

Значения U_p и I могут быть измерены, а среднее значение E_0 может быть вычислено. Прибор, автоматически решающий вышеуказанное уравнение, строился ранее на базе автоматического потенциометра, а в настоящее время изготавливается с использованием элементов полупроводниковой электроники. Эти приборы хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации и применяются в настоящее время на системах автоматического регулирования всех типов.

Системы, автоматически измеряющие и поддерживающие заданное значение R_3 разработаны НПО «Союзцветметавтоматика» и успешно эксплуатируются до сих пор на ряде алюминиевых заводов СНГ, обеспечивая стабилизацию технологического состояния электролизеров.

Существенным недостатком этого способа регулирования ванн является априорное предположение, что значение E_0 и сопротивление электролита не меняются во времени. Фактически же на величины обратной ЭДС, электрическое сопротивление ванны и, следовательно, на напряжение на ней оказывает влияние концентрация глинозема в электролите (рис. 4.8). Эта зависимость особенно резко проявляется у электролизеров, питание глиноземом которых осуществляется путем разрушения корки электролита. После очередной обработки ванны концентрация глинозема в электролите резко возрастает, а затем монотонно падает до следующей обработки или до возникновения анодного эффекта. При этом сопротивление электролита, а следовательно, и падение напряжения в нем сначала быстро снижаются, затем изменяются с небольшой скоростью и при значительном обеднении электролита

глиноземом – резко возрастают, вплоть до возникновения анодного эффекта, при котором сопротивление ванны увеличивается в десятки раз. Это приводит к ухудшению качества регулирования.

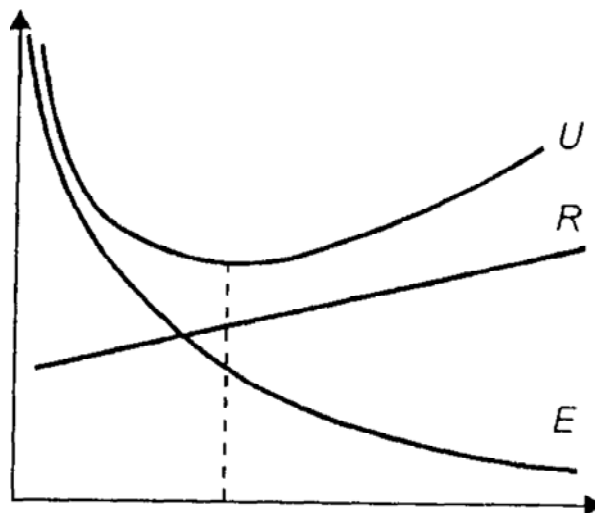


Рис. 4.8. Зависимость напряжения, сопротивления и обратной ЭДС от концентрации глинозема

Положение коренным образом меняется, если питание ванн глиноземом осуществляется непрерывно с помощью системы автоматической подачи глинозема (АПГ), которая позволяет поддерживать концентрацию глинозема в пределах 2,5–3,0 %. Поддержание концентрации глинозема в оптимальных границах позволяет снизить вероятность возникновения анодных эффектов. Как показывает зарубежный опыт, частота анодных эффектов в сутки на современных ваннах поддерживается в пределах 0,1–0,15 против 2–3 на отечественных ваннах, что дает возможность резко снизить расход электроэнергии.

Решающее значение на выход по току оказывает и электромагнитная стабильность электролизера, т.е. отсутствие волн на поверхности жидкого металла. Это возможно обеспечить лишь при условии стабильного тока серии. Вот почему в последние годы стабилизации тока уделяется повышенное внимание, несмотря на то, что это снижает коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

Поэтому передовая технология производства алюминия базируется в настоящее время на электролизерах с обожженными анодами на силу тока 280–300 кА, для которых определяющими параметрами являются: оптимальная конструкция ошиновки, минимизирующая вредное влияние магнитных полей на процесс электролиза; стабилизация тока серии и МПР; поддержание заданного значения концентрации глинозема в электролите. Применение стойких материалов в катодном узле электролизера и точное соблюдение регламента обслуживания автоматизированных электролизеров обеспечивают выход по току на уровне 94–95 % и расход электроэнергии на уровне 13,2–13,5 тыс. кВт·ч/т алюминия. В настоящее время ведущими специалистами в области автоматизации электролиза алюминия рассматриваются во-

просы модернизации действующих на отечественных заводах систем и совершенствования блок-схем будущих систем АСУ ТП.

Блок-схемы систем автоматического регулирования алюминиевых электролизеров имеют некоторые особенности (рис. 4.9). Изменения значення МПР происходят медленно, так что нет необходимости постоянно следить за величиной R_z , достаточно проводить эти измерения и регулировать МПР один или два раза в час. Поэтому один регулятор с помощью оббегающего устройства может быть использован для ванн корпуса. Именно по такому принципу строились первые модификации систем автоматизации –

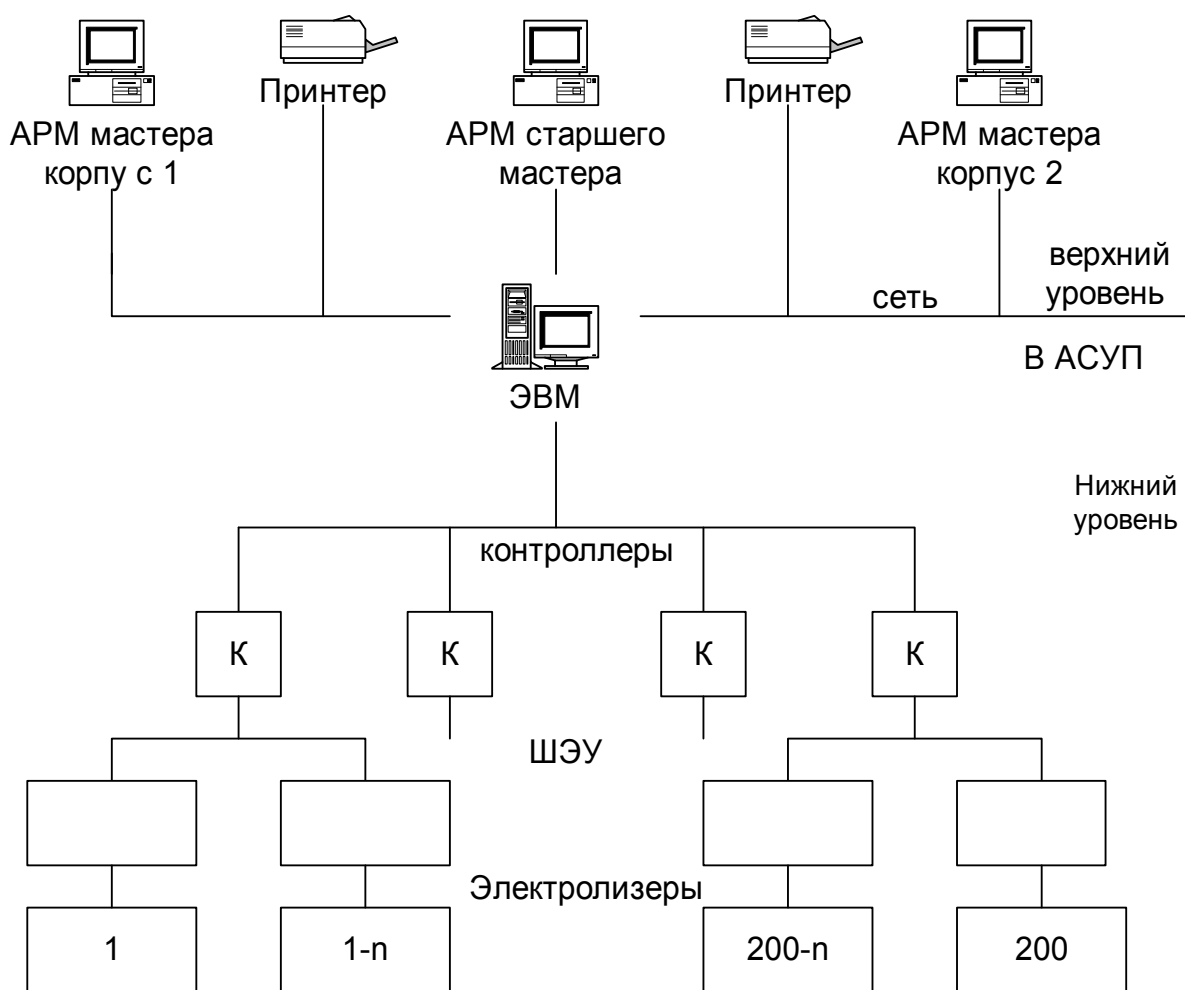


Рис. 4.9. Иерархическая структура АСУ ТП электролиза алюминия: АРМ – автоматизированное рабочее место; ШЭУ – шкаф управления электролизером

КУА-670 «Алюминий-1», «Алюминий-2» и «Алюминий-3».

Более совершенные системы типа «Электролиз» строятся многоуровневыми. Развитие и совершенствование средств полупроводниковой техники позволили в качестве первого уровня использовать один регулятор (контроллер) для обслуживания одного или двух электролизеров, которые размещаются в непосредственной близости от ванн и осуществляют измерение и

управление МПР и системами АПГ без вмешательства головного компьютера, установленного на центральном пункте управления (ЦПУ), который собирает и обрабатывает технологическую информацию о состоянии всех ванн корпуса. Комплекс средств, расположенных на ЦПУ, представляет собой второй уровень, который, в свою очередь, передает необходимые данные в вычислительный центр завода – третий уровень системы управления производством. На заводах России реализуются различные конфигурации системы АСУ ТП, которые имеют достаточно высокую надежность в работе, сравнительно низкие эксплуатационные затраты, но, к сожалению, требуют значительных капитальных вложений.

5. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

5.1. Типы АСУ, их назначение, цели и функции

Управление производством можно разделить на две области: управление организационно-экономическими процессами и управление технологическими процессами. Эти области различаются характером объектов управления: если в первой области объектом управления являются коллективы людей, занятых в сфере материального производства и обслуживания, то во второй – технологические процессы. Соответственно, различают два основных типа АСУ: автоматизированные системы организационно-экономического, или административного, управления (АСУП); автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Как правило, в АСУП процессы управления весьма инерционны. Задержка выдачи управляющих воздействий, обусловленная затратами на обработку информации в управляющем устройстве (ЭВМ), мало или совсем не влияет на качество работы. Инерционность АСУП позволяет использовать документную форму представления входной информации и дискретный ввод ее в машину. В документной форме оформляются и результаты обработки информации, которые затем направляются в соответствующие подразделения и службы. Документный дискретный характер информации, вводимой в машину и получаемой на ее выходе, определяет то, что режимы работы ЭВМ в таких системах практически не отличаются от режимов работы универсальных ЭВМ.

К АСУП относятся различные отраслевые, территориальные АСУ, АСУ производственными объединениями, предприятиями и др.

Области использования ЭВМ существенно влияют на режимы их работы в системе управления, что обусловлено не только различием в классах решаемых задач, но и различием динамических характеристик систем в каждой из областей.

К АСУ ТП относятся такие системы, которым свойственно управление объектами, быстро меняющими свое состояние (управление процессом резания, управление плавкой металла и др.). Для получения необходимых динамических характеристик дискретный документный ввод и вывод информации в АСУ ТП в большинстве случаев неприемлем. Кроме того, сложность современных технических систем обуславливает невозможность в ограниченный срок охватить их во всех деталях (измерять, наблюдать и воздействовать на все переменные одновременно).

Эти задачи целесообразно возложить также на ЭВМ, для чего необходимо обеспечить непосредственную физическую связь ее с объектом управ-

ления. Связь может быть как двусторонней, так и односторонней. Для осуществления связи с объектом в ЭВМ включают специальные аппаратные средства, обеспечивающие получение, преобразование и передачу информации объекта к машине и обратно – это так называемые устройства связи с объектом (УСО).

На практике часто приходится иметь дело с системами, где комбинируются функции, характерные как для АСУП, так и для АСУ ТП. В последние годы наметилась тенденция слияния АСУП и АСУ ТП в единые интегрированные системы управления, позволяющие обрабатывать всю имеющуюся на предприятии информацию, т.е. организовать производственный процесс, полностью управляемый вычислительным комплексом.

5.2. Состав АСУП

АСУП органически включает в себя интегрированные системы обработки данных, главной *целью* которых является автоматизация информационных процессов на предприятии и усовершенствование формы и организации их выполнения.

Объект управления – это совокупность процессов, свойственных данному предприятию, по преобразованию ресурсов (материалов, полуфабрикатов, инструмента, оснастки, оборудования, энергетических, трудовых и финансовых и др.) в готовую продукцию.

Сложность управления в АСУП обусловлена следующими причинами: большим числом разнородных элементов; высокой степенью их взаимосвязи в процессе производства; неопределенностью результатов выполнения многих процессов (брак, сбои, несвоевременные поставки, нерегулярность спроса и др.); тем, что объектами и субъектами управления на предприятии являются люди, а управление их поведением не столь очевидно и прямолинейно; постоянными изменениями, происходящими на предприятии, т.е. нестационарностью.

Создание и внедрение АСУП привело к тому, что информационным процессам, их организации, проектированию, подготовке и выполнению уделяется такое же внимание, как и производственным. В структуре управления предприятием имеет место специальное подразделение – информационно-вычислительный центр (ИВЦ), ответственный за упорядочение, регламентацию и непосредственное выполнение информационных процессов на предприятии ([рис. 5.1](#)). В структуре АСУП различают функциональные и обеспечивающие подсистемы. *Подсистемой* называют часть АСУ, выделенную по функциональному или структурному признаку, отвечающему конкретным целям и задачам.

Функциональные подсистемы представляют собой комплекс административных, организационных и экономико-математических методов, слу-

жащих для решения задач планирования, учёта и анализа показателей для принятия управленческих решений. Состав и наименование функциональных подсистем не является обязательным даже для однотипных АСУ, а зависит от конкретного объекта управления.

Обеспечивающие подсистемы выполняют все информационные процессы в АСУ и ответственны за их подготовку и организацию. Чаще всего выделяют подсистемы информационного, математического, программного, технического, организационного обеспечения.

Информационное обеспечение АСУ регламентирует потоки и подготовку информации, организацию и выполнение организационных процессов в ИВЦ, т.е. представляет собой совокупность единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации, унифицированных систем документации и массивов информации, используемых в системах. Определение состава информационного обеспечения является одной из главных задач проектирования конкретной системы. Информационное обеспечение АСУ составляют входная информация, характеризующая состояние объекта управления (ОУ), внешней среды, определяющая дальнейшее поведение системы; выходная информация, представляющая собой продукт решения задач и определяющая дальнейшее поведение ОУ; накапливаемые в процессе работы системы данные, необходимые для расширения круга решаемых задач; нормативные и справочные данные, которые составляют информационный базис системы.

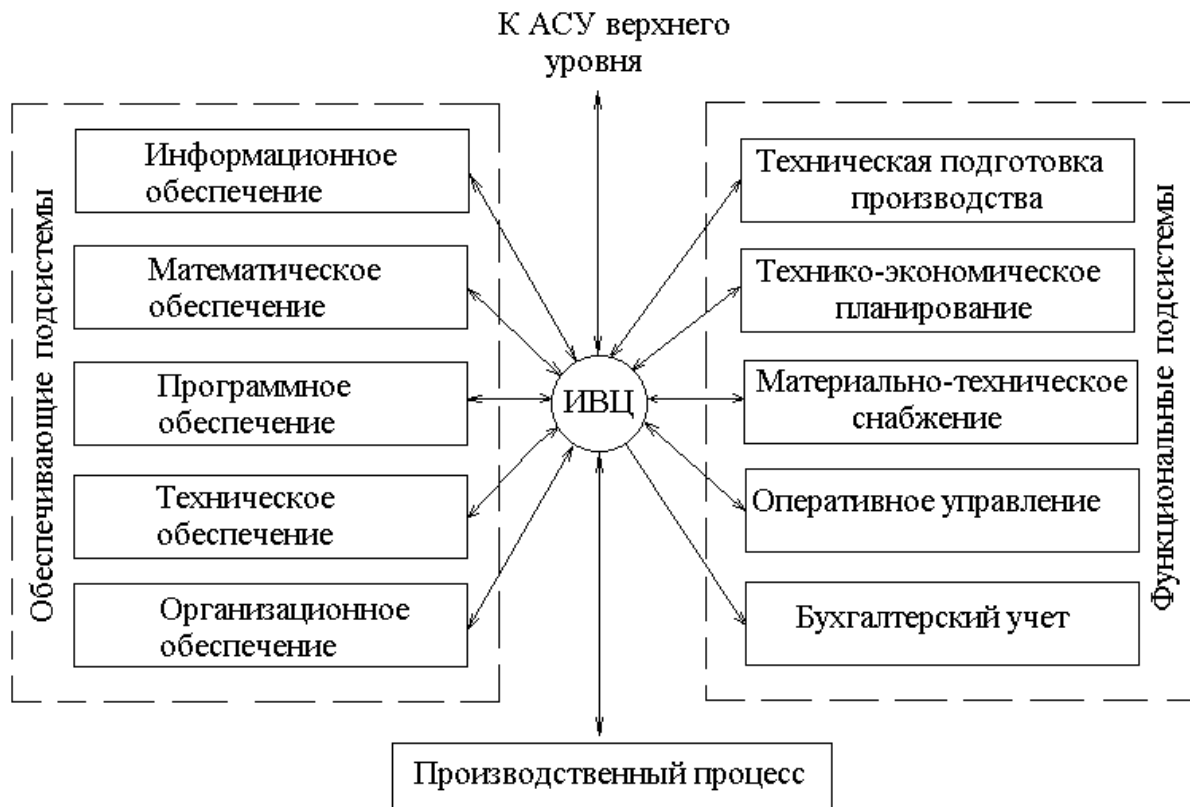


Рис. 5.1. Структурная схема состава АСУП

Подсистема информационного обеспечения должна обеспечивать другие подсистемы оптимальным объемом информации в требуемые сроки. Поэтому такие понятия информации, как достоверность, точность, полезность, полнота, при разработке информационного обеспечения являются определяющими. Многократное использование информации при однократном ее вводе – отличительная особенность АСУ. Это обусловлено необходимостью обеспечения одной и той же информацией различных подсистем. Подсистема информационного обеспечения должна обладать определенной гибкостью, возможностью быстрой перестройки в соответствии с изменившимися условиями работы системы под влиянием внешних возмущений или в связи с аварийными ситуациями.

Так, информационное обеспечение гибкой производственной системы (ГПС) состоит из пакетов управляющих программ для станка с ЧПУ, для транспортных средств и роботов, для накопительных систем заготовок, деталей, инструмента, оснастки и др., оперативного информационного фонда, содержащего данные о состоянии производственного процесса в ГПС и его технических средств (местонахождении и состоянии деталей, инструмента, спутников, приспособлений в текущий момент времени и др.).

Математическое обеспечение АСУ представляет собой совокупность математических методов, моделей, алгоритмов для решения задач управления в соответствующих функциональных подсистемах и выполнения соответствующих информационных процессов в АСУ, обработки данных с применением вычислительной техники.

Техническое обеспечение АСУ – это комплекс технических средств, предназначенных для автоматизации выполнения основных информационных процессов (сбор, передача, обработка информации, вывод и отображение данных), а также инструкции по их эксплуатации и обеспечению надежного функционирования. Основу технических средств всякой АСУ составляет ЭВМ. Основные требования к вычислительному комплексу – обработка данных с заданной точностью, необходимой частотой, выдача результатов в нужные моменты времени. В АСУ применяют как ЭВМ общего назначения, так и специализированные.

Организационное обеспечение регламентирует действия каждого работника управления, каждого рабочего по отношению к системе информации и всей схеме принятия решений в АСУ.

5.3. Современные тенденции в построении АСУП

В настоящее время при создании АСУП и АСУ ТП во многих металлургических производствах применяют новые информационные технологии (ИТ).

Под *информационной технологией* понимают систему научных и инженерных знаний, а также методов использования вычислительной техники, которая применяется для создания, сбора, передачи, обработки, хранения информации и её использования с целью увеличения эффективности этой системы. В основном под ИТ подразумевают компьютерные безбумажные технологии, ориентированные на конкретные предметные области деятельности.

Принципиальное отличие ИТ от производственной состоит в том, что в первом случае технология не может быть непрерывной, так как она соединяет работу рутинного типа и работу творческую, не поддающуюся пока формализации, во втором случае функция производства непрерывна и отражает строгую последовательность операций. ИТ сферы управления предъявляют самые высокие требования к человеческому фактору (квалификация, профессиональные перспективы, содержание труда).

С середины 1970-х гг. получили развитие АСУ с возможностью аналитической работы. В основу АСУ была положена гипотеза, согласно которой задачи анализа и принятия решений относились к классу формализуемых, поддающихся математическому моделированию. Однако с конца 1970-х гг. внедрение подобных систем разочаровало, оказалось, что применяемые экономико-математические модели имеют весьма ограниченные возможности, аналитическая работа и процесс принятия решений происходит в отрыве от реальной ситуации и не подкреплён коммуникативным процессом формирования. Для каждой новой задачи требуется новая математическая модель.

Для создания АСУ объектами цветной металлургии разрабатываются имитационные модели управления, внедрение которых повышает технико-экономические показатели предприятия. На основе автоматизированных систем имитационного управления могут строиться автоматизированные системы супервизорного управления, системы управления, позволяющие реализовать режим советчика при управлении объектами цветной металлургии, системы диагностики и прогнозирования [\[20\]](#).

Для различных целей и задач производства существуют следующие пакеты программ:

1. *Текстовая обработка.* Основным программным пакетом текстовой обработки должен служить пакет унифицированного типа с набором функций: занесение текста; изменение текстовых фрагментов; изменения порядка следования предложений, параграфов; форматирование текста.

2. *Табличная обработка.* Основа табличной обработки – динамическая таблица, каждый элемент которой в конечном счете определяет некоторое

значение. Вычисление значений элементов носит не алгоритмический характер, поскольку явно задаются только необходимые действия.

3. *Графическая обработка.* Для реализации графической обработки служит пакет деловой графики. Самым важным требованием к такому пакету является оперативность построения графика, позволяющая реализовать принцип «что, если».

4. *Накопление и хранение информации.* Применение программных средств данного типа диктует необходимость разработки нескольких систем управления базами данных (СУБД), отличающихся друг от друга функциональными возможностями и предназначенных для широкого круга пользователей. Наиболее простым типом СУБД является пакет обработки файлов, позволяющий форматировать записи и выдавать отчеты, а также пакет реляционной СУБД, оснащенной командным языком. Пакет должен обеспечивать ввод и редактирование данных по шаблону, широкие возможности сортировки, обладать гибким языком запросов, мощным генератором запроса.

5. *Статистическая обработка.* Пакеты статической обработки позволяют изучать тенденции изменения числовых данных и оценивать уровень достоверности результатов (использовать метод одно- и двухфазного анализа, статистические показатели, частотное распределение, корреляционный и регрессионный анализ).

6. *Коммуникация.* Программные средства коммуникаций обеспечивают возможность взаимодействия персонального компьютера с другими вычислительными машинами, компонентами локальных и распределительных систем, а также с дополнительным оборудованием.

Принципиальное отличие *концепции новой информационной технологии* (КНИТ) от существующей состоит не только в автоматизации процессов изменения формы или листа положения информации, но и в изменении её содержания. Выделяют две стратегии внедрения новой информационной технологии (НИТ) в локальную информационную структуру:

1. ИТ приспосабливается к организационной структуре в её существующем виде, и происходит лишь локальная модернизация сложившихся методов работы. Коммуникации развиты слабо, рационализация касается только рабочего места. Происходит слияние функций сбора и обработки информации (физический поток документов) с функцией принятия решений (информационный поток).

2. Организационная структура модернизируется таким образом, чтобы информационная технология дала наибольший эффект, основной стратегией является максимальное развитие коммуникаций и разработка новых организационных взаимосвязей. Рациональное распределение архивных данных уменьшает объём циркулирующей по системным каналам информации, и достигается сбалансирование каждого управленческого уровня.

Первая стратегия сводит к минимуму степень риска от её внедрения. При внедрении второго типа риски очень значительны.

Для НИТ характерны: работа в режиме манипулирования, а не программирования (концепция «видеть – действовать», а не «знать – помнить»); сквозная информационная поддержка на всех этапах прохождения информации на основе интегрированной базы данных; безбумажный процесс обработки документа; интерактивный (диалоговый) режим решения задачи с широкими возможностями для пользователя; возможности коллективного исполнения документов на основе объединенных коммуникаций; возможность адаптивной перестройки формы и способа представления информации в процессе решения задач.

5.4. Интегрированные АСУ на промышленных предприятиях

Предприятие – это обоснованная социально-экономическая единица народного хозяйства, занятая выпуском продукции и характеризующаяся производственно-техническим, организационным, экономическим единством и оперативно-хозяйственной самостоятельностью. Предприятие состоит из ряда подразделений основного производства (цехов) и вспомогательных производств.

Предприятие как объект управления имеет многочисленные внешние и внутренние связи. Внешние связи: денежные средства, снабжение, сбыт и др. Внутренние связи определяются совокупностью производственных технико-экономических, административно-хозяйственных и общественно-социальных отношений на предприятии.

АСУ для управления предприятием представляет собой совокупность систем различной сложности, объединенных в единую иерархическую автоматизированную систему управления. При этом системы нижнего уровня подчинены системам более высокого уровня.

Уровни иерархии распределены следующим образом. В первый (или нижний) уровень входят установки и агрегаты. Его задача — управление технологическим процессом. Во второй (или средний) уровень входят цехи, производства, заводы. Его задача – координация работы отдельных производственных единиц. В третий (или верхний) уровень входит руководство предприятиями. Его задача – планирование и руководство производственной деятельностью предприятия.

АСУ – это автоматизированная система управления предприятием на его верхнем уровне, если речь идет об автоматизации предприятия. Автоматизированную систему предприятия в целом, включая нижние уровни иерархии, называют интегрированной АСУ предприятием.

Основные *формы интегрирования* следующие:

функциональная, обеспечивающая единство целей и взаимодействие

реализуемых системой функций;

информационная, обеспечивающая возможность создания банков данных на основе единой системы накопления и обновления;

техническая – применение машинных комплексов и др.

Интегрированные АСУ имеют особенно важное значение для крупных предприятий. Рассмотрим в качестве примера интегрированную АСУ химическим комбинатом. Схема управления современным химическим комбинатом включает в себя все три уровня иерархии. Системы АСУ ТП рассмотрены выше. Задачи АСУ верхнего уровня следующие: решение задач планирования и учета для предприятия в целом, определение основных технико-экономических показателей предприятия, сбор, передача и обработка необходимой для этого информации.

Выполнение указанных задач АСУ верхнего уровня преследует две основные цели: разгрузить персонал функциональных отделов предприятия от решения трудоемких (рутинных) задач учета, планирования и анализа и дать управленческому персоналу качественно новую информацию по совершенствованию управления предприятием. Система содержит центральный пункт управления и систему сбора и передачи информации. Центральный пункт управления управляет предприятием в целом. Он вырабатывает управляющие воздействия по всем основным производствам. Информационно-вычислительный центр обрабатывает всю информацию, а центральный диспетчерский пункт осуществляет оперативный контроль и управление основными производствами и цехами. Схема сбора организационно-экономической информации данной системы показана на рис. 5.2.

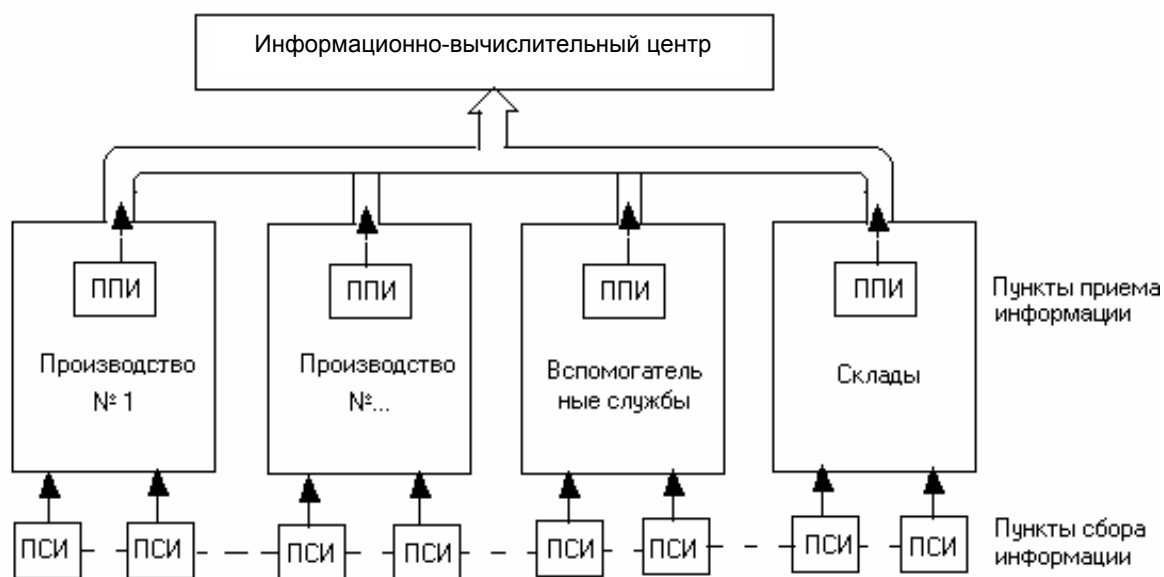


Рис. 5.2. Схема сбора организационно-экономической информации

Пункты сбора информации помещаются в цехах и вспомогательных службах. Оператор из цеха передает необходимые сведения в пункт приема информации. Все сведения поступают в общую систему реализованной обработки информации ИВЦ. Основные функции ИВЦ: прием, регистрация и хранение информации; решение задач по управлению предприятием; обеспечение оперативной связи со всеми основными подразделениями предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные АСУ представляют собой сложные комплексы различных взаимодействующих технических устройств, которые, в свою очередь, состоят из большого количества разнообразных элементов. Такими сложными системами управления являются цифровые, инвариантные, оптимальные, экстремальные и самонастраивающиеся системы.

В первой главе пособия рассмотрены только вопросы анализа систем, однако на практике важное значение имеют и задачи синтеза систем, удовлетворяющих требуемым показателям качества. Необходимо отметить, что теория автоматического управления (ТАУ) непрерывно развивается и совершенствуется, а область применения систем автоматического управления чрезвычайно расширилась. ТАУ вместе с теорией функционирования элементов систем управления (датчиков, регуляторов, исполнительных механизмов, устройство и принцип действия которых описаны во второй главе) образует более широкую отрасль науки – *автоматику*.

Качество получаемой в металлургической промышленности продукции зависит от ряда причин, определяющих нормальное протекание процесса. Поэтому при построении автоматических систем регулирования необходимо прежде всего установить величины, подлежащие контролю и регулированию, а также выявить точки введения управляющих воздействий, их каналы прохождения по объекту.

В третьей главе изложены основы проектирования систем автоматизации, правила составления функциональных схем, условные графические и буквенные обозначения приборов и средств автоматизации.

Управление производством можно разделить на две области: управление организационно-экономическими процессами и управление технологическими процессами. В зависимости от характера объекта управления различают: автоматизированные системы организационно-экономического или административного управления (рассмотрены в пятой главе пособия); автоматизированные системы управления технологическими процессами (им посвящается четвертая глава).

На практике часто используются системы, в которых комбинируются функции, характерные как для АСУП, так и для АСУ ТП. В последние годы наметилась тенденция слияния АСУП и АСУ ТП в единые интегрированные системы управления, позволяющие обрабатывать всю имеющуюся на предприятии информацию, т.е. организовать производственный процесс, полностью управляемый вычислительным комплексом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукас, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Лукас. – М. : Недра, 1990. – 416 с.
2. Осипова, В. А. Операционное исчисление в задачах автоматического управления : практикум / В. А. Осипова, Н. М. Максимова; ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2004. – 88 с.
3. Теория автоматического управления : учеб. для машиностроит. спец. вузов / В. Н. Брюханов, М. Г. Косов, С. П. Протопопов [и др.]; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 268 с.
4. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И. В. Мирошник. – СПб. : Питер, 2005. – 336 с.
5. Ким, Д. П. Теория автоматического управления / Д. П. Ким. – Т. 1: Линейные системы. – М. : Физматлит, 2003. – 288 с.
6. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учеб. для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МЭИ, 2005. – 460 с.
7. Титовский, А. В. Технические измерения и приборы. Термометры, манометры, расходомеры и уровнемеры : учеб. пособие / А. В. Титовский, А. А. Дружинина; ГАЦМиЗ. – Красноярск, 2003.
8. Титовский, А. В. Технические измерения и приборы. Плотнометры и анализаторы состава вещества : учеб. пособие / А. В. Титовский, А. А. Дружинина; ГАЦМиЗ. – Красноярск, 2003. – 84 с.
9. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов / Г. М. Глишков, В. А. Маковский, С. Л. Лотман, М. Р. Шапировский; под ред. Г. М. Глишкова. – М. : Металлургия, 1986. – 352 с.
10. Автоматическое управление металлургическими процессами : учеб. для вузов / А. М. Беленький, В. Ф. Бердышев, О. М. Блинов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
11. Мамиконов, А. Г. Проектирование АСУ : учеб. для спец. «АСУ» вузов / А. Г. Мамиконов. – М. : Высш. шк., 1987. – 303 с.
12. Емельянов, А. И. Проектирование систем автоматизации технологических процессов / А. И. Емельянов, О. В. Капник. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
13. Глишков, Г. М. Контроль и автоматизация металлургических процессов : учеб. для вузов / Г. М. Глишков, А. И. Косырев, Е. К. Шевцов. – М. : Металлургия, 1989. – 352 с.
14. Шершевер, М. А. Монтажник систем автоматизации металлургического производства : справ. изд. / М. А. Шершевер. – М. : Металлургия, 1988. – 296 с.
15. Ключев, А. С. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля / А. С. Ключев, Б. В. Глазов, М. Б. Миндин; под ред. А. С. Ключева. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 376 с.

16. ГОСТ 21.408-93. Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов. – М. : Изд-во стандартов, 2002.

17. Проектирование систем автоматизации в металлургии / В. Р. Ксендзовский, В. Ф. Лебедин, Б. В. Мирон [и др.]. – М. : Металлургия, 1983. – 304 с.

18. Ключев, А. С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов / А. С. Ключев, Б. В. Глазов, А. К. Дубровский; под ред. А. С. Ключева. – М. : Энергия, 1980. – 512 с.

19. ГОСТ 21.404-85. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М. : Изд-во стандартов, 1985.

20. Горенский, Б. М. Автоматизированные системы имитационного управления объектами цветной металлургии : монография / Б. М. Горенский; ГИЦМиЗ. – Красноярск, 2002. – 152 с.