

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего проф-
фессионального образования
«Амурский государственный университет»**

Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Управление, сертификация и инноватика

Основной образовательной программы по направлению подготовки (специальности)

140106.65 Энергообеспечение предприятий

Благовещенск 2012

УМКД разработан канд. техн. наук, доцент кафедры АППиЭ
Штыкиным Михаилом Дмитриевичем

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры

Протокол заседания кафедры от « ____ » _____ 2012 г. № ____

Зав. кафедрой _____ / А.Н. Рыбалев

УТВЕРЖДЕН

Протокол заседания УМСС Автоматизация технологических процессов и электротехники

от « ____ » _____ 2012 г. № ____

Председатель УМСС _____ / А.Н. Рыбалев

1. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины ОПД.Ф.5 «Управление, сертификация и инноватика», ОПД_Ф.5 «Теория автоматического управления» является формирование у студентов знания основ теории автоматического управления, принципов сертификации устройств и оборудования и методов внедрения инновационных технологий в производственные процессы.

Задачи дисциплины:

ознакомление с основами автоматизации управления технологическими процессами; изучение методов описания и анализа линейных систем с помощью дифференциальных уравнений, переходных функций и частотных характеристик; ознакомление с теоретическими и правовыми вопросами сертификации и принципами инновационной политики государства;

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Теоретической основой дисциплины ОПД.Ф.5 «Управление, сертификация и инноватика» (ОПД_Ф.5 «Теория автоматического управления») являются курсы: «Высшая математика», «Физика», «Теоретическая механика», «Электротехника и электроника», «Теоретические основы теплотехники». Знания и умения, приобретенные студентами при изучении дисциплины, найдут применение при курсовом и дипломном проектировании и в практической деятельности выпускника.

3. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать:

основы управления технологическими объектами;
понятия о динамических системах, типы и виды динамических систем;
способы построения математических моделей тепловых объектов;
особенности построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП);
способы определения качества и повышения надежности АСУ ТП и ее элементов;
основы сертификации и её роль в повышении качества продукции;
основы инновационной политики и вопросов внедрения инновационных технологий;

2) Уметь:

проводить анализ технологического процесса как объекта управления;
выбирать для данного технологического процесса функциональную схему автоматизации;
анализировать одноконтурные и многоконтурные системы автоматического регулирования применительно к конкретному технологическому объекту;
определять качество систем автоматизации управления по их математическим моделям.

3) Владеть навыками работы с современными техническими и программными средствами автоматизации: измерительными приборами и преобразователями, датчиками и исполнительными механизмами.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 200 часов.

| № п/п | Раздел дисциплины | Семестр | Неделя семестра | Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах) | | | | Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам) |
|-------|--|---------|-----------------|--|-----------|--------|----|---|
| | | | | Лек. | Лаб. раб. | Практ. | СР | |
| 1 | Введение. Основы теории автоматического управления. Алгоритмы логического управления. Логический автомат. Основы математического описания логических автоматов. | 5 | 1-8 | 16 | 2 | 2 | 20 | Контрольная точка и тестирование №1, экзамен |
| 2 | Промышленные объекты управления и их характеристики, основные особенности. Примеры построения логических систем управления. | 5 | 9-13 | 4 | 2 | 2 | 20 | Контрольная точка и тестирование №1, экзамен |
| 3 | Устойчивость и качество процессов регулирования. Управление в режимах пуска. Декомпозиция целей управления. Автоматизация управления. Целевые функции управления | 5 | 14-18 | 4 | 2 | 2 | 20 | Контрольная точка и тестирование №2, экзамен |
| 4 | Автоматические регуляторы технологических процессов. Понятие о динамических системах и виды динамических систем. Особенности построения автоматизированных систем управления технологическими процессами. (АСУТП). | 6 | 1-4 | 6 | 2 | 2 | 20 | Контрольная точка и тестирование №2, экзамен |
| 5 | Автоматическое управление теплоэнергетическими ус- | 6 | 4-8 | 8 | | 2 | 15 | Контрольная точка и тестирование №1, зачёт |

| | | | | | | | | |
|---|--|---|-------|---|---|---|---|--|
| | тановками. Математические модели технологических объектов управления. Виды обеспечения АСУТП. Содержание и назначение математического, программного, метрологического, организационного обеспечения АСУТП. | | | | 2 | | | |
| 6 | Основы стандартизации и метрологии теоретические основы метрологии; основные понятия, связанные с объектами измерения: свойство, величина, количественные и качественные проявления свойств материального мира; основные понятия, связанные со средствами измерений (СИ). | 6 | 8-12 | 8 | 2 | 2 | 5 | Контрольная точка и тестирование №1, зачёт |
| 7 | Основы сертификации сертификация, ее роль в повышении качества продукции и развитие на международном, региональном и национальном уровнях; правовые основы стандартизации; международная организация по стандартизации (ИСО); основные положения государственной системы стандартизации ГСС; научная база стандартизации; определение оптимального уровня унификации и стандартизации; Государственный контроль и надзор за соблюдением требований государствен- | 6 | 12-16 | 4 | 2 | 2 | 5 | Контрольная точка и тестирование №2, зачёт |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|-------|---|---|---|---|--|
| | ных стандартов; основные цели и объекты сертификации; термины и определения в области сертификации; качество продукции и защита потребителя; схемы и системы сертификации; условия осуществления сертификации; обязательная и добровольная сертификация; правила и порядок проведения сертификации; органы по сертификации и испытательные лаборатории; аккредитация органов по сертификации и испытательных (измерительных) лабораторий; сертификация услуг; сертификация систем качества. | | | | | | | |
| 8 | Основы инноватики | 6 | 16-18 | 4 | 4 | 4 | 5 | Контрольная точка и тестирование №2, зачёт |

Тематика вопросов лекционного материала

1. Введение. Основы теории автоматического управления – 16 часов.

Основные понятия теории управления технологическими объектами. Классификация систем управления, поведение объектов и СУ. Информация и принципы управления. Примеры СУ техническими, экономическими и организационными объектами. Задачи теории управления. Линейные непрерывные модели и характеристики СУ. Теплотехнические объекты управления, их основные особенности. Управление в режимах пуска, остановка и нормальной эксплуатации, декомпозиция целей управления, автоматизация управления. Понятие о динамических системах и виды динамических систем.

Алгоритмы логического управления. Логический автомат. Основы математического описания логических автоматов.

Основные понятия и определения. Объект управления и автоматический регулятор. Понятие автоматической системы регулирования. Классификация автоматических систем регулирования. Переходные процессы в системах регулирования. Математическое описание звеньев и систем. Типовые динамические звенья. Соединение звеньев. Передаточные функции.

2. Промышленные объекты управления и их характеристики.- 4 часа.

Понятие о динамических системах и виды динамических систем.

Математические модели технологических объектов управления. Модели вход-выход. Дифференциальные уравнения динамических систем. Передаточные функции, временные и частотные характеристики. Модели вход-состояние-выход. Преобразования форм представления моделей. Линейные динамические системы, их временные динамиче-

ские характеристики. Передаточная функция линейной системы, частотные характеристики линейных систем.

Основные особенности. Примеры построения логических систем управления.

Анализ основных свойств линейных СУ. Основы аналитического определения динамических характеристик объектов управления. Составление математических моделей тепловых объектов. Типовые законы регулирования. Формирование законов регулирования в автоматических регуляторах. Структуры типовых регуляторов.

3. Устойчивость и качество процессов регулирования. – 4 часа

Назначение и структура одноконтурной автоматической системы регулирования (АСР). Типовые линейные алгоритмы регулирования. Понятие устойчивости, инвариантности, чувствительности, управляемости и наблюдаемости, качество переходных процессов и линейных СУ. Задачи и методы синтеза линейных СУ. Линейные дискретные модели СУ. Основные понятия об импульсных СУ. Классификация дискретных СУ. Принцип определения оптимальных настроек регуляторов, нелинейные позиционные алгоритмы регулирования. Структурные схемы АСР с дополнительными сигналами (каскадные, с сигналом по производной, с компенсацией возмущения). Анализ установившихся и переходных режимов, методы анализа устойчивости.

Управление в режимах пуска. Декомпозиция целей управления. Автоматизация управления. Целевые функции управления

Процессы автоматического регулирования и методы анализа их устойчивости. Корневой и алгебраический критерии устойчивости. Частотный критерий устойчивости. Запас устойчивости. Качество процессов регулирования.

4. Автоматические регуляторы технологических процессов. – 6 часов.

Анализ и синтез дискретных СУ. Нелинейные модели СУ. Анализ равновесных режимов. Методы линеаризации нелинейных моделей. Анализ поведения СУ на фазовой плоскости. Устойчивость положений равновесия. Первый и второй методы Ляпунова. Частотный метод исследования абсолютной устойчивости. Алгоритмы логического управления. Логический автомат. Основы математического описания логических автоматов. Примеры построения логических систем управления. Понятие функциональной группы.

Понятие о динамических системах и виды динамических систем. Особенности построения автоматизированных систем управления технологическими процессами. (АСУТП).

Промышленные регуляторы и их основные элементы. Исполнительные устройства регуляторов. Функциональный состав и устройство аппаратуры типа «Каскад-1» и «Каскад-2». Агрегатированные комплексы электрических средств регулирования АКЭСР 1 и АКЭСР 2. Исполнительные механизмы типа МЗТА и МЭО. Пусковые устройства.

5. Автоматическое управление теплоэнергетическими установками. – 8 часов.

Исследование периодических режимов методом гармонического баланса. Линейные стохастические модели СУ. Модели и характеристики случайных сигналов. Прохождение случайных сигналов через линейные звенья. Анализ и синтез линейных стохастических систем при стационарных случайных воздействиях. Оптимальные системы управления. Задачи оптимального управления. Критерии оптимальности. Методы теории оптимального управления. Классическое вариационное исчисление. Принцип максимума. Динамическое программирование. СУ оптимальные по быстродействию, оптимальные по расходу ресурсов энергии. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов. Робастные системы и адаптивное управление. Математические модели технологических объектов управления. Виды обеспечения АСУТП. Содержание и назначение математического, программного, метрологического, организационного обеспечения АСУТП. Функционально-групповое управление. Постановка задачи оптимального управления технологическим объектом управления, примеры.

Оптимизация статических режимов работы ТОО. Целевые функции управления. Понятие об адаптивных системах управления и методах адаптации.

Особенности построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) сложными теплотехническими объектами управления. Функции АСУТП. Состав информационных и управляющих функций. Виды обеспечения АСУТП.

Тепловая электростанция (ТЭС) как объект управления. Автоматическое регулирование паровых котлов. Автоматизация вспомогательного оборудования ТЭС. Дистанционное и логическое управление. Автоматические тепловые защиты и технологическая сигнализация. Автоматизация энергоблоков. АСУ ТП ТЭС, ее назначение, обеспечение, состав и функции. Содержание и назначение математического, программного, метрологического, организационного обеспечения АСУТП.

6. Основы стандартизации и метрологии. – 8 часов.

Теоретические основы метрологии. Основные понятия и определения метрологии. Виды измерений, теоретические основы метрологии; основные понятия, связанные с объектами измерения: свойство, величина, количественные и качественные проявления свойств материального мира; основные понятия, связанные со средствами измерений (СИ). Закономерности формирования результата измерения, понятие погрешности, вероятностные оценки погрешности измерения, средства измерений, источники погрешностей. Понятие многократного измерения. Алгоритмы многократных измерений, понятие метрологического обеспечения: организационные, научные и методические основы метрологического обеспечения, метрологические характеристики средств измерения и их нормирование, сигналы измерительной информации, структурные схемы и свойства средств измерений в статическом режиме, средства измерений в динамическом режиме, средства измерения электрических, магнитных и неэлектрических величин, измерительные информационные системы, подготовка измерительного эксперимента, обработка результатов измерения, правовые основы обеспечения единства измерений, положения закона РФ об обеспечении единства измерений.

Сущность стандартизации, ее цели, задачи, функции и принципы. Национальная система стандартизации РФ. Законы РФ в области стандартизации и технического регулирования. Основополагающие общетехнические и организационно-технические системы и комплексы стандартов. Основные понятия и задачи метрологии. Единицы физических величин, система СИ. Средства измерения. Метрологическое обеспечение производства, испытаний и контроля качества продукции. Положение закона РФ об обеспечении единства измерений; структура и функции метрологической службы предприятия, организации, учреждения, являющихся юридическими лицами.

7. Основы сертификации. – 4 часа.

Системы теплотехнического контроля; измерение температуры, давления, разности давлений, уровня расходов; автоматизированные системы контроля и управления сбором данных. Исторические основы развития стандартизации и сертификации.

Сертификация, ее роль в повышении качества продукции и развитие на международном, региональном и национальном уровнях; правовые основы стандартизации; международная организация по стандартизации (ИСО); основные положения государственной системы стандартизации ГСС; научная база стандартизации; определение оптимального уровня унификации и стандартизации; Государственный контроль и надзор за соблюдением требований государственных стандартов; основные цели и объекты сертификации; термины и определения в области сертификации; качество продукции и защита потребителя; схемы и системы сертификации; условия осуществления сертификации; обязательная и добровольная сертификация; правила и порядок проведения сертификации; органы по сертификации и испытательные лаборатории; аккредитация органов по сертификации и испытательных (измерительных) лабораторий; сертификация услуг; сертификация систем качества.

Законодательная и нормативно-методическая база сертификации. Система сертификации РФ. Сертификация продукции и услуг и порядок ее проведения. Сертификация систем качества и производства.

8. Основы инноватики. – 4 часа.

Сущность инновационных технологий, их цели и задачи. Национальная инновационная политика РФ. Законодательные акты РФ в области развития инновационных технологий. Успехи нанотехнологий и других перспективных отраслей науки и техники.

5.2. Практические занятия (18 час.)

5.2.1. Структурные схемы элементов и систем автоматического регулирования.

5.2.2. Составление уравнений движения и передаточных функций.

5.2.3. Определение динамических характеристик линейных элементов по экспериментальным данным.

5.2.4. Определение характеристик соединения звеньев.

5.2.5. Составление математических моделей тепловых объектов.

5.2.6. Анализ устойчивости систем с помощью метода Ляпунова.

5.2.7. Исследование качества непрерывных линейных систем автоматического регулирования.

5.2.8. Расчет погрешностей и статистическая обработка результатов измерений.

5.3 Лабораторные работы 18 (час.)

5.3.1. Структурные схемы элементов и систем автоматического регулирования.

5.3.2. Составление уравнений движения и передаточных функций.

5.3.3. Определение динамических характеристик линейных элементов по экспериментальным данным.

5.3.4. Определение характеристик соединения звеньев.

5.3.5. Составление математических моделей тепловых объектов.

5.3.6. Анализ устойчивости систем с помощью метода Ляпунова.

5.3.7. Исследование качества непрерывных линейных систем АСР.

5.3.8. Расчет погрешностей и статистическая обработка результатов измерений.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

| № п/п | № раздела (темы) дисциплины | Форма (вид) самостоятельной работы | Трудоёмкость в часах |
|-------|--|---|----------------------|
| 1 | Введение. Основы теории автоматического управления | | 2 |
| 2 | Промышленные объекты управления и их характеристики | Выполнение индивидуального задания, решение задач | 23 |
| 3 | Устойчивость и качество процессов регулирования | Выполнение индивидуального задания, решение задач | 23 |
| 4 | Автоматические регуляторы технологических процессов | Выполнение индивидуального задания, решение задач | 23 |
| 5 | Автоматическое управление теплоэнергетическими установками | Выполнение индивидуального задания, решение задач | 23 |
| 6 | Основы стандартизации и метрологии | Подготовка отчёта по нормативной базе | 7 |
| 7 | Основы сертификации | Подготовка отчёта по нормативной базе | 7 |
| 8 | Основы инноватики | Подготовка отчёта по нормативной базе | 2 |

7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В преподавании дисциплины «Управление, сертификация и инноватика» используются следующие образовательные технологии:

1. Демонстрация части теоретического материала и примеров решения задач при анализе и моделировании систем и звеньев с помощью видеопроектора.
2. Компьютерное тестирование.

8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. Вопросы для тестирования, охватывающие основные темы:

- 1.1. теоретические основы управления технологическими процессами;
- 1.2. технические средства АСУ ТП
- 1.3. нормативные акты по сертификации и инноватике.

2. Вопросы к экзамену.

1. Характеристика основных элементов одноконтурной автоматической системе регулирования.
2. Характеристика воздействий в автоматической системе регулирования.
3. Классификация автоматических систем регулирования
4. Понятие устойчивой и неустойчивой АСР
5. Формы описания динамических свойств линейных звеньев
6. Виды частотных характеристик
7. Основные типовые звенья
8. Принцип суперпозиции для линейных звеньев
9. Соединения звеньев
10. Линеаризация исходных уравнений
11. Структурная схема математической модели парового котла
12. Характеристики динамических свойств типовых тепловых объектов и их определение по экспериментальной кривой разгона
13. Корневой критерий устойчивости.
14. Алгебраический критерий устойчивости
15. Частотный критерий устойчивости.
16. Запас устойчивости.
17. Показатели качества переходного процесса
18. Промышленные регуляторы и их основные элементы.
19. Исполнительные устройства регуляторов.
20. Функциональный состав и устройство аппаратуры типа «Каскад-1» и «Каскад-2».
21. Агрегатные комплексы электрических средств регулирования АКЭСР1 и АКЭСР2.
22. Исполнительные механизмы типа МЗТА и МЭО.
23. Тепловая электростанция (ТЭС) как объект управления.
24. Автоматическое регулирование паровых котлов.
25. Автоматизация вспомогательного оборудования ТЭС.
26. Дистанционное и логическое управление.
27. Автоматические тепловые защиты и технологическая сигнализация.
28. Автоматизация энергоблоков.
29. АСУТП ТЭС, ее назначение, обеспечение, состав и функции.
30. Основные понятия и задачи метрологии.
31. Измерения и средства измерения, их классы точности.
32. Метрологическое обеспечение производства, испытаний и контроля качества продукции.

33. Государственная метрологическая служба и ее органы.
34. Законодательная и нормативно-методическая база сертификации.
35. Система сертификации РФ.
36. Добровольная и обязательная сертификация.
37. Сертификация продукции и услуг и порядок ее проведения.
38. Сертификация систем качества и производства.
39. Международные организации и сотрудничество в области стандартизации, сертификации и метрологии.

Вопросы к зачету:

1. Понятие объекта управления и автоматического регулятора.
2. Частотный критерий устойчивости.
3. Метрологическое обеспечение производства, испытаний и контроля качества продукции.
4. Понятие участка регулирования, регулируемой величины, регулирующего органа, измерительного устройства, усилительного устройства и задатчика.
5. Передаточные функции звеньев.
6. Тепловые объекты управления.
7. Единицы физических величин, система СИ.
8. Временные характеристики звеньев.
9. Звено запаздывания.
10. Цели, задачи, функции и принципы стандартизации.
11. Частотные характеристики звеньев.
12. Сравнительная оценка критериев устойчивости.
13. Сертификация систем качества и производства.
14. Усилительное звено.
15. ПИД-закон регулирования.
16. Измерения и средства измерения, их классы точности.
17. Инерционное звено 1 порядка.
18. Понятие о качестве регулирования.
19. Законодательная и нормативно-методическая база сертификации.
20. Инерционное звено 11 порядка.
21. Закон устойчивости.
22. Система сертификации ГОСТ РФ.
23. Интегрирующее звено.
24. Корневой и алгебраический критерий устойчивости.
25. Основные понятия и задачи метрологии.
26. Понятие автоматической системы регулирования.
27. Понятие о законах регулирования. Pn-закон.
28. Добровольная и обязательная сертификация.
29. АСР, действующие по отклонению регулируемой величины.
30. Составление математических моделей тепловых объектов.
31. Сертификация продукции и услуг и порядок её проведения.
32. АСР, действующие по возмущению.
33. Аналитическое определение динамических характеристик тепловых объектов.
34. Экологическая сертификация.
35. Государственная метрологическая служба и её органы.
36. Сущность стандартизации.
37. Национальная система стандартизации.
38. Международные организации и сотрудничество в области стандартизации, сертификации и метрологии.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

а) основная литература:

1. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учеб./Г.М. Иванова, Н.Д. Чистяков, В.С. Кузнецов. – 2-е изд. перераб. и допол. – М.; Изд-во Москов. Энерг. Инст-та, 2005, 2007. -459 с.

2. Теория автоматического управления: учеб.: доп. Мин. обр. РФ / под ред. В. Б. Яковлева. - 3-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2009. - 568 с.

3. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб.: рек. Мин. обр. РФ / В. Я. Ротач. - 4-е изд., стер. - М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2007. - 400 с.

б) дополнительная литература:

1. Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. М.: МЭИ, 1995. -352 с.

2. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: учеб. пособие : рек. УМО / Б.И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., доп. и перераб. - СПб. : Лань, 2010. - 220 с.

3. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления: учеб.: рек. Мин. обр. РФ / Е.И. Юревич. - 3-е изд. - СПб.: БХВ-Петербург, 2007. - 540 с.

4. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам: учеб. пособ. / Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. - М.: Энергоатомиздат, 1985. -328 с.

5. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник. М.: МЭИ, 2007. -460 с.

6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. – справочник. М.: Энергоатомиздат. 2004. -456 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

Программное обеспечение:

1) ОС Microsoft Windows 2000, Microsoft Windows XP;

2) MS Office (Word);

3) MatCAD.

Интернет-ресурсы:

| № | Наименование ресурса | Краткая характеристика |
|---|---|--|
| 1 | http://www.edu.ru/ | Российское образование. Федеральный образовательный портал. Наиболее полное собрание материалов по образовательным дисциплинам |
| 2 | http://www.kipis.ru/ | «Контрольно-измерительные приборы и системы». Научно-технический журнал. |
| 3 | http://datsys.starnet.ru/ | «Датчики и системы». Ежемесячный научно-технический и производственный журнал |
| 4 | http://automationworld.com.ua/ | «Мир автоматизации». Инновационный всеукраинский журнал |
| 5 | http://avtomprom.narod.ru/ | «Автоматизация в промышленности». Научно-технический журнал. |
| 6 | http://www.exponenta.ru/ | Образовательный математический сайт. Примеры решения задач теории управления в математических пакетах Обсуждение математических пакетов и задач на форуме. Методические разработки. Электронные учебники, справочники, статьи по математическим пакетам. Демо-версии популярных математических пакетов, электронные книги и свободно распространяемые |

| | | |
|---|---|---|
| | | программы. |
| 4 | http://www.novtex.ru/mech/ | Ежемесячный научно-технический и производственный журнал "Мехатроника, Автоматизация, Управление" |

г) **научно-технические журналы:**

1. Электрические станции.
2. Турбины и дизели.

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Промышленная паровая турбина и клапаны в разрезе (аудитория оборудования тепловых электростанций, здание ЭФ, корпус 6);
2. Видеопроектор.

2. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ПРОГРАММНОГО МАТЕРИАЛА

Введение.

Механизацией называется применение машин и специальных устройств или приспособлений, заменяющих физический труд человека. Человек в механизированном производстве призван управлять машинами (включать, отключать) и наблюдать за их действием.

На ТЭС для механизации производства используются:

Передвижные подъемные краны и экскаваторы (разгрузка и перегрузка твердого топлива);
 Механические и гидравлические транспортеры сыпучих материалов (угля и золы);
 Электроприводы запорных и регулирующих органов (клапанов, задвижек);
 Электроприводы вспомогательных механизмов (тягодутьевых машин, насосов, углеразмольных мельниц и др.).

Под **управлением** в технических системах понимается функция (работа, исполнение командных сигналов), обеспечивающая поддержание заданных режимов эксплуатации технологического оборудования и достижение поставленных целей.

Автоматизацией производства называется применение технических средств (от простейших измерительных приборов и регуляторов до современных ЭВМ) и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессе выработки, преобразования и передачи энергии (материалов, информации).

Пример простейшего автоматического регулятора – регулятор уровня воды в барабане парового котла (первый регулятор промышленного назначения, разработанный русским тепло-техником И.И. Ползуновым еще в 1765 г.).

Регулятор действует следующим образом (рис. 1.2). При появлении небаланса между притоком воды в котел $D_{не}$ и уходящим из него паром D_n уровень воды в барабане $H_в$ (регулируемая величина) начнет отклоняться от своего первоначального среднего значения (например, повышаться). Тогда поплавок 1 (чувствительный элемент), поднимаясь вдоль направляющих, начнет закрывать заслонку 2 (регулирующий орган) и тем самым уменьшать приток воды в барабан. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока уровень воды не достигнет нового установившегося значения, соответствующего балансу между $D_{не}$ и D_n . Здесь реализован способ регулирования по отклонению, называемый «принципом Ползунова-Уатта». Сущность его заключается в следующем: чем больше отклонение регулируемой величины ($H_в$), тем больше перемещение регулирующего органа (заслонка 2) в направлении, препятствующем этому отклонению.

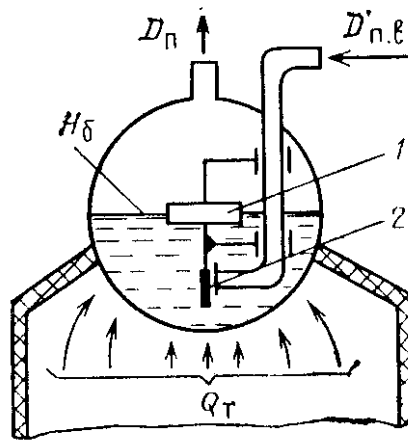


Рис. 1.2 Регулятор Ползунова
(Q_T – теплота сгорания топлива)

Уравнение движения регулятора Ползунова (закон регулирования) можно записать следующим образом:

$$x_p(t) = K_p y(t) \quad (1.1)$$

где $x_p(t)$ - перемещение регулирующего органа; $y(t)$ - отклонение регулируемой величины; K_p - коэффициент усиления регулятора.

Из этого примера становится ясно, что регулирование – это разновидность управления, а регулятор – техническое устройство.

Таким образом, можно сформулировать следующие понятия:

Автоматическое регулирование – автоматическое поддержание вблизи постоянного значения некоторой физической величины, характеризующей управляемый процесс.

Автоматический регулятор – устройство, которое вырабатывает регулирующее воздействие в соответствии с требуемым законом регулирования.

В современном автоматизированном производстве человек призван лишь периодически воздействовать на главные машины, механизмы и установки, определяющие нормальный ход технологического процесса, и наблюдать за наиболее важными его параметрами по показаниям приборов.

Автоматизация тепловой части ТЭС предусматривает выполнение следующих **функций**: дистанционное управление или управление машинами и механизмами на расстоянии; теплотехнический контроль (измерение) текущих значений параметров технологического процесса;

технологическую сигнализацию о состоянии основного и вспомогательного оборудования; автоматическую защиту основного и вспомогательного оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации;

автоматическое непрерывное регулирование, обеспечивающее автоматическое поддержание технологических параметров вблизи заданного значения;

логическое управление, обеспечивающее автоматическое включение или отключение регуляторов, машин, механизмов и установок в заданной последовательности.

Указанные функции выполняются одноименными подсистемами управления. Человек-оператор и подчиненные ему подсистемы должны управлять процессами на ТЭС, стремясь к достижению наиболее экономически выгодных показателей производства (например, к минимизации расхода топлива). Поскольку на экономичность работы установок оказывает влияние большое количество взаимодействующих факторов, для ее оценки используется компьютерная техника, обеспечивающая автоматический сбор и обработку необходимой информации и расчет технико-экономических показателей. Подсистемы контроля, управления и расчета этих показателей вместе с компьютерной техникой, подчиненные оператору, образуют **автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУ ТП)** ТЭС.

АСУ ТП ТЭС должна выполнять следующие **функции**:
 сбор, первичная обработка и хранение технологической информации;
 регистрация параметров технологического процесса и состояния оборудования;
 контроль и регистрация отклонений параметров процесса и состояния оборудования от заданных (предельных);
 сигнализация о состоянии параметров технологического процесса и оборудования;
 анализ срабатывания блокировок и защиты оборудования;
 оперативное отображение информации;
 подготовка информации и выполнение процедур автоматического обмена информацией с другими уровнями управления.

Участие ЭВМ в управлении технологическими процессами ТЭС может осуществляться по двум **принципам**:

непосредственного управления работой оборудования, при котором ЭВМ выдает управляющие команды на исполнительные органы энергоблоков;
 управляет работой оборудования оператор, а ЭВМ выдает ему всю необходимую информацию.

В настоящее время при создании АСУ ТП ТЭС практикуется сочетание обоих этих подходов.

1.2 Объект управления и автоматический регулятор

Объектом управления называют совокупность технологического оборудования и реализованного на нем технологического процесса производства. Объекты управления могут быть простыми (одиночная емкость или участок трубопровода и т.п.) и сложными (паровые котлы, турбины и т.п.) и управляться как простыми устройствами, так и сложными системами.

Пример. Рассмотрим простое устройство управления, обеспечивающее поддержание постоянного давления воды в трубопроводе при изменении ее расхода (рис. 1.3).

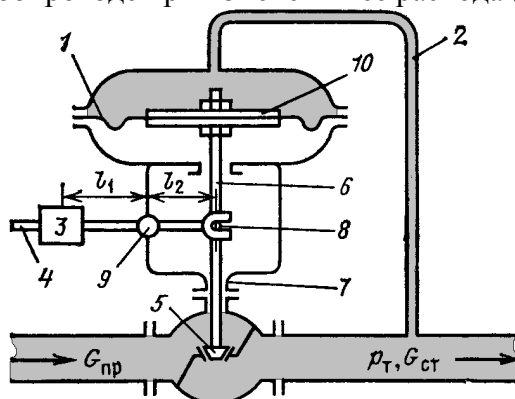


Рис. 1.3 Регулятор давления прямого действия

Регулятор состоит из коробки с мембраной 1, которая сообщается соединительной трубкой 2 с участком трубопровода, где нужно поддерживать постоянное давление p_T , груза 3 массой G , закрепленного на поворотном рычаге 4, и игольчатого клапана 5. Шток клапана 6 через уплотнение 7 выведен из корпуса клапана и с помощью пальца и вилки 8 соединен с рычагом 4. Верхний край штока 6 упирается в жесткий диск 10, являющийся активной частью S мембраны 1.

При постоянном расходе (притоке) воды через клапан $G_{пр}$ и постоянном давлении p_T , усилие, приложенное к диску 10, уравновешивается грузом 3. При этом диск 10 и шток 6 неподвижны.

При изменении расхода (стока) воды со стороны потребителя $G_{ст}$ (например, при его увеличении) давление p_T начинает уменьшаться, а следовательно уменьшится и давление на диск 10, и он перестанет уравновешивать груз 3. Под действием груза 3 рычаг 4 начинает поворачиваться против часовой стрелки, перемещать вверх шток 6, а вместе с ним и иглу 5, увеличивая проходное сечение клапана и приток воды через него. Таким образом, восстанавливается равновесие между притоком воды и ее стоком. Перемещение диска 10 и штока 6 будут

происходить до выравнивания моментов сил M_1 и M_2 , развиваемых грузом 3 и диском 10 относительно опоры 9:

$$M_1 = M_2 \quad \text{или} \quad Gl_1 = p_T Sl_2 \quad (1.2)$$

Это равенство наступит при достижении давлением воды за клапаном p_T своего первоначального значения.

Аналогично устройство будет восстанавливать давление и при уменьшении стока воды, действуя в направлении закрытия клапана.

Введем следующие общепринятые **понятия**, используя рассмотренный в примере регулятор:

- **участок регулирования** – участок трубопровода от клапана 5 до точки измерения давления p_T ;
- **регулируемая величина** – давление воды p_T ;
- **регулирующий орган** – клапан 5, регулирующий расход воды;
- **измерительное устройство** – мембрана 1, воспринимающая давление воды;
- **усилительное устройство** – диск 10, развивающий усилие, необходимое для перемещения регулирующего органа (клапана 5);
- **задающее устройство** или **здатчик** – груз 3, который может перемещаться вдоль рычага 4 и уравнивает усилие мембраны.

Измерительное и усилительное устройства вместе с задатчиком и образуют **регулятор**.

Рассмотренный регулятор называется регулятором **прямого действия**, поскольку для перемещения регулирующего органа (клапана 5) используется усилие, развиваемое в самом объекте управления (давление воды в трубопроводе). В регуляторах **непрямого действия** для перемещения регулирующего органа используется усилие, развиваемое внешним источником энергии.

1.3 Понятие автоматической системы регулирования

Участок регулирования (в общем случае – объект управления), регулятор и регулирующий орган образуют систему регулирования. Если действие регулятора обеспечивается без участия человека, то регулятор называется автоматическим, а вся система – **автоматической системой регулирования** (АСР).

Используя для иллюстрации рассмотренный выше пример (п. 1.2), введем **общие понятия** для АСР различного назначения:

- **входное воздействие** – воздействие, приложенное к входу АСР (изменение расхода воды на притоке $\Delta G_{\text{пр}}$);
- **внешнее возмущающее воздействие** – воздействие на объект управления, поступающее извне (изменение расхода воды на стоке $\Delta G_{\text{ст}}$, вызванное действиями потребителя);
- **выходное воздействие** – воздействие, выдаваемое на выходе АСР (изменение давления воды p_T);
- **регулирующее воздействие** – воздействие регулятора на управляемый объект (перемещение регулирующего клапана 5);
- **задающее воздействие** (заранее заданное) – уставка регулятора, выставляемая до начала его работы (положение груза 3, задаваемое его перемещением вдоль рычага 4 для уравнивания определенного давления воды).

Величины, характеризующие воздействия, называются **сигналами**. Для вышеназванных понятий на примере рассмотренного регулятора введем **условные обозначения**, которые являются общепринятыми для всех АСР:

- $x = \Delta G_{\text{пр}} / G_{\text{пр}0}$ - входной сигнал объекта, системы регулирования со стороны регулирующего органа, характеризующий входное воздействие;
- $x_B = \Delta G_{\text{ст}} / G_{\text{ст}0}$ - сигнал внешнего возмущающего воздействия;
- $y = \Delta p_T / p_{T0}$ - выходной сигнал объекта, системы регулирования, характеризующий величину выходного воздействия;

- $x_p = \Delta h / h_0$ - сигнал на выходе регулятора или регулирующий сигнал (в рассматриваемом примере – изменение положения штока 6 и клапана 5);
- $u = \Delta M_1 / M_{10}$ - сигнал на выходе датчика или задающий сигнал.

В описанных обозначениях Δ означает приращение величин относительно их номинальных или заданных значений, обозначенных индексом «0». Таким образом, x , x_B , y , x_p , u – безразмерные величины исчисляемые в долях единицы, что существенно упрощает вычисления. Иногда x и y называют также входной и выходной величинами.

Работу рассматриваемого регулятора можно отразить на схеме, приведенной на рис. 1.4. Появление небаланса между притоком и стоком (внешнего возмущающего воздействия x_B) вызывает падение давления p_T (изменение выходного значения y). Тогда из-за разницы в усилиях, развиваемых грузом G и давлением p_T , действующих на диск 10 (рис.1.3), или, другими словами, из-за разницы сигналов $y - u = y^*$, клапан 5 будет перемещаться до тех пор, пока не исчезнет небаланс между притоком и стоком.

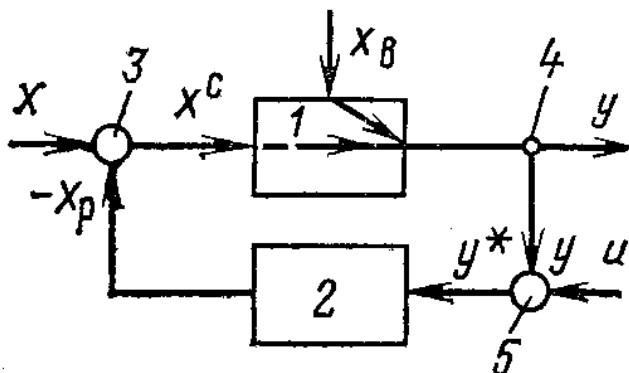


Рис. 1.4 Структурная схема замкнутой АСР

1 – объект управления, 2 – регулятор, 3 – регулирующий орган, 4- точка разветвления, 5 – элемент сравнения сигналов y и u

Регулирующий сигнал x_p (перемещение клапана 5) обозначается на схеме со знаком «минус». Физически это означает, что перемещение клапана происходит в направлении, противоположном первоначальному небалансу между притоком и стоком. Стрелки на схеме указывают направление потока вещества или энергии в объекте управления и воздействия регулятора на регулирующий орган.

Схема на рис. 1.4 полностью отражает работу рассмотренного на рис. 1.3 регулятора, но на ней нет изображения конкретных узлов и деталей. Условные обозначения сигналов являются безразмерными величинами. Все это позволяет применить математические методы для анализа работы рассмотренной АСР ко всем устройствам аналогичной структуры независимо от их конструктивного и технического исполнения. Поэтому данная схема называется **структурной**.

В рассмотренной структурной схеме выход объекта управления 1 через регулятор 2 связан с его входом. Такие системы относятся к устройствам с замкнутой цепью воздействия и называются **замкнутыми** АСР. Т.к. воздействие с выхода объекта на его вход осуществляется по единственному каналу, система называется **одноконтурной**. Передача воздействия с выхода объекта на вход называется **обратной связью**, а канал, по которому передается это воздействие – каналом обратной связи.

Существуют также **разомкнутые** АСР, которые можно получить устранением одной из связей замкнутого контура. Например, если в устройстве на рис. 1.3 перекрыть соединительную трубку 2, то получится разомкнутая система, структурная схема которой показана на рис. 1.5.

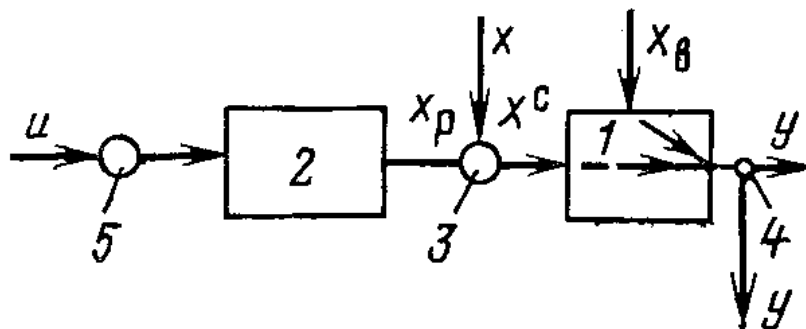


Рис. 1.5 Структурная схема разомкнутой системы

Здесь изменение давления y под действием внешнего возмущения x_B не приведет к перемещению регулирующего органа и изменению x , поскольку нарушена связь измерительного устройства 5 с регулируемой величиной. Регулирование давления в этом случае можно осуществить лишь вручную, воздействуя на поворотный рычаг с грузом.

Элементы 1 и 2 (прямоугольники со стрелками направления входного и выходного сигналов) на схемах рис. 1.4 и 1.5 называются звеньями. В общем случае **звено** – это простейший элемент системы, отличающийся единством конструкции или однородностью протекающего в нем физического (технологического) процесса. Математическим описанием звена является уравнение, связывающее входную и выходную величины:

- в установившемся состоянии (в статике) $y = f(x)$
- в состоянии движения (в динамике) $dy/dt = f[x(t), y(t)]$

Элементы или устройства, предназначенные для сравнения нескольких величин (элементы 3 и 5), называются **сумматорами**. В АСР это – измерительное устройство (устройство сравнения сигналов) или регулирующий орган. Математическое описание сумматора – операция алгебраического сложения двух или нескольких величин. Для схемы на рис. 1.4 сумматоры описываются уравнениями:

- для элемента 3 $x^c = x - x_p$
- для элемента 5 $y^* = y - u_0$

Элемент 4 схемы называется **точкой разветвления**. На рис.1.3 ей соответствует место соединения трубки 2 и трубопровода. Здесь не происходит разделение сигнала y по мощности, т.е. мощность сигнала до точки разветвления и после нее остается неизменной.

Используя понятия звена, сумматора, точки разветвления и описанные условные обозначения, можно составить структурные схемы любой АСР, что является первым этапом их исследования.

1.4 Классификация автоматических систем регулирования

АСР, действующие по отклонению регулируемой величины. Рассмотренный в п.1.2 регулятор давления в трубопроводе относится к **стабилизирующим** АСР, поскольку осуществляет поддержание регулируемой величины (давления) вблизи постоянного значения независимо от расхода воды. Работу такой системы иллюстрируют зависимости изменения значений y , u и x_B во времени, приведенные на рис. 1.6,а. Отличительная черта таких систем – постоянство задающего сигнала.

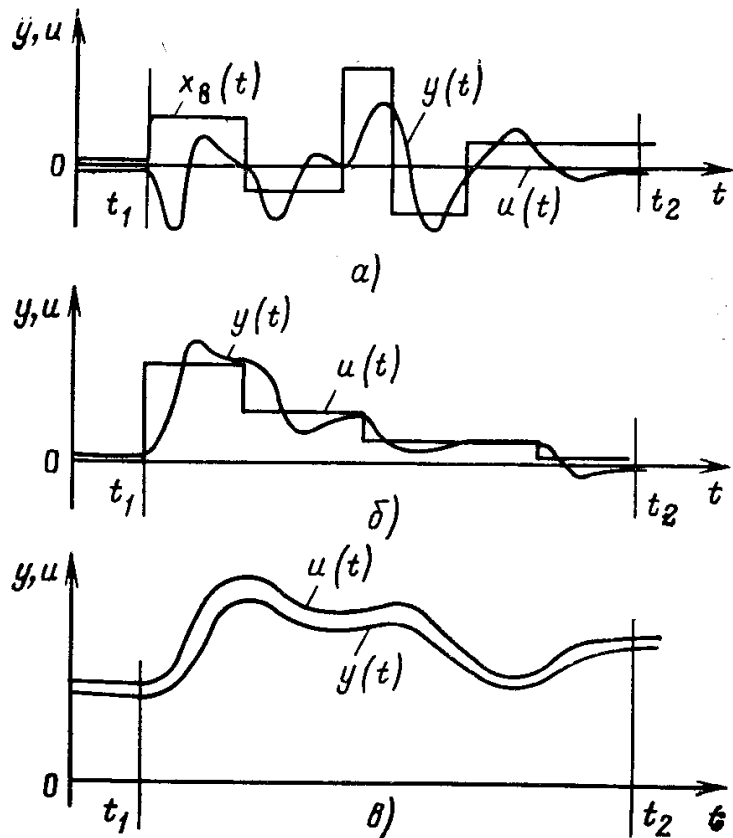


Рис. 1.6 Графики $y(t)$, $x_B(t)$, $u(t)$

В других АСР (**программных**) значение задающего воздействия u должно изменяться в течение времени по заранее заданной программе в соответствии с требуемым режимом (например, в установках для термической обработки металлоизделий). Графики, отражающие их действие, приведены на рис.1.6,б.

В **слеящих** АСР задающее воздействие u является произвольной (заранее не определенной) функцией времени. Здесь выходная величина y должна «следить» за возможными изменениями u и воспроизводить их с требуемой точностью. График работы таких систем приведен на рис. 1.6,в. Пример – крылатая ракета, в которой траектория полета по высоте корректируется по рельефу местности.

АСР, действующие по возмущению. Эти системы, в отличие от ранее рассмотренных АСР, действующих по отклонению, реагируют не на величину отклонения регулируемой величины, а на сам факт возникновения возмущения. Например, если в рассмотренном ранее регуляторе давления воды вместо сигнала по отклонению регулируемой величины (давления p_T) от заданного значения подавать сигнал по расходу воды на стоке G_{CT} (рис. 1.7, линия б) или по разности расходов на притоке и стоке ($G_{CT} - G_{ПР}$) (рис. 1.7, линии б и в) и воздействовать на перемещение регулирующего клапана в сторону ликвидации небаланса, то это приведет к выравниванию давления.

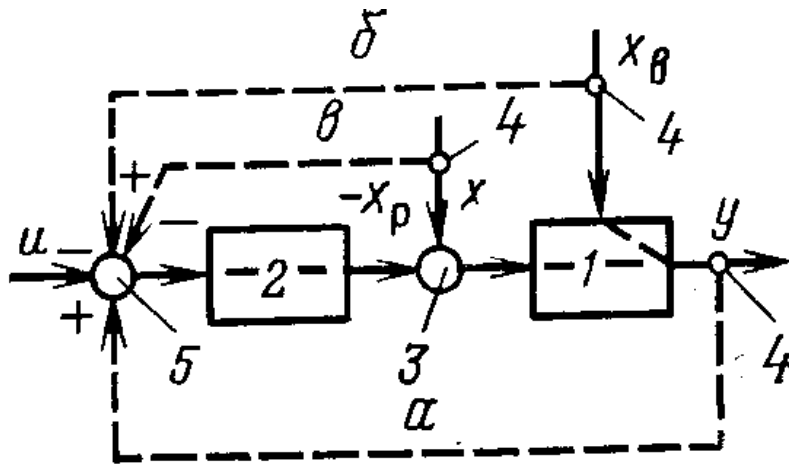


Рис. 1.7 Структурные схемы АСР:

а – АСР, действующая по отклонению, б,в – АСР, действующая по возмущению, а,б,в – комбинированная АСР

Такой способ регулирования некоторой величины вблизи постоянного значения называется регулированием по возмущению. Такие АСР включаются в работу, не дожидаясь отклонения регулируемой величины, а сразу же за появлением небаланса. Это существенно повышает быстродействие. Однако отсутствие в этих системах непосредственного контроля за регулируемой величиной может привести к недопустимому снижению точности регулирования. Поэтому на практике применяют комбинированные АСР, совмещающие принципы действия по отклонению (для обеспечения точности) и по возмущению (для достижения быстродействия).

Многосвязные АСР. Это системы, в которых предусматривается регулирование не одной, а нескольких величин. Например, не только давления в трубопроводе, но и температуры воды. Пример структурной схемы такой АСР, включающей три контура а, б и в, приведен на рис. 1.8.

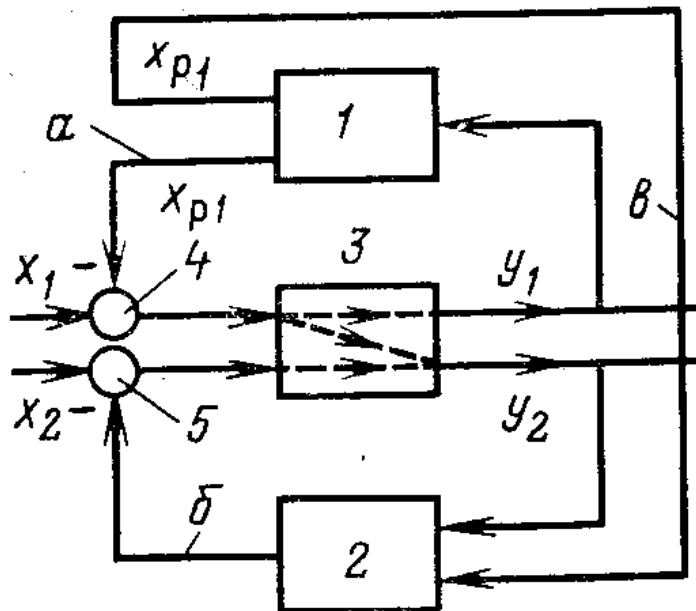


Рис. 1.8 Многосвязная АСР

1 - регулятор давления, 2 – регулятор температуры, 3 – объект управления

Экстремальные АСР. Эти системы предназначены для управления объектами по критерию достижения и удержания какого-либо показателя вблизи экстремального значения (минимума или максимума). Система снабжена устройством поиска экстремума, которое запоминает и сравнивает предыдущее значение регулируемой величины с текущим значением и формирует управляющий сигнал, побуждающий движение системы в сторону экстремума. Пример

– система управления процессом горения в топке паровых котлов по критерию максимума КПД посредством подачи воздуха в топку.

Автоматические системы логического управления. По характеру действия во времени все АСР подразделяются на системы непрерывного управления и системы логического (прерывистого) управления, которые, находясь в постоянной готовности, вступают в работу лишь в определенные моменты времени в связи с переходом на другой уровень нагрузки или же в связи с переходом на другое (резервное) оборудование. Примером таких систем служат автоматические устройства для производства технологических операций в строго определенной (логической) последовательности, например, при пусках или остановах энергоблоков и вспомогательного оборудования ТЭС.

1.5 Переходные процессы в системах регулирования

Вернемся к рассмотрению регулятора давления воды в трубопроводе (рис.1.3). Пусть:

1. внешнее возмущающее воздействие в системе отсутствует ($x_B=0$), т.е. приток воды равен ее стоку;
2. регулируемая величина (давление воды p_T) в точности соответствует заданному значению, определяемому положением груза 3 на рычаге 4 . Тогда, очевидно, что $y=0$ и $u=0$.

При этих условиях ошибка регулирования $y^* = y - u = 0$ (см. рис. 1.4) и регулирующий орган (клапан 5) находится в покое.

Состояние системы при отсутствии возмущающих воздействий и постоянстве регулируемой величины называется установившимся состоянием (режимом).

Пусть в какой-то момент времени t_1 нагрузка потребителя воды (сток) изменилась, т.е. стало $x_B \neq 0$. Предположим, сток увеличился, т.е. $\Delta G_{СТ} > 0$, тогда и $x_B > 0$ (рис. 1.9,а).

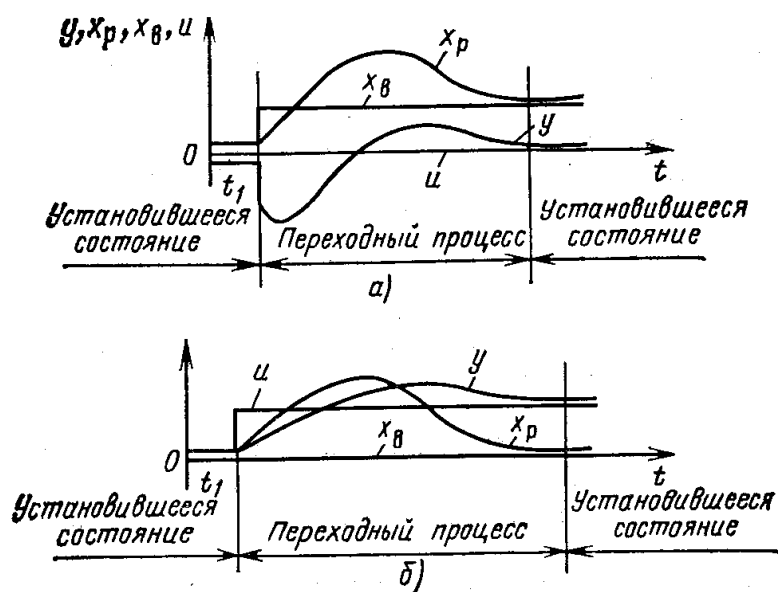


Рис. 1.9 Переходные процессы в замкнутой системе

В результате этого резко изменится давление в трубопроводе (в нашем случае – упадет), т.е. станет $y < 0$. Появится разность усилий на элементе сравнения (диске 10), т.е. станет $y^* = y - u < 0$. Это, в свою очередь, приведет к выработке регулирующего сигнала x_p , т.е. к перемещению регулирующего органа (клапана 5) в направлении ликвидации небаланса между стоком и притоком (в нашем случае – в сторону открытия клапана).

Таким образом, вся система придет в движение, которое характеризуется изменением во времени величин y , x_p , x . Это движение будет происходить до тех пор, пока не наступит новое установившееся состояние равновесия между стоком и притоком при одновременном равенстве регулируемой величины (давления) заданному значению (см. рис. 1.9).

Нарушение установившегося состояния может возникнуть и при изменении управляющего воздействия или задания регулятора $u \neq 0$ (в нашем случае – перемещении груза 3 вдоль рычага

га 4). При этом, несмотря на отсутствие внешнего возмущающего воздействия ($x_B=0$), появление разности $y^* = y - u \neq 0$ на входе в регулятор приведет к перемещению регулирующего органа и изменению регулирующего воздействия x_p . Регулируемая величина y (давление) при этом будет изменяться до достижения своего нового заданного значения (рис. 1.9,б). В обоих рассмотренных случаях происходит переход в течение некоторого времени из одного установившегося состояния системы в другое, соответствующее новому значению x_B (нагрузки) или u (задания). Такой процесс носит название переходного. Переходный процесс в замкнутой системе называется процессом автоматического регулирования.

Выше рассмотрены примеры переходных процессов в АСР, которые оканчивались новым установившимся состоянием системы. Такие процессы называются устойчивыми (сходящимися).

Однако возможны случаи, когда после приложения возмущающего воздействия новое состояние равновесия (установившееся состояние) не наступает. Например, если в рассматриваемом регуляторе давления воды трубку 2 присоединить не к верхней полости мембраны, а к нижней и изменить направление действия груза 3, как показано на рис. 1.10, то при увеличении $G_{СТ}$ и сопровождающемся при этом снижении давления p_T мембрана, шток и клапан под действием груза 3 устремятся вниз в сторону уменьшения притока, что приведет к дальнейшему уменьшению давления и в конечном итоге к полному закрытию клапана 5.

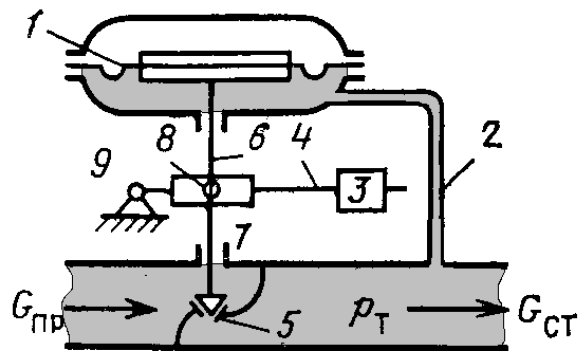


Рис. 1.10 Система с положительной обратной связью

График процесса регулирования в этом случае приведен на рис. 1.11.

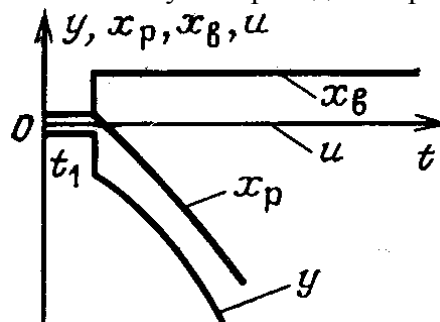


Рис. 1.11 График переходного процесса в неустойчивой системе

Такой переходный процесс называется неустойчивым (расходящимся). Для измененного регулятора (рис. 1.10) структурная схема останется такой же, как и для первоначального (рис. 1.3), т.е. она соответствует рис. 1.4, изменится лишь знак регулирующего воздействия x_p с «минуса» на «плюс». Это означает, что передача воздействия с выхода объекта на его вход будет направлена в сторону увеличения возникшего вследствие внешнего воздействия небаланса между стоком и притоком. Положительная направленность x_p превращает АСР в систему с положительной обратной связью в отличие от системы с отрицательной обратной связью, соответствующей регулятору на рис. 1.3.

1.6 Математическое описание звеньев и систем

Статические и динамические характеристики. Зависимость $y=f(x)$ звена или системы в установившемся состоянии называется статической характеристикой. Для линейного звена

она имеет вид $y=kx$. В действительности большинство реальных систем имеют линейные характеристики с «насыщением», т.е. с ограниченным линейным участком характеристики (рис. 1.12)

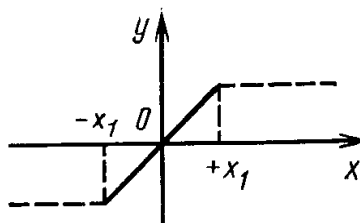


Рис. 1.12 Характеристика звена с насыщением.

Однако при малых возмущающих воздействиях x_B (до 10-15% максимально возможных) и малых отклонениях звена y они считаются линейными в области изменения от $-x_1$ до $+x_1$. Примером нелинейного звена может служить электромеханическое токовое реле со статической характеристикой (рис. 1.13), выходной величиной которого является напряжение U на его контактах, появляющееся в момент, когда ток I в индукционной катушке реле (входная величина) превысит определенное значение.

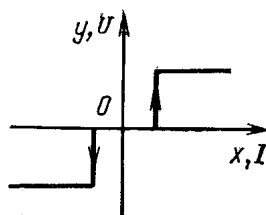


Рис. 1.13 Характеристика нелинейного звена

Математическая зависимость, описывающая изменение выходного сигнала звена во времени в переходном режиме, возникающем при изменении входного сигнала, называется **динамической** характеристикой звена.

Пример динамической характеристики – кривая изменения давления пара в барабане $p_6(t)$ парового котла при однократном ступенчатом изменении подачи топлива ΔB_T (рис. 1.14).

Для линейных динамических звеньев справедлив **принцип суперпозиции** (наложения), который состоит в следующем: если на звено действуют два и более входных сигнала, то результирующий выходной сигнал звена равен алгебраической сумме выходных сигналов в отдельности. Например, в рассмотренном выше регуляторе давления воды в трубопроводе (рис. 1.3) результирующий сигнал по давлению воды в трубопроводе p_T будет равен сумме реакций от возмущающего x_B и регулирующего x_P воздействий.

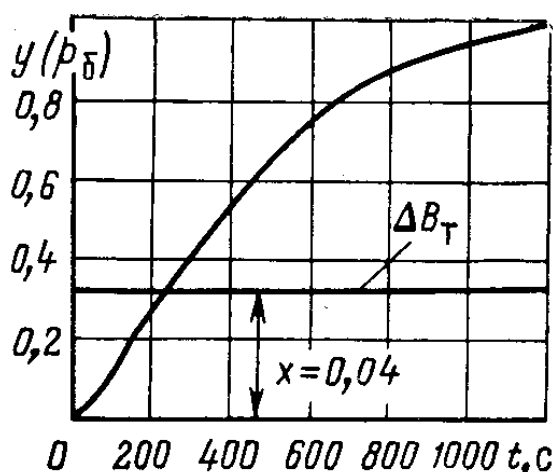


Рис. 1.14 Динамическая характеристика давления пара $p_6=f(t)$ при $x=\Delta B_T/B_{T0}=0,04$

Динамическим звеном **направленного** (детектирующего) действия называется звено, в котором энергия, вещество, продукция или информация могут распространяться только в одном направлении. Примером таких звеньев являются паровые котлы и турбогенераторы ТЭС. У

паровых котлов входом является расход топлива, а выходом – давление и расход пара. Очевидно, что изменением расхода пара или его давления нельзя изменить расход топлива.

Линейным звеном ненаправленного действия называется звено, в котором энергия, вещество или информация могут передаваться как со входа на выход звена, так и в обратном направлении.

Существуют следующие формы математического описания динамических свойств линейных звеньев и систем:

- дифференциальные уравнения,
- передаточные функции,
- временные характеристики,
- частотные характеристики.

Каждая из этих форм может быть преобразована в другую.

Дифференциальные уравнения – это математическая связь между выходными и входными величинами и их производными по времени, полученная на основе общих законов физики (термодинамики, гидравлики, механики, электротехники и т.п.). Обычно пользуются приближенным описанием с помощью линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Постоянные коэффициенты дифференциальных уравнений определяются по данным конструктивного расчета агрегата или экспериментальным путем.

В общем виде линейное дифференциальное уравнение первого порядка имеет вид:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1.3)$$

или в упрощенном виде

$$a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

Пример. Составим дифференциальное уравнение для системы регулирования уровня воды в баке (рис. 1.15).

В данном случае можно записать уравнение материального баланса в приращениях переменных величин

$$\Delta V = S \Delta H_{\delta} \quad (1.4)$$

где ΔV – прирост объема воды в баке за счет дополнительного открытия клапана 4; S – площадь бака; ΔH_{δ} – прирост уровня воды в баке.

Прирост объема воды в единицу времени равен

$$\Delta G_{\text{пр}} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = S \frac{\Delta H_{\delta}}{\Delta t} \quad (1.5)$$

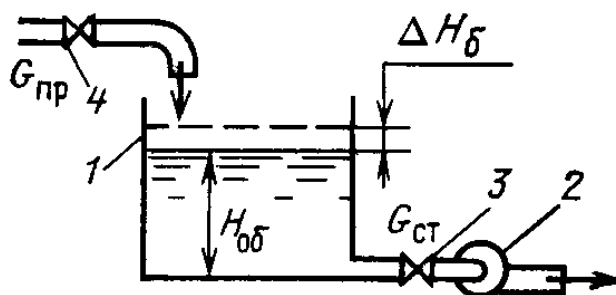


Рис. 1.15 Регулирование уровня воды в баке:

1 – бак с водой; 2- откачивающий насос; 3, 4 – краны стока и притока

Если перейти к относительным величинам, т.е., приняв за базовые значения исходный приток воды $G_{0\text{пр}}$ и исходный уровень $H_{0\text{об}}$, поделить на них правую и левую части выражения (1.5), то после несложных алгебраических преобразований можно записать

$$\frac{\Delta G_{\text{ПР}} G_{0\text{ПР}}}{G_{0\text{ПР}} H_{0\delta} S} = \frac{\Delta H_{\delta}}{H_{0\delta} \Delta t} \quad (1.6)$$

В рассматриваемом примере введем общепринятые обозначения согласно положений, изложенных в п. 1.3:

$$\frac{\Delta G_{\text{ПР}}}{G_{0\text{ПР}}} = x - \text{входной сигнал объекта,}$$

$$\frac{\Delta H_{\delta}}{H_{0\delta}} = y - \text{выходной сигнал объекта (регулируемая величина),}$$

$$\frac{G_{0\text{ПР}}}{H_{0\delta} S} = k_H - \text{постоянный коэффициент.}$$

Тогда выражение (1.6) можно переписать в виде

$$k_H x = \frac{y}{\Delta t} \quad (1.7)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение объекта по уровню воды

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_H x(t) \quad (1.8)$$

Физически это означает, что скорость изменения воды в баке прямо пропорциональна приросту расхода воды на притоке и обратно пропорциональна площади поперечного сечения бака. Решение уравнения (1.8) в частном случае, когда входное воздействие неизменно (изменяется ступенчато), т.е. когда $x=1$, равно $y=k_H t$.

Передаточные функции. Если в дифференциальном уравнении (1.3) ввести обозначение

$$p = \frac{d}{dt} - \text{символ (оператор) дифференцирования, то его можно переписать в виде}$$

$$a_1 p y(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1.9)$$

Умножение переменной $y(t)$ на p означает ее дифференцирование, а деление – интегрирование, т.е.

$$p y(t) = \frac{dy(t)}{dt}$$

$$\frac{y(t)}{p} = \int_0^{\infty} y(t) dt$$

Уравнение (1.9) можно переписать в виде

$$y(t) \left(\frac{a_1}{a_0} p + 1 \right) = \frac{b_0}{a_0} x(t) \quad (1.10)$$

Аналогично можно записать дифференциальные уравнения более высокого порядка:

$$D(p)y(t) = B(p)x(t) \quad (1.11)$$

где $D(p)$, $B(p)$ – многочлены от p .

Такая форма записи уравнений называется **операторной**.

Уравнения типов (1.10) и (1.11) можно решать как алгебраические относительно p , если преобразовать функции переменных $y(t)$, $x(t)$ в функции другой переменной – p , т.е. в $Y(p)$, $X(p)$.

Это преобразование можно осуществить с помощью интеграла Лапласа-Карсона:

$$p \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt = Y(p) \quad (1.12)$$

После выполнения операций интегрирования и подстановки пределов 0 и ∞ вместо t получается выражение, не содержащее t и зависящее только от p , т.е. $Y(p)$, в котором p рассматривается как независимая переменная (аргумент). Функция $y(t)$, подвергаясь преобразованиям, называется **оригиналом**, а функция $Y(p)$, получаемая в результате преобразования, - ее изображением $L[y(t)]$.

Примеры нахождения изображений.

Изображение ступенчатой функции

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ x_1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$$

Подставляя значение $x(t)=x_1$ в выражение (1.12), получим

$$X(p) = p \int_0^{\infty} x_1 e^{-pt} dt = -x_1 p \frac{e^{-pt}}{p} \Big|_0^{\infty} = x_1 \quad (1.13)$$

т.е. изображение постоянной величины равно самой этой величине.

Изображение производной и интеграла функции.

Пусть $Y(p)$ служит изображением функции $y(t)$, тогда можно показать, что изображение ее производной будет равно

$$L \left[\frac{dy(t)}{dt} \right] = pY(p) - pY(0)$$

При $Y(0)=0$

$$L \left[\frac{dy(t)}{dt} \right] = pY(p) \quad (1.14)$$

т.е. изображение производной получается умножением на p изображения функции.

Аналогично можно показать, что изображение интеграла функции равно

$$L \left[\int_0^{\infty} y(t) dt \right] = \frac{L[y(t)]}{p} = \frac{Y(p)}{p} \quad (1.15)$$

т.е. изображение интеграла получается делением на p изображения функции.

Вернемся к дифференциальному уравнению, записанному в операторной форме (1.9). При $x(t)=x_1$ получим

$$a_1 p y(t) + a_0 y(t) = b_0 x_1$$

Запишем его изображение с учетом условий (1.13) и (1.14)

$$a_1 p Y(p) + a_0 Y(p) = b_0 x_1 \quad (1.16)$$

Аналогично можно получить изображение уравнения (1.11)

$$D(p)Y(p) = B(p)X(p) \quad (1.17)$$

где p - символ дифференцирования; $D(p)$ и $B(p)$ - многочлены от p (операторные многочлены); $Y(p)$ и $X(p)$ - изображения регулируемой (выходной) величины и возмущающего воздействия (входной).

Найдем отношение

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{B(p)}{D(p)} \quad (1.18)$$

Отношение изображения выходной величины к изображению входной величины называется **передаточной функцией (оператором)** звена.

Для системы, описываемой уравнением (1.10) при нулевых начальных условиях [при $y(0)$, $x(0)=0$ и равенстве нулю производных от $y(t)$ и $x(t)$ при $t=0$] передаточная функция равна

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_0}{a_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_1}{a_0} p} \quad (1.19)$$

На основе выражений (1.18) и (1.19) можно заключить, что оператор звена или системы равен отношению операторных многочленов правой и левой частей их уравнений.

Временные характеристики. Существуют различные виды временных характеристик, но наиболее распространены переходные и импульсные.

Переходной характеристикой (кривой разгона) звена называется зависимость изменения выходной величины от времени $y(t)$ при приложении ко входу звена однократного ступенчатого возмущающего воздействия $x(t)=x_1$ при нулевых начальных условиях. Переходная характеристика может быть получена экспериментально или аналитически путем решения дифференциального уравнения звена, т.е. определения $y(t)$ при $x(t)=x_1$. Пример кривой разгона промышленного объекта приведен на рис. 1.16.

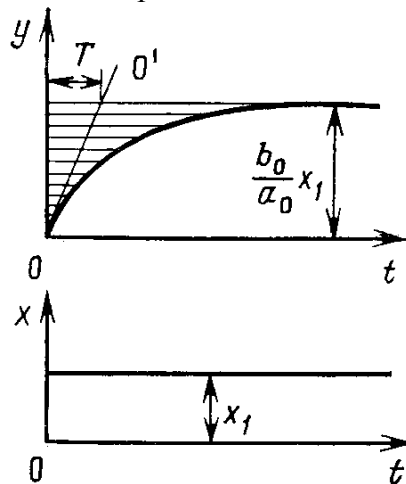


Рис. 1.16 График экспоненты

Пример аналитического определения переходной характеристики рассмотрим, используя дифференциальное уравнение (1.10), приняв в нем $x(t)=x_1$. Тогда получим

$$y(t) \left(\frac{a_1}{a_0} p + 1 \right) = \frac{b_0}{a_0} x_1 \quad (1.20)$$

Данное уравнение относится к линейным дифференциальным уравнениям первого порядка с ненулевой правой частью. Его решение состоит из двух слагаемых – вынужденной и свободной:

$$y(t) = y_{\text{вын}} + y_{\text{св}}$$

Для определения свободной составляющей необходимо найти решение характеристического уравнения

$$\frac{a_1}{a_0} p + 1 = 0$$

откуда $p = -a_0/a_1$

Тогда свободная составляющая запишется в виде

$$y_{\text{св}} = A e^{pt} = A e^{-\frac{a_0}{a_1} t}$$

где A – постоянная интегрирования.

Вынужденная составляющая определяется из уравнения (1.20) в установившемся режиме, т.е. при $t \rightarrow \infty$ или, что тоже самое при $p=0$. Отсюда имеем

$$y_{\text{ВЫН}} = y(\infty) = y(t)_{p=0} = \frac{b_0}{a_0} x_1$$

Таким образом, решение можно записать в виде

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} x_1 + A e^{-\frac{a_0 t}{a_1}}$$

Для рассматриваемого случая должно соблюдаться условие: при $t=0$ должно быть $y(0)=0$, т.е. в начальный момент возмущения контролируемая величина не изменяется, выходной сигнал отсутствует в силу наличия инерции. Подставляя $t=0$ и $y(t)=0$ в последнее выражение, получим значение постоянной интегрирования A

$$A = -\frac{b_0}{a_0} x_1$$

С учетом полученных выражений для $y_{\text{ВЫН}}$, $y_{\text{СВ}}$ и A можно окончательно записать выражение для переходной характеристики

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} x_1 \left(1 - e^{-\frac{a_0 t}{a_1}} \right) \quad (1.21)$$

Отношение $k=y(\infty)/x_1=b_0/a_0$ называется **коэффициентом усиления** звена, который равен отношению установившегося значения выходной величины к значению ступенчатого возмущения.

Величина $T=a_1/a_0$ называется **постоянной времени**. На рис.1.16 она соответствует отрезку на линии установившегося значения выходной величины, отсекаемому касательной $00'$, проведенной к кривой $y(t)$ в начале координат. Постоянная времени равна времени достижения выходной величиной установившегося значения при условии ее изменения с постоянной скоростью, равной скорости изменения в момент появления единичного ступенчатого возмущения. Численно значение T равно площади заштрихованной на рис. 1.16 фигуры.

С учетом введенных обозначений уравнение (1.21) примет вид

$$y(t) = kx_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (1.22)$$

Передаточную функцию (1.19) при этом можно переписать в виде

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp} \quad (1.23)$$

Таким образом, располагая кривой разгона, например полученной опытным путем, и определив по ней k и T , можно получить выражение передаточной функции звена, описываемого дифференциальным уравнением первого порядка.

Импульсной характеристикой звена называется зависимость изменения выходной величины от времени при приложении ко входу звена возмущающего воздействия импульсной формы. График импульсной характеристики $y(t_m)$ для звена, описываемого уравнением (1.22), приведен на рис. 1.17.

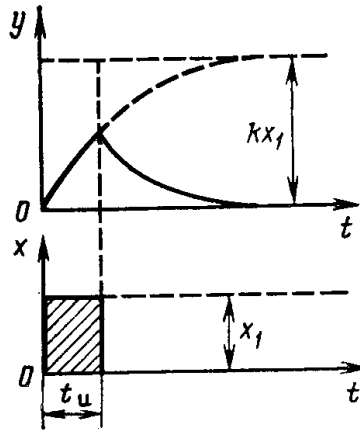


Рис. 1.17 Импульсная характеристика

Необходимость определения импульсной характеристики возникает в том случае, когда ожидаемое установившееся значение $y(\infty)$ превышает ее максимально допустимый размер по условиям эксплуатации.

Частотные характеристики

Эти характеристики получают путем приложения ко входу звена возмущающего воздействия синусоидальной (гармонической) формы, например, перемещением регулирующего органа объекта по закону

$$x(t) = |x| \sin \omega t \quad (1.24)$$

где $|x|$ - амплитуда колебаний входного сигнала; $\omega = 2\pi/T$ - угловая частота (рад/с, рад/мин); T - период колебаний (с, мин).

Если звено является линейным, то выходной сигнал тоже будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой, но его амплитуда и фаза могут изменяться в зависимости от динамических свойств звена (рис. 1.18):

$$y(t) = |y| \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.25)$$

где $|y|$ - амплитуда выходных колебаний; φ - сдвиг по фазе.

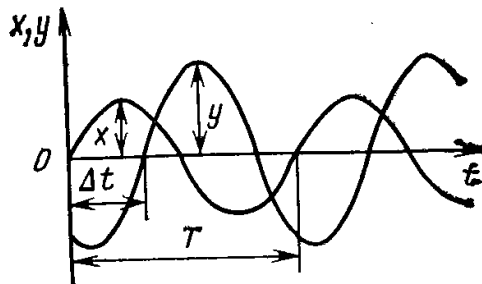


Рис. 1.18 Входное и выходное гармонические воздействия

На рис. 1.18 выходные колебания отстают по фазе от входных на время Δt или угол $\varphi = 2\pi\Delta t/T = \omega\Delta t$. Поэтому в формуле (1.25) этот угол взят со знаком «минус».

Динамические частотные свойства линейных звеньев определяются отношением выходного и входного сигналов по амплитудам и фазе.

Зависимость отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала (измеренных при одной и той же частоте) от частоты входного сигнала называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ):

$$M(\omega) = \frac{|y|}{|x|}(\omega) \quad (1.26)$$

Зависимость сдвига фаз между выходным и входным сигналами (измеренного при одной и той же частоте) от частоты колебаний входного сигнала называется **фазочастотной характеристикой** (ФЧХ):

$$\varphi(\omega) = \omega \Delta t \quad (1.27)$$

Часто при изучении процессов регулирования используются **комплексные частотные характеристики** (КЧХ), объединяющие частотные характеристики $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$. Их строят в полярных координатах R, φ или на комплексной плоскости U, iV , на которой КЧХ представляет собой годограф вектора (кривая, описываемая концом вектора), построенного из начала координат для различных значений частот – от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$. Модуль (длина) этого вектора равен $M(\omega)$, а аргумент (угол поворота) – $\varphi(\omega)$. Пример КЧХ приведен на рис. 1.19.

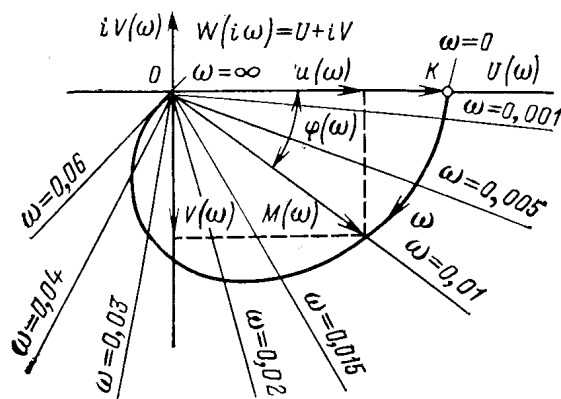


Рис. 1.19 Комплексная частотная характеристика

Значение КЧХ при $\omega = 0$ откладывается по оси абсцисс. При изменении ω изменяется $\varphi(\omega)$, и этот угол при отставании выходных колебаний от входных откладывается в направлении часовой стрелки, а при опережении – против часовой стрелки. На образовавшихся лучах откладывается соответствующее данной частоте значение $R = M(\omega)$.

В полярных координатах запись КЧХ имеет вид:

$$W(i\omega) = R e^{i\varphi(\omega)} = M(\omega) e^{i\omega \Delta t} \quad (1.28)$$

Запись КЧХ в прямоугольных координатах на комплексной плоскости имеет вид:

$$W(i\omega) = U(\omega) + iV(\omega) \quad (1.29)$$

где $U(\omega) = M(\omega) \cos \varphi(\omega)$ – вещественная часть вектора КЧХ; $V(\omega) = M(\omega) \sin \varphi(\omega)$ – его мнимая часть.

Модуль вектора (его длина)

$$M(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$$

аргумент или угол поворота вокруг начала координат

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$$

КЧХ может быть получена из передаточной функции звена заменой оператора p на $i\omega$. Следовательно, для рассмотренного выше объекта, имеющего передаточную функцию вида (1.23), его КЧХ будет иметь вид

$$W(i\omega) = \left| \frac{y}{x} \right|(\omega) e^{-i\varphi(\omega)} = \frac{k}{1 + i\omega T} \quad (1.30)$$

Преобразование передаточной функции $W(p)$ в комплексную частотную характеристику $W(i\omega)$ с помощью формальной математической операции (подстановка $i\omega$ вместо p) имеет, вместе с тем, вполне определенный физический смысл, поскольку КЧХ отражает реакцию звена на входное гармоническое воздействие, а передаточная функция – на воздействие произвольной формы.

1.7 Типовые динамические звенья

Сложные системы регулирования (объекты и регуляторы) обычно условно разбивают на более простые элементы (звенья), динамические характеристики которых описывают с помощью **типовых** динамических звеньев. Тип звена определяется видом переходного процесса при одном и том же входном воздействии и не зависит от его физической природы. Звенья, которые характеризуются простой математической зависимостью между входной и выходной величинами, называются **элементарными**. Обычно это зависимости в виде дифференциальных уравнений не выше второго порядка.

Усилительное звено рассмотрим на примере простой электрической цепи (рис. 1.20).

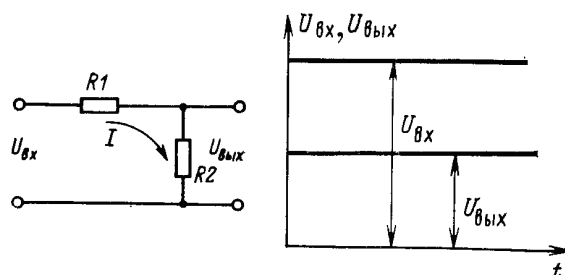


Рис. 1.20 Усилительное звено (электрическая цепь) и его временная разгонная характеристика

Для электрической цепи можно записать соотношения

$$U_{BX} = I(R_1 + R_2); \quad U_{BЫX} = IR_2 \quad (1.31)$$

Отсюда имеем

$$U_{BЫX} / U_{BX} = R_2 / (R_1 + R_2) = k \quad (1.32)$$

$$U_{BЫX} = kU_{BX} \quad \text{или} \quad y = kx$$

где k – коэффициент усиления.

Если входной сигнал изменить скачком, как показано на рис. 1.20, то и выходной сигнал изменится мгновенно. Поэтому такое звено называется **безынерционным** или **усилительным**.

Математическое описание усилительного звена – уравнение $y = kx$. Передаточная функция – $W(p) = k$, его КЧХ также равна k и изображается точкой на вещественной оси комплексной плоскости.

Примером усилительного звена в механике служит рычаг для преобразования усилий (рис. 1.21), для которого $k = l_1 / l_2$.

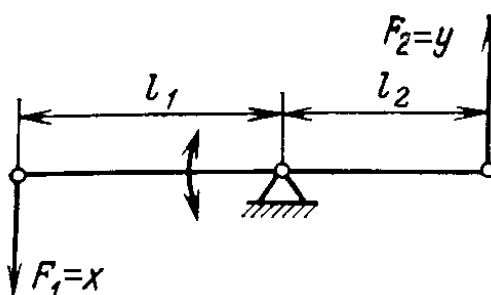


Рис. 1.21 Поворотный рычаг

Инерционное звено I порядка рассмотрим на примере электрической цепи, состоящей из резистора и емкости (RC-цепочки), показанной на рис. 1.22.

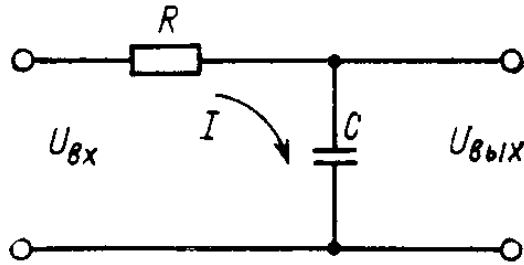


Рис. 1.22 RC-цепочка

Приложение на вход цепи напряжения $U_{BX}(t)$ вызывает в ней переходный процесс. При этом токи в элементах цепи равны $I_R=I_C$ и могут быть найдены по формулам

$$I_R = \frac{U_{BX}(t) - U_{ВЫХ}(t)}{R}$$

$$I_C = C \frac{dU_{ВЫХ}(t)}{dt}$$

Приравняв эти два выражения, получим

$$RC \frac{dU_{ВЫХ}(t)}{dt} + U_{ВЫХ}(t) = U_{BX}(t) \quad (1.33)$$

Произведение $RC=T$ является постоянной времени звена, следовательно

$$T \frac{dU_{ВЫХ}(t)}{dt} + U_{ВЫХ}(t) = U_{BX}(t) \quad (1.34)$$

Это уравнение тождественно уравнению (1.3), т.е. $a_1=T$, $a_0=b_0=1$, $U_{BX}(t)=x(t)$ и $U_{ВЫХ}(t)=y(t)$. Решение его при скачкообразном изменении $x(t)$ уже рассматривалось [формула (1.22) и рис. 1.16].

Другим примером инерционного звена может служить одноемкостный бак с постоянным подпором воды на стоке (рис. 1.23).

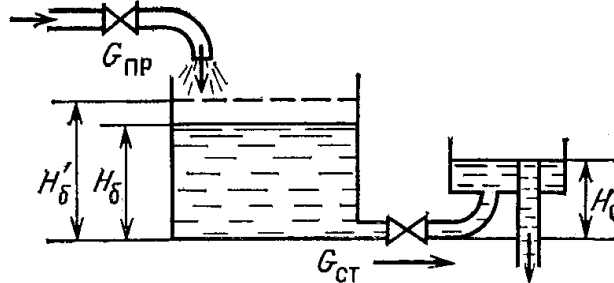


Рис. 1.23 Гидравлическая модель инерционного звена

Здесь при изменении расхода воды на притоке (внешнее возмущающее воздействие), например, при увеличении притока на $\Delta G_{ПР}$, уровень воды в баке не будет возрастать безгранично, т.к. с ростом H_{δ} увеличивается перепад давлений на кране стока, расход через который описывается выражением $G_{СТ} = \alpha \sqrt{H_{\delta} - H_c}$, где α – коэффициент расхода. При некотором постоянном значении уровня воды в баке H'_{δ} возросший сток сравняется с притоком $G'_{ПР} = G_{0ПР} + \Delta G_{ПР}$. Наступит новое состояние равновесия системы при новом установившемся значении уровня.

Кривая разгона этого элементарного звена, называемого **инерционным** или **апериодическим**, представляет собой экспоненту, показанную на рис. 1.16. Реакция этого звена на импульсное возмущение (импульсная характеристика) представлена на рис. 1.17. Передаточная функция $W(p)$ и КЧХ $W(i\omega)$ инерционного звена соответствуют выражениям (1.23) и (1.30).

Построим график КЧХ инерционного звена, для чего представим выражение (1.30) в виде суммы действительной и мнимой частей

$$W(i\omega) = \frac{k}{1+i\omega T} = \frac{k}{1+\omega^2 T^2} - i \frac{k\omega T}{1+\omega^2 T^2} = U(\omega) + iV(\omega) \quad (1.35)$$

Поделив выражение для мнимой составляющей на выражение для действительной части $W(i\omega)$, получим

$$V(\omega)/U(\omega) = -\omega T$$

Подставив это отношение в выражение для $U(\omega)$, получим

$$U(\omega) = \frac{k}{1+\omega^2 T^2} = \frac{k}{1 + \frac{V^2(\omega)}{U^2(\omega)}} = \frac{kU^2(\omega)}{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$$

Откуда

$$U(\omega)[U^2(\omega) + V^2(\omega)] - kU^2(\omega) = 0$$

После сокращения на $U(\omega)$ получим

$$U^2(\omega) + V^2(\omega) - kU(\omega) = 0$$

Прибавив к обеим частям выражения слагаемое $k^2/4$, окончательно получим

$$\left[U^2(\omega) - k/2 \right] + V^2(\omega) - kU(\omega) = k^2/4 \quad (1.36)$$

Это выражение является уравнением полуокружности с радиусом $k/2$, касающейся мнимой оси в начале координат, с центром $0'$, расположенным на вещественной оси (рис. 1.24).

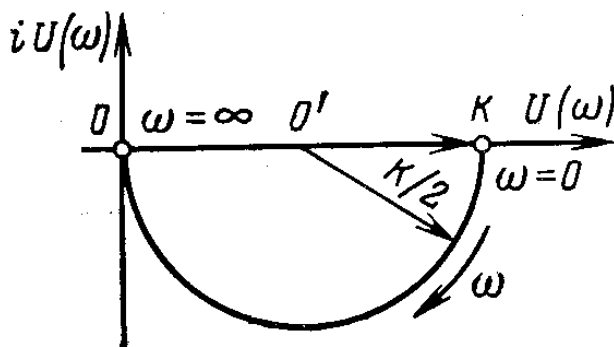


Рис. 1.24 КЧХ инерционного звена

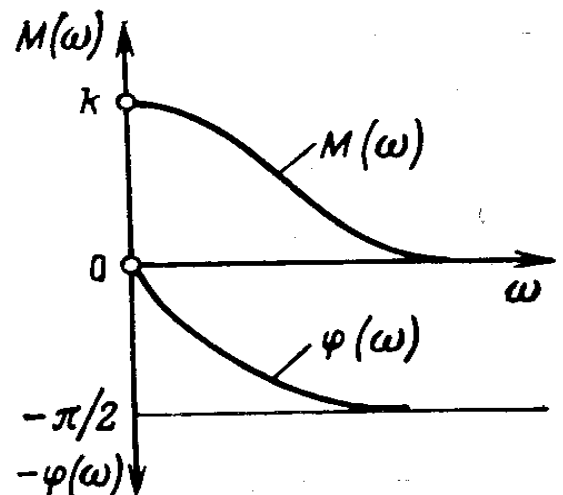


Рис. 1.25 АЧХ и ФЧХ инерционного звена

АЧХ и ФЧХ инерционного звена определяются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} M(\omega) &= \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \\ \varphi(\omega) &= \text{arctg} \left[-\frac{V(\omega)}{U(\omega)} \right] = \text{arctg}(\omega T) \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

Графики этих функций приведены на рис. 1.25. Как видно из этих графиков, при прохождении сигнала через инерционное звено в зависимости от частоты ω выходной сигнал отстает по фазе от входного. Звенья такого типа называются фазосдвигающими.

Инерционное звено II порядка образуется при наличии двух соединенных элементов, способных запасать энергию и обмениваться ею.

Примерами таких звеньев могут служить гидромеханическая система (рис. 1.26), содержащая массу, подвешенную на пружине, и демпфирующее устройство, а также электрическая цепь, состоящая из емкости, индуктивности и резистора (рис. 1.27).

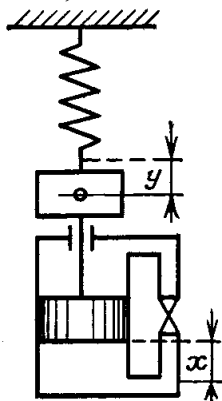


Рис. 1.26 Гидромеханический аналог колебательного звена

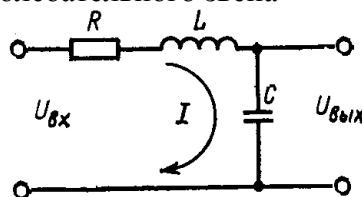


Рис. 1.27 RLC-цепочка – колебательное звено

Для электрической цепи (рис. 1.27) можно записать

$$U_{BX}(t) - U_{ВЫХ}(t) = IR + L \frac{dI}{dt}$$

$$I = C \frac{dU_{ВЫХ}(t)}{dt}$$

Подставив I в первое уравнение, получим

$$U_{BX}(t) = U_{ВЫХ}(t) + CR \frac{dU_{ВЫХ}(t)}{dt} + LC \frac{d^2U_{ВЫХ}(t)}{dt^2}$$

Введем следующие обозначения, описывающие звено в терминах АСР:

$$U_{BX}(t) = x(t) \quad - \quad \text{входное воздействие}$$

$$U_{ВЫХ}(t) = y(t) \quad - \quad \text{выходное воздействие}$$

$$CR = T_1, \quad \sqrt{LC} = T_2 \quad - \quad \text{постоянные времени}$$

$$k = \frac{U_{ВЫХ.уст}}{U_{BX.уст}} \quad - \quad \text{коэффициент усиления}$$

Тогда дифференциальное уравнение инерционного звена II порядка можно записать:

- в общем виде

$$T_2^2 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t) \quad (1.38)$$

- в операторной форме

$$T_2^2 p^2 y(t) + T_1 p y(t) + y(t) = kx(t) \quad (1.39)$$

Решение этих уравнений (временную переходную характеристику) можно найти, определив корни их характеристического уравнения

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = 0, \quad (1.40)$$

которые будут равны

$$p_{1,2} = -\frac{T_1}{2T_2^2} \pm \frac{\sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2T_2^2} \quad (1.41)$$

При этом могут быть два случая в зависимости от знака дискриминанта:

1). $T_1^2 \geq 4T_2^2$ (дискриминант положительный). Тогда корни характеристического уравнения являются вещественными, и временная характеристика (решение дифференциального уравнения) запишется в виде

$$y(t) = kx(t) \left[1 + \frac{P_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{P_2}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \right] \quad (1.42)$$

Поскольку, как следует из выражения (1.41), оба корня p_1 и p_2 получаются меньше нуля, то выражение (1.42) описывает аperiodический процесс, для которого $y(t) \rightarrow kx(t)$ при $t \rightarrow \infty$ (рис. 1.28, кривая 1).

2). $T_1^2 < 4T_2^2$ (дискриминант отрицательный). Корни получаются комплексно-сопряженными вида

$$p_{1,2} = -\alpha \pm i\beta \quad (1.43)$$

Временная характеристика при этом запишется в виде

$$y(t) = kx(t) \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t + \cos \beta t \right) \right] \quad (1.44)$$

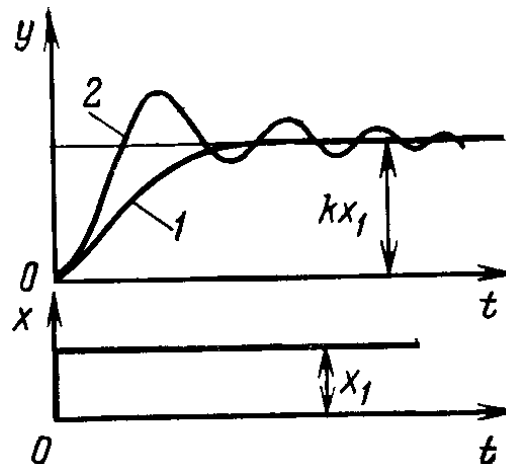


Рис. 1.28 Временная (разгонная) характеристика инерционного звена II порядка

Выражение (1.44) представляет собой затухающий колебательный процесс, для которого $y(t) \rightarrow kx(t)$ при $t \rightarrow \infty$ (рис. 1.28, кривая 2). Такие инерционные звенья (имеющие переходную характеристику колебательной формы) называются **колебательными**. Передаточная функция колебательного звена может быть получена из уравнения (1.39) и имеет вид

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2} \quad (1.45)$$

КЧХ, а также АЧХ $M(\omega)$ и ФЧХ $\varphi(\omega)$ можно получить из (1.45) подстановкой $p=i\omega$

$$W(i\omega) = \frac{k}{1 + i\omega T_1 - \omega^2 T_2^2} = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_2^2)^2 + \omega^2 T_1^2}} e^{-i \left(\arctg \frac{\omega T_1}{1 - \omega^2 T_2^2} \right)} = M(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \quad (1.46)$$

Частотные характеристики инерционного звена II порядка приведены на рис. 1.29.

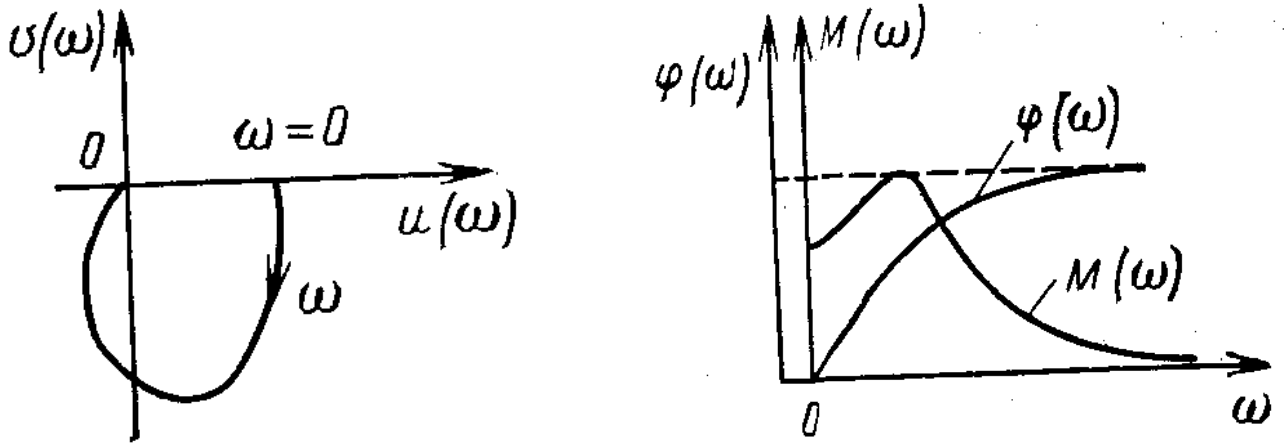


Рис. 1.29 Частотные характеристики инерционного звена II порядка

Интегрирующее звено рассмотрим на примере поведения уровня воды в баке, на выходе которого установлен откачивающий насос (рис. 1. 15). Математическое описание этого объекта при возмущении изменением расхода воды на притоке было получено ранее [формула (1.8)] и имеет вид

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_H x(t)$$

Проинтегрировав его обе части, получим

$$y(t) = k_H \int_0^{\infty} x(t) dt \quad (1.47)$$

Передаточная функция (операторная форма) при этом равна

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_H}{p} \quad (1.48)$$

Такие звенья с интегральной зависимостью между выходом и входом называются **интегрирующими**. К ним относятся объекты, связанные с регулированием уровней жидкости в открытых баках и сосудах под давлением, исполнительные механизмы автоматических регуляторов и др. Интегрирующее звено, как и инерционное, принадлежит к фазосдвигающим.

Переходная характеристика интегрирующего звена при скачкообразном возмущении, т.е. при $x(t) = x_1$, как следует из формулы (1.47), есть прямая, выходящая из начала координат под углом α (рис. 1.30, прямая a):

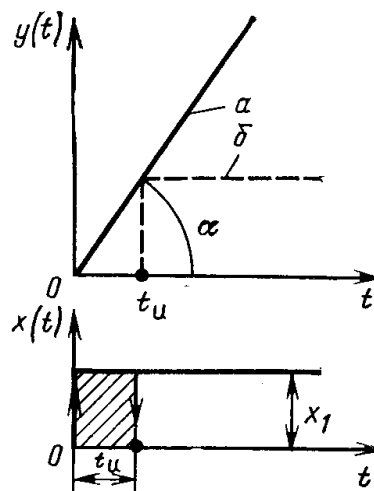


Рис. 1.30 Временная (переходная) характеристика интегрирующего звена:
 a – разгонная, b – импульсная

$$y(t) = k_{II}t \quad (1.49)$$

где $k_{II} = tg\alpha/x$ - коэффициент пропорциональности интегрирующего звена, характеризующий скорость нарастания сигнала на выходе после появления ступенчатого возмущения. Импульсная характеристика звена представлена на рис. 1.30 пунктирной линией б. При этом сигнал $y(t)$ остается неизменным после $t=t_{II}$, т.к. $x(t)=0$ при $t>t_{II}$.

Подстановкой $p=i\omega$ в уравнение (1.48) можно получить КЧХ звена

$$W(i\omega) = \frac{k_{II}}{i\omega} = -i \frac{k_{II}}{\omega} \quad (1.50)$$

Как следует из (1.50), КЧХ интегрирующего звена не имеет действительной части [$U(\omega)=0$] и располагается на комплексной плоскости вдоль мнимой отрицательной полуоси (рис. 1.31).

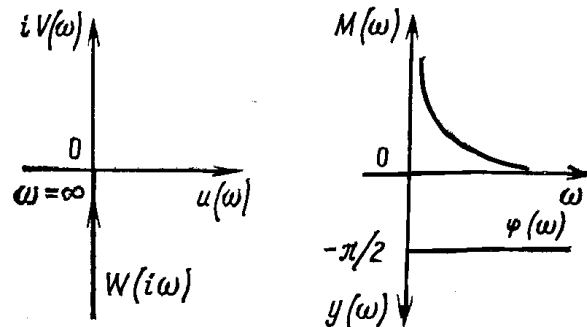


Рис. 1.31 КЧХ, АЧХ и ФЧХ интегрирующего звена

Характеристики АЧХ и ФЧХ определяются из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} M(\omega) &= \sqrt{0 + V^2(\omega)} = \frac{k_{II}}{\omega} \\ \varphi(\omega) &= \arctg \left[-\frac{V(\omega)}{0} \right] = -\arctg \infty = -\frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1.51)$$

Звено запаздывания рассмотрим на примере ленточного транспортера для переброски сыпучих материалов из одного бункера в другой (рис. 1.32).

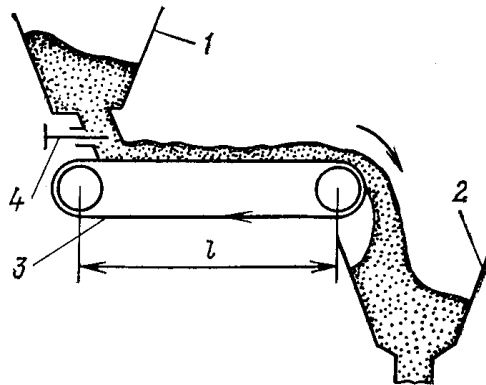


Рис. 1.32 Ленточный транспортер-дозатор – звено запаздывания:

1, 2 – бункера, 3 – лента, 4 – шиббер-дозатор

Особенность его работы как звена состоит в том, что входной сигнал в нем не претерпевает изменений по амплитуде, но сдвигается во времени (по фазе). Т.е., если изменить количество поступающего на ленту материала с помощью дозатора 4, то точно такое же изменение произойдет на выходе ленты через время $\tau=l/v$, где l – длина транспортерной ленты, v – скорость ее движения. Время τ называется временем **транспортного** или **чистого** запаздывания. Примером звена запаздывания на ТЭС служат также сравнительно длинные участки трубопровода.

Математическое описание звена запаздывания в функции времени имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= 0 \quad \text{при } t \leq \tau \\ y(t) &= x(t) \quad \text{при } t \geq \tau \end{aligned} \right\} \quad (1.52)$$

Временная характеристика запаздывания приведена на рис. 1.33.

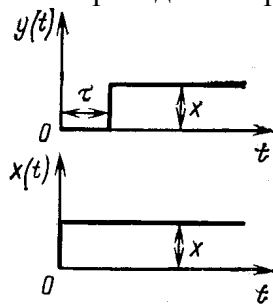


Рис. 1.33 Временная (разгонная) характеристика звена запаздывания

Если на вход звена запаздывания подать гармонический сигнал, то на выходе получится такой же синусоидальный сигнал той же амплитуды, сдвинутый во времени на постоянную величину τ независимо от частоты. При этом фазовый сдвиг линейно зависит от частоты:

$$\varphi(\omega) = -\frac{2\pi}{T} \tau = -\omega\tau \quad (1.53)$$

Таким образом, график ФЧХ этого звена – прямая линия, исходящая из начала координат, а график АЧХ $M(\omega)$ – прямая, параллельная оси абсцисс и проходящая через единицу, т.к. амплитуда входного сигнала при прохождении через звено запаздывания не изменяется (рис. 1.34).

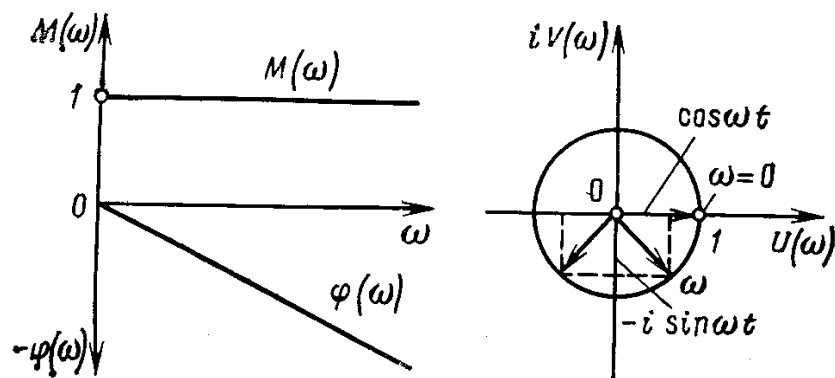


Рис. 1.34 Частотные характеристики звена запаздывания

КЧХ этого звена записывается в виде

$$W(i\omega) = 1e^{-i\omega\tau} = \cos \omega\tau - i \sin \omega\tau \quad (1.54)$$

Это означает, что при изменении ω от 0 до ∞ вектор $W(i\omega)$ описывает на комплексной плоскости окружность единичного радиуса с центром в начале координат (рис. 1.34).

Подставив в выражение (1.54) $p=i\omega$, можно получить передаточную функцию звена запаздывания

$$W(p) = e^{-p\tau} \quad (1.55)$$

Реальное дифференцирующее звено. Ранее рассмотренные инерционные, интегрирующие и запаздывающие звенья относятся к фазосдвигающим элементам АСР, в которых выходной сигнал отстает по фазе от входного. В рассматриваемом дифференцирующем звене наоборот выходной сигнал опережает входной. Рассмотрим в качестве примера электрическую цепь, представленную на рис. 1.35.

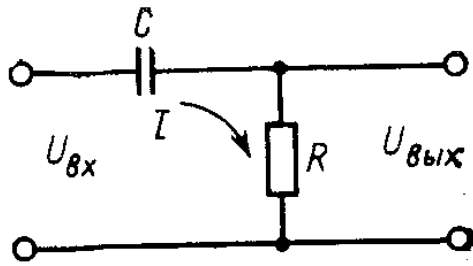


Рис. 1.35 RC-цепочка

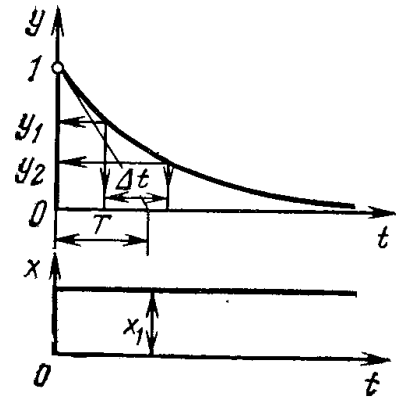


Рис. 1.36 Временная характеристика дифференцирующего звена

Если на вход цепи подать скачкообразный сигнал $U_{BX}(t)$, то в ней возникнет переходный процесс, который характеризуется величинами токов в элементах:

$$\left. \begin{aligned} I_R &= \frac{U_{ВЫХ}(t)}{R} \\ I_C &= \frac{d[U_{BX}(t) - U_{ВЫХ}(t)]}{dt} C \end{aligned} \right\} \quad (1.56)$$

Поскольку эти токи равны $I_R = I_C$, то, приравняв выражения, получим

$$RC \frac{dU_{ВЫХ}(t)}{dt} + U_{ВЫХ}(t) = RC \frac{dU_{BX}(t)}{dt} \quad (1.57)$$

Обозначив $RC = T$, $U_{BX}/U_0 = x$, $U_{ВЫХ}/U_0 = y$, можно записать

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = T \frac{dx}{dt} \quad (1.58)$$

Т.к. изменение выходного сигнала $y(t)$ зависит от производной входного сигнала, звено носит название дифференцирующего.

Решение уравнения (1.58) при скачкообразном изменении $x(t)$ имеет вид

$$y(t) = e^{-t/T} \quad (1.59)$$

График этой функции приведен на рис. 1.36. Постоянная времени T численно равна отрезку на оси t , отсекаемому касательной к кривой, проведенной из ее начала.

Записав (1.58) в операторной форме, можно получить передаточную функцию звена

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{kTp}{1 + Tp} \quad (1.60)$$

где $k = y(0)/x$ – коэффициент усиления звена.

Т.к. в знаменателе передаточной функции (1.60) присутствует член $(1 + Tp)$, то по аналогии с передаточной функцией инерционного звена это свидетельствует об определенной инерции в изменении выходного сигнала по сравнению с входным. Поэтому звено называется реальным дифференцирующим в отличие от идеального, знаменатель передаточной функции которого равен 1. Это звено также называется фазопережающим.

КЧХ, АЧХ и ФЧХ звена определяются по формулам

$$W(i\omega) = \frac{ik\omega T}{1 + i\omega T} = \frac{k\omega^2 T^2}{1 + \omega^2 T^2} + i \frac{k\omega T}{1 + \omega^2 T^2}$$

$$M(\omega) = \frac{k\omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega T}$$

Графики этих функций приведены на рис. 1.37

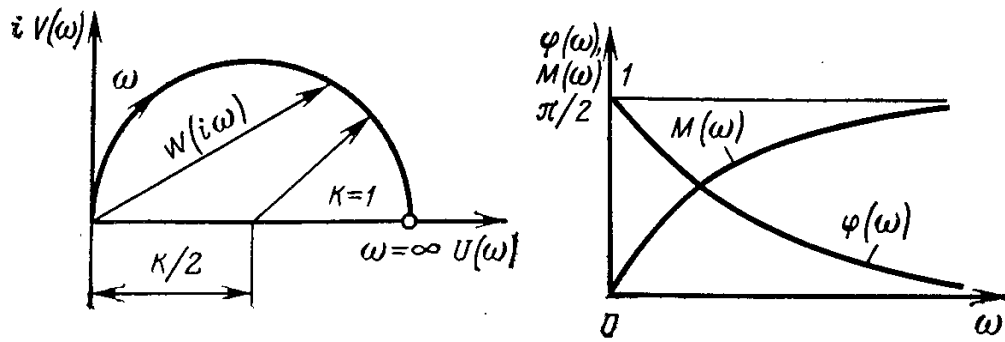

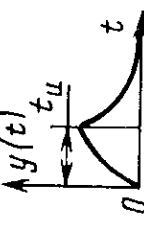
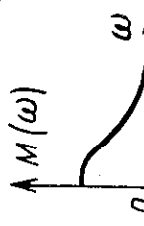
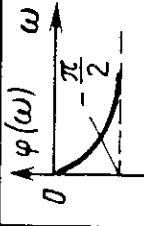

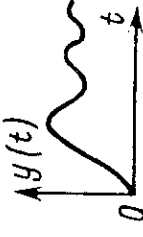
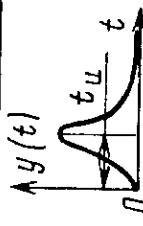

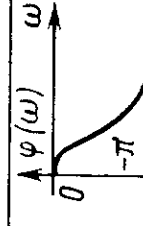
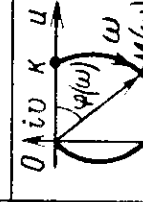
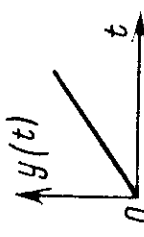
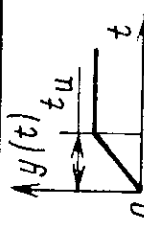
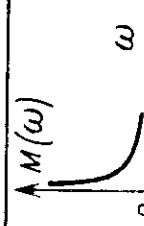
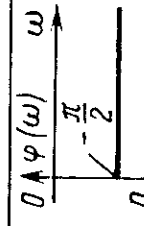
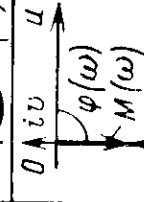
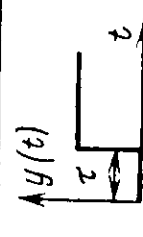
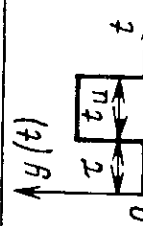
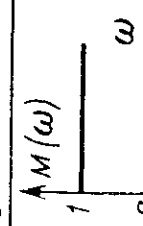
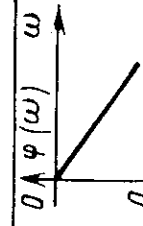
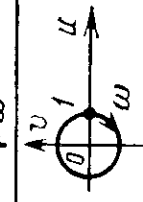

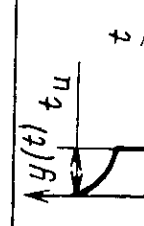

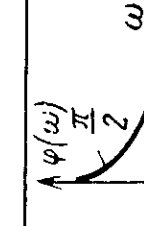
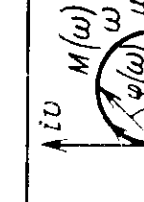


Рис. 1.37 Графики КЧХ, АЧХ и ФЧХ дифференцирующего звена

В таблице ниже приведены сводные данные по типовым звеньям.

| Наименование звена | Математическое описание | Временные характеристики $y(t)$ | | Оператор звена $W(p)$ | Частотные характеристики | | |
|--|---|---|---|---------------------------------|---|---|---|
| | | Разгонная | Импульсная | | Амплитудно-частотная $M(\omega) = \left \frac{y}{x} \right (\omega)$ | Фазовая частотная $\varphi(\omega)$ | Амплитудно-фазовая $W(i\omega)$ |
| Инерционное I порядка | $T_1 y'(t) + y(t) = kx(t)$ |  |  | $\frac{k}{1+Tp}$ |  |  |  |
| Инерционное II порядка (колебательное) | $T_2^2 y''(t) + T_1 y'(t) + y(t) = kx(t)$ |  |  | $\frac{k}{1+T_1 p + T_2^2 p^2}$ |  |  |  |
| Интегрирующее | $y(t) = k_{\int} \int x(t) dt$ |  |  | $\frac{k_{\int}}{p}$ |  |  |  |
| Запаздывающая | $y(t) = x(t-\tau)$ |  |  | e^{-pt} |  |  |  |
| Дифференцирующее (реальное) | $T y'(t) + y(t) = k T x'(t)$ |  |  | $\frac{kTp}{1+Tp}$ |  |  |  |

1.8 Соединения звеньев

Промышленные АСР могут быть представлены в виде комбинаций соединений типовых звеньев. Любые сложные комбинации звеньев в конечном итоге сводятся к трем типам соединений: параллельному, последовательному и встречно-параллельному. При определении результирующих характеристик сложных динамических систем, представляемых в виде комбинаций типовых звеньев, используется принцип суперпозиции (наложения), заключающийся в том, что для линейного звена результирующая реакция на возмущения равна сумме реакций на отдельные возмущающие воздействия.

Наиболее удобными для отыскания результирующих характеристик сложных звеньев являются операторная и векторная (частотная) формы представления свойств звеньев. При этом результирующая характеристика определяется с помощью алгебраических действий или операций с векторами.

Параллельное соединение. Рассмотрим динамическую систему из двух параллельно соединенных звеньев направленного действия (рис. 1.38).

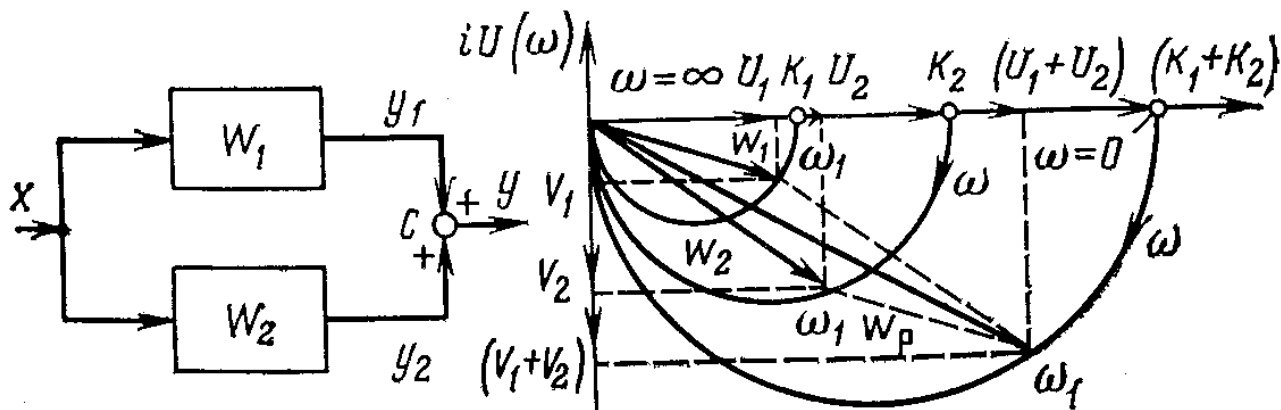


Рис. 1.38 Параллельное соединение звеньев

Для сумматора C можно записать

$$y = y_1 + y_2 = xW_1 + xW_2$$

где x и y – векторная форма записи входной и выходной величин, W – векторы КЧХ звеньев. Тогда результирующая КЧХ равна

$$W_p = y/x = W_1 + W_2 \quad (1.61)$$

Например, для параллельно соединенных инерционных звеньев первого порядка, у которых векторы КЧХ расположены в IV квадранте комплексной плоскости (рис. 1.38), результирующий вектор W_p для частоты ω определяется по правилу сложения векторов. При этом можно в комплексной форме записать

$$W_p = W_1 + W_2 = (u_1 + u_2) + i(v_1 + v_2) \quad (1.62)$$

Если построить результирующие вектора для всех значений частоты от 0 до ∞ , то получим график суммарной КЧХ. Это правило применимо и для случая произвольного количества параллельно соединенных звеньев.

Таким образом, при параллельном соединении звеньев результирующая передаточная функция и результирующая КЧХ системы образуются путем сложения передаточных функций и КЧХ отдельных звеньев.

Последовательное соединение. Для схемы, изображенной на рис. 1.39, можно записать

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= x_1 W_1 \\ y_2 &= y_1 W_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.63)$$

Подставив во второе уравнение выражение для y_1 , получим

$$y_2 = x_1 W_1 W_2$$

Откуда результирующая КЧХ получается равной

$$W_p = y_2/x_1 = W_1 W_2 \quad (1.64)$$

т.е. результирующая КЧХ равна произведению КЧХ звеньев. При расчете произведения комплексных чисел следует помнить, что модули этих чисел перемножаются, а фазы – складываются. На рис. 1.39 это правило иллюстрируется для инерционных звеньев первого порядка. Таким образом, результирующая КЧХ системы, состоящей из нескольких последовательно соединенных звеньев, равна произведению КЧХ отдельных звеньев.

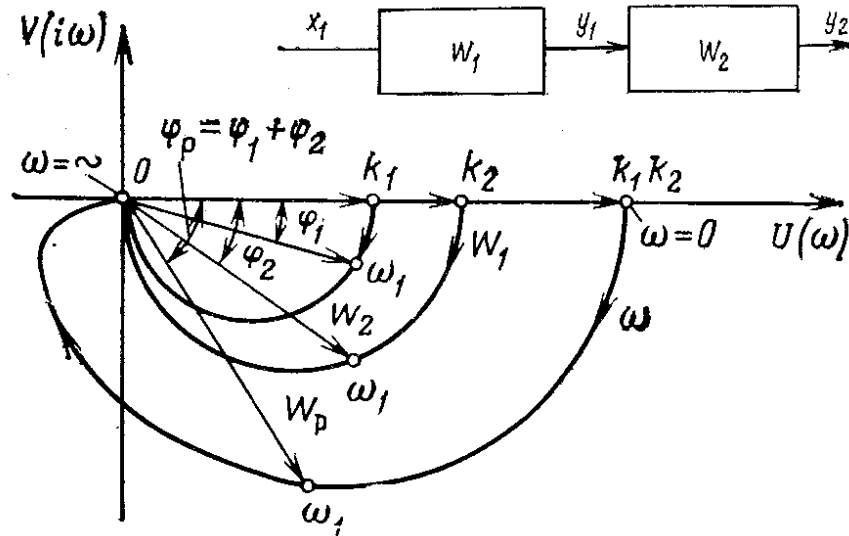


Рис. 1.39 Последовательное соединение звеньев

Встречно-параллельное соединение. Такой тип соединения показан на рис. 1.4, где изображена структурная схема замкнутой АСР, состоящая из объекта 1 и регулятора 2. Пусть для этой системы дано: $W_0, W_p, x, x^c, y, u, x_p$. Требуется найти КЧХ или оператор замкнутой системы:

- 1). $W_{zc}^p = y/x$ - относительно регулирующего воздействия,
- 2). $W_{zc}^u = y/u$ - относительно задающего воздействия,
- 3). $W_{zc}^{y^*} = y^*/u$ - относительно ошибки регулирования.

1). При $u=0$ для системы справедливы следующие соотношения:

- для объекта 1

$$y = W_0 x^c \quad (1.65)$$

- для сумматора 3

$$x^c = x - x_p = x - W_p y \quad (1.66)$$

Подставим (1.66) в выражение (1.65) и разделим переменные y и x :

$$y + W_0 W_p y = W_0 x \quad (1.67)$$

откуда получим КЧХ системы относительно регулирующего воздействия:

$$W_{zc}^p = \frac{y}{x} = \frac{W_0}{1 + W_0 W_p} \quad (1.68)$$

2). Для определения вектора КЧХ системы относительно задающего воздействия примем $x=0$ (при этом $x^c=x_p$) и составим следующие соотношения:

- для сумматора 5

$$y^* = y - u \quad (1.69)$$

- для регулятора 2

$$-x_p = W_p y^* \quad (1.70)$$

- для объекта 1

$$y = W_0 x_p \quad (1.71)$$

Подставив (1.69) в уравнение (1.70), а затем получившееся соотношение для \mathbf{x}_p – в (1.71), получим

$$\mathbf{y} = (\mathbf{u} - \mathbf{y}) \mathbf{W}_0 \mathbf{W}_p$$

откуда КЧХ системы относительно регулирующего воздействия равна

$$\mathbf{W}_{zc}^u = \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{u}} = \frac{\mathbf{W}_0 \mathbf{W}_p}{\mathbf{1} + \mathbf{W}_0 \mathbf{W}_p} \quad (1.72)$$

где, кстати, $\mathbf{W}_0 \mathbf{W}_p$ – вектор КЧХ разомкнутой системы (рис. 1.5).

3). Для определения КЧХ системы относительно ошибки регулирования из уравнения (1.69) найдем

$$\frac{\mathbf{y}^*}{\mathbf{u}} = \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{u}} - 1$$

Подставив в это уравнение значение \mathbf{y}/\mathbf{u} из (1.72), получим выражение для искомой КЧХ

$$\mathbf{W}_{zc}^{y^*} = \frac{\mathbf{y}^*}{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\mathbf{1} + \mathbf{W}_0 \mathbf{W}_p} \quad (1.73)$$

2. Тепловые объекты управления и их характеристики

2.1 Общие положения

Выработка и распределение тепловой энергии в теплоэнергетических установках происходят при взаимодействии потоков вещества и энергии в теплообменниках, которые поодиночке или в виде соединений представляют собой тепловые объекты управления.

Движение потоков вещества и энергии в тепловых объектах может быть установившимся (стационарным) или нестационарным. В первом случае величины, характеризующие теплофизические свойства потоков на входе x и на выходе y объектов (давление, температура, расход и др.) остаются постоянными, во втором – изменяются во времени.

Стационарные режимы описываются статическими характеристиками вида $y=kx$, нестационарные – динамическими характеристиками вида $dy(t)/dt = f[x(t), y(t)]$.

Тепловые объекты – это термодинамические системы, которые можно представить в виде устройства с несколькими входными и выходными величинами. Это устройство будет упрощенной физической моделью реального объекта. Например, упрощенная физическая модель парового котла представляет собой теплообменник типа «труба в трубе» (рис. 2.1), в кольцевом канале которого движутся продукты сгорания газа, а во внутреннем – теплоноситель (вода или пар). Совокупность математических зависимостей в виде алгебраических или дифференциальных уравнений связи между входными и выходными величинами физической модели образуют ее математическую модель. Для тепловых объектов используют модели с сосредоточенными или распределенными теплофизическими параметрами. Модели с распределенными параметрами содержат описание изменения вдоль пути движения потоков свойств греющих газов, теплоносителя и геометрических размеров каналов и являются довольно сложными. Для упрощения задачи прибегают к моделям с сосредоточенными параметрами, в которых физические величины, характеризующие систему в каждой точке, считаются зависящими только от времени, т.е. считается, что параметры в системе постоянны по длине теплообменника на конечном участке. При этом сравнительно точная модель сложной системы может быть представлена в виде последовательного или параллельного соединения участков с сосредоточенными параметрами, представляющими собой источники вещества или энергии или гидравлические сопротивления.

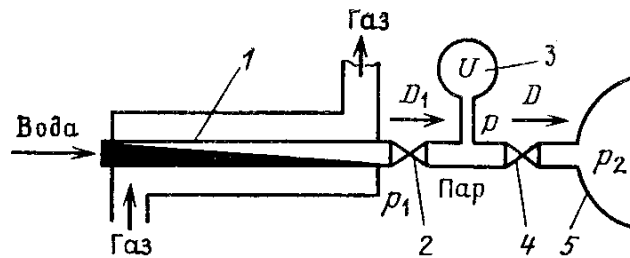


Рис. 2.1 Физическая модель парового котла и парового тракта ТЭС:

1 – парообразующая поверхность нагрева котла; 2 – сопротивление пароперегревателя; 3 – емкость парового тракта; 4 – сопротивление турбины с клапанами; 5 – конденсатор турбины.

2.2 Основы аналитического определения динамических характеристик тепловых объектов

Составление математической модели теплообменника рассмотрим на примере физической модели (рис. 2.1) для процесса изменения давления пара в трубопроводе при изменении давления на входе p_1 и выходе p_2 трубопровода и при изменении степени открытия регулирующего клапана $\xi_{кл}$. Структурная схема математической модели представлена на рис. 2.2.

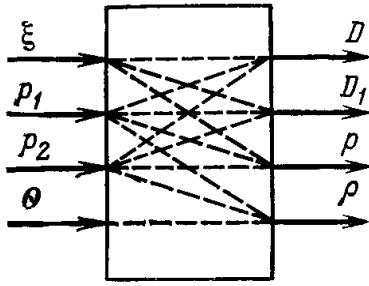


Рис. 2.2 Структурная схема парового тракта котла
 $\xi_{\text{ккл}}$ – коэффициент сопротивления клапана, зависящий от степени его открытия; p_1, p_2, p – давления на входе, выходе и внутри трубопровода; θ – температура пара; D_1, D – расходы пара на входе и выходе; ρ – плотность пара.

Основные уравнения термодинамики для теплового объекта с сосредоточенными параметрами в данном случае имеют вид:

- уравнение сохранения вещества

$$D_1 - D = V \frac{d\rho}{dt} \quad (2.1)$$

- уравнение состояния

$$\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} p + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{p_0} \theta \quad (2.2)$$

В последнем уравнении частные производные представляют собой приращение плотности в зависимости от изменения давления и температуры при постоянстве температуры и давления (выбираются из соответствующих таблиц).

Уравнение движения (зависимость между перепадом давления на сопротивлении 2 и расходом пара D_1)

$$p_1 - p = \xi \frac{D_1^2}{\rho} \quad (2.3)$$

где ξ – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления пароперегревателя (постоянная величина).

Уравнение клапана

$$p - p_2 = \xi_{\text{ккл}} \frac{D^2}{\rho} \quad (2.4)$$

Начальные условия в системе уравнений (2.1)-(2.4) задаются значениями величин в исходном стационарном режиме $D_{01}, D_0, \xi_{0\text{ккл}}, p_{01}, p_{02}, \theta_0$. Для перехода от этой системы уравнений, описывающих статику процесса, к уравнениям динамики необходимо записать каждую переменную величину, входящую в уравнения (2.1)-(2.4), через ее начальное установившееся значение и некоторое малое приращение: $x_i = x_{0i} + \Delta x_i$.

Тогда уравнение (2.1), например, будет иметь вид:

$$D_{01} + \Delta D_1 - (D_0 + \Delta D) = V \frac{d(\rho_0 + \Delta \rho)}{dt}$$

Если из этого выражения вычесть выражение (2.1), записанное для начальных условий D_{01}, D_0, ρ_0 , то получим линейное уравнение, описывающее динамику приращений

$$\Delta D_1 - \Delta D = V \frac{d\Delta \rho}{dt} \quad (2.5)$$

Аналогичным образом от выражения (2.2) можно перейти к выражению для приращений

$$\Delta \rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} \Delta p + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{p_0} \Delta \theta \quad (2.6)$$

Подставляя в выражение (2.3) значения

$$p_1 = p_{01} + \Delta p_1, \quad p = p_0 + \Delta p, \quad D_1 = D_{01} + \Delta D_1$$

получим

$$p_{01} + \Delta p_1 - (p_0 + \Delta p) = \xi \frac{(D_{01} + \Delta D_1)^2}{\rho} = \frac{\xi}{\rho} (D_{01}^2 + 2D_{01}\Delta D_1 + \Delta D_1^2)$$

В этом выражении слагаемым ΔD_1^2 можно пренебречь ввиду его явной малости (малое приращение да еще в квадрате). Кроме того, из выражения (2.3) при $p_1=p_{01}$ и $p=p_0$ имеем $\xi/\rho = (p_{01} - p_0)/D_1^2 = \delta p_1/D_1^2$, где δp_1 - сопротивление пароперегревателя и паропровода в стационарном режиме. Если из преобразованного таким образом последнего выражения вычтуть выражение (2.3), записанное для начальных условий, то получим следующее линейное выражение для приращений:

$$\Delta p_1 - \Delta p = \frac{2\delta p_1}{D_{01}} \Delta D_1 \quad (2.7)$$

Аналогичным образом от выражения (2.4) можно перейти к выражению для приращений

$$\Delta p - \Delta p_2 = \frac{2\delta p_2}{D_0} \Delta D + \frac{\delta p_2}{\xi_{\text{ккл}}} \Delta \xi_{\text{ккл}} - \frac{\delta p_2}{\rho_0} \Delta \rho \quad (2.8)$$

где $\delta p_2 = p_0 - p_{02}$ - перепад давления на регулирующем клапане в стационарном режиме.

В результате получена система линейных уравнений (2.5)-(2.8), описывающих динамику приращений входных и выходных параметров объекта. Следует иметь в виду, что такая линеаризация не всегда допустима при рассмотрении режимов, изменяющихся в широком диапазоне. Однако она вполне корректна при изучении работы автоматических систем стабилизации, обеспечивающих поддержание регулируемых величин y_i с высокой точностью вблизи заданных значений, когда отклонения входных воздействий Δx_i невелики.

В систему уравнений (2.5)-(2.8) входит восемь переменных величин, из которых четыре ($\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta \xi_{\text{ккл}}, \Delta \theta$) являются независимыми возмущениями, а остальные четыре ($\Delta p, \Delta D_1, \Delta D, \Delta \rho$) - их функциями и подлежат определению.

Рассмотрим более простой случай, когда ставится задача найти уравнение динамики лишь по каналу воздействия $p_1 \rightarrow p$. В этом случае в уравнениях (2.5)-(2.8) величины p_2 , $\xi_{\text{ккл}}$ и θ будем считать постоянными, а их приращения $\Delta p_2 = \Delta \xi_{\text{ккл}} = \Delta \theta = 0$. Система уравнений (2.5)-(2.8) для этого случая примет вид:

$$\Delta D_1 - \Delta D = V \frac{d\Delta p}{dt} \quad (2.9)$$

$$\Delta p = \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_{\theta_0} \Delta p \quad (2.10)$$

$$\Delta p_1 - \Delta p = \frac{2\delta p_1}{D_{01}} \Delta D_1 \quad (2.11)$$

$$\Delta p = \frac{2\delta p_2}{D_0} \Delta D - \frac{\delta p_2}{\rho_0} \Delta \rho \quad (2.12)$$

Сведем систему уравнений (2.9)-(2.12) в одно, подставив в уравнение (2.9) значения других зависимых переменных $\Delta D_1, \Delta D$ и $\Delta \rho$, выраженные из уравнений (2.10)-(2.12) через искомую переменную Δp и независимую величину Δp_1 :

- из (2.11) ΔD_1 равен

$$\Delta D_1 = (\Delta p_1 - \Delta p) \frac{D_{01}}{2\delta p_1}$$

- из (2.12) и (2.10) для ΔD имеем

$$\Delta D = \frac{D_0}{2\delta p_2} \left(\Delta p + \frac{\delta p_2}{\rho_0} \Delta \rho \right) = \frac{D_0}{2\delta p_2} \Delta p + \frac{D_0}{2\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} \Delta p$$

Подставив два последних выражения и (2.10) в уравнение (2.9), получим

$$\Delta p_1 \frac{D_{01}}{2\delta p_1} - \Delta p \frac{D_{01}}{2\delta p_1} - \Delta p \frac{D_0}{2\delta p_2} - \Delta p \frac{D_0}{2\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} = \frac{d\Delta p}{dt} V \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} \quad (2.13)$$

Далее сгруппируем члены с искомой переменной Δp в левой части уравнения, а члены с не-зависимой переменной Δp_1 - в правой части:

$$\Delta p \left[\frac{D_{01}}{2\delta p_1} + \frac{D_0}{2\delta p_2} + \frac{D_0}{2\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} \right] + \frac{d\Delta p}{dt} V \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} = \Delta p_1 \frac{D_{01}}{2\delta p_1}$$

Введя упрощающие обозначения для коэффициентов при Δp , ее производной и Δp_1 аналогично уравнению (1.3), запишем

$$a_0 \Delta p(t) + a_1 \frac{d\Delta p(t)}{dt} = b_0 \Delta p_1(t) \quad (2.14)$$

Поделив обе части уравнения на коэффициент при Δp и введя обозначения $T = a_1/a_0$, $k_{p1} = b_0/a_0$, получим дифференциальное уравнение

$$\Delta p(t) + T \frac{d\Delta p(t)}{dt} = k_{p1} \Delta p_1(t) \quad (2.15)$$

Его решением во временной области $\Delta p = f(t)$, так же как для уравнения (1.3), служит экспонента

$$\Delta p = k_{p1} \Delta p_1 (1 - e^{-t/T}) \quad (2.16)$$

Применяя к уравнению (2.15) преобразование Лапласа-Карсона при нулевых начальных условиях и ступенчатом возмущающем воздействии Δp_1 , можно получить динамические характеристики объекта в виде КЧХ или передаточной функции. При этом предварительно обозначим выходную величину Δp через $y = \Delta p/p_0$, а входную - через $x_1 = \Delta p_1/p_0$, а их изображения - через $Y(p)$ и $X(p)$, тогда

$$Y(p) = (1 + Tp) = k_{p1} X(p) \quad (2.17)$$

где $p = d/dt$ - оператор Лапласа.

Из уравнения связи между изображениями выходной и входной величин (2.17) можно получить передаточную функцию объекта по каналу воздействия $p_1 \rightarrow p (x_1 \rightarrow y)$:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_{p1}}{(1 + Tp)} \quad (2.18)$$

и его комплексную частотную характеристику заменой p на $i\omega$

$$W(i\omega) = \frac{k_{p1}}{1 + \omega^2 T^2} - i \frac{k_{p1} \omega T}{1 + \omega^2 T^2} \quad (2.19)$$

2.3 Составление математических моделей тепловых объектов

Большинство теплоэнергетических объектов – сложные динамические системы с распределенными параметрами, для которых определение статических и динамических характеристик связано с большим объемом расчетных и исследовательских работ. Один из методов упрощения расчетов состоит в представлении сложного объекта с распределенными параметрами в виде последовательного или параллельного соединения участков с сосредоточенными параметрами. Участки должны обладать единством конструкции или однообразием протекающих в них физических и технологических процессов, а также сравнительной простотой математического описания.

В качестве примера рассмотрим процесс изменения давления перегретого пара в трубопроводе на выходе парового котла, принципиальная технологическая схема которого приведена на рис. 2.3. Проследимхождение сигнала по каналу *топливо* $B_T \rightarrow$ *давление перегретого пара* $p_{пп}$.

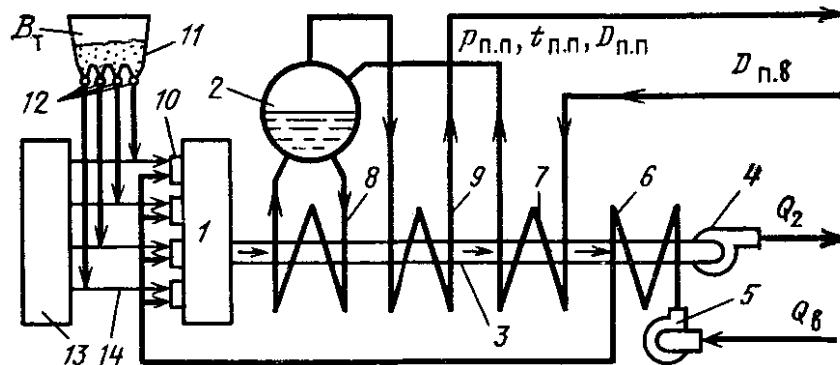


Рис. 2.3 Принципиальная технологическая схема котла:

1 – топка; 2 – барабан; 3 – газоход; 4 – дымосос; 5 – вентилятор; 6 – воздухоподогреватель; 7 – экономайзер; 8 – циркуляционный контур; 9 – пароперегреватель; 10 – горелка; 11 – бункер пыли; 12 – питатели пыли; 13 – короб первичного воздуха; 14 – пылепроводы.

Паровой котел, как сложная динамическая система, может быть разделен на ряд более простых участков (рис. 2.4).

Первый участок W_1 – транспортировка пылевидного топлива питателями пыли 12 из бункера пыли 11 по пылепроводам 14 к горелкам 10. Приблизительно этот участок можно считать звеном транспортного запаздывания с передаточной функцией

$$W_1(p) = e^{-p\tau}$$

где значение τ зависит от скорости движения пылевоздушной смеси и длины пылепровода (для современных котлов $\tau=0,5 \div 2,5$ с).

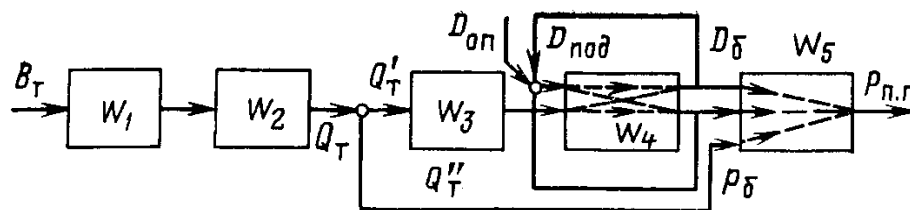


Рис. 2.4 Структурная схема парового котла по каналу воздействия $B_T \rightarrow p_{пп}$

Второй участок W_2 – топочная камера 1, в которой протекают процессы подачи топлива, воспламенения и сгорания (полного или частичного). Процесс тепловыделения при горении приближенно описывается уравнением инерционного звена первого порядка с передаточной функцией

$$W_2(p) = \frac{k_2}{1 + T_2 p}$$

где значение T_2 колеблется от нескольких секунд до нескольких десятков секунд в зависимости от типа котла, вида топлива и других факторов. Тепловая энергия, выделяющаяся при

сгорания топлива, воспринимается радиационными и конвективными поверхностями нагрева парового котла.

Третий участок W_3 – процесс теплопередачи, который приближенно может быть описан уравнением инерционного звена первого порядка с передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{k_3}{1 + T_3 p}$$

Четвертый участок W_4 образуют барабан 2, опускные трубы $D_{оп}$ циркуляционного контура δ , экранные поверхности (подъемные трубы $D_{под}$, где протекает процесс парообразования). Здесь происходит передача теплоты через стенки труб воде, нагревание ее до кипения, образование пара и перенос его из экранных труб в барабан 2. Физика процесса, протекающего на этом участке, поясняется структурной схемой (рис. 2.4) и заключается в том, что изменение подводимой к воде теплоты Q'_T приводит к изменению двух регулируемых величин – паропроизводительности D_6 и давления пара в барабане p_6 , которые, в свою очередь, оказывают воздействие на паропроизводительность подъемных труб $D_{под}$, т.е. служат и входными величинами. Следовательно, рассматриваемый четвертый участок нельзя считать звеном направленного действия, но, поскольку он включен последовательно с предшествующими направленными звеньями (топкой и пылепроводами), то направленность парового котла как системы в целом сохраняется. Это означает, что изменения D_6 и p_6 не окажут обратного воздействия на количество топлива B_T , подаваемого в топку, и на количество теплоты Q_T и Q'_T . Передаточная функция по участку W_4 с учетом рассмотренных обратных связей приближенно может быть представлена в виде инерционного звена первого порядка

$$W_4(p) = \frac{k_4}{1 + T_4 p}$$

Последний пятый участок W_5 образуют паропрегреватель 9 и присоединенный к нему трубопровод перегретого пара, в котором и происходит изменение интересующего нас давления p_{III} . Этот участок имеет три входа со стороны парового котла: D_6, p_6, Q''_T . Динамика этого участка по каналу $p_6 \rightarrow p_{III}$ определена аналитически ранее как зависимость $p=f(p_1)$ в формулах (2.16) и (2.18).

Результирующая расчетная передаточная функция всего парового котла по каналу $B_T \rightarrow Q'_T \rightarrow p_6 \rightarrow p_{III}$ определяется перемножением передаточных функций последовательно включенных звеньев W_1, W_2, W_3, W_4 и W_5 .

При описании динамических свойств тепловых объектов с помощью упрощенных математических моделей широкое распространение получили следующие соединения простых звеньев:

- инерционное звено первого порядка последовательно соединено со звеном запаздывания $W(p) = ke^{-p\tau} / (1 + Tp)$;
- интегрирующее звено последовательно соединено с запаздывающим звеном $W(p) = k_i e^{-p\tau} / p$.

Рассмотренный способ составления передаточной функции сложного объекта посредством соединения простых звеньев, передаточные функции которых известны или легко определяются, называется **структурным моделированием**.

Однако этот метод не всегда может обеспечить достаточно точное воспроизведение фактической динамики объекта. Поэтому часто используется опытное определение динамических характеристик объектов. При этом возникает обратная задача: по известной экспериментальной временной характеристике требуется составить математическую модель объекта.

Рассмотрим для примера экспериментально полученную переходную кривую изменения давления пара $p_{\delta}=y(t)$ при возмущении топливом $B_T=x(t)$ для барабанного парового котла (рис. 2.5).

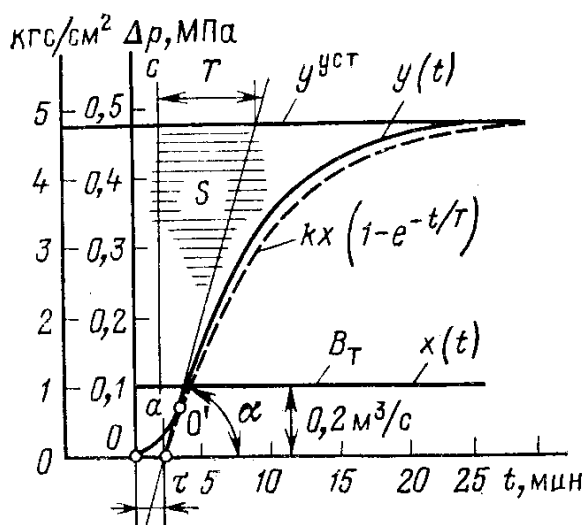


Рис. 2.5 Экспериментальная кривая разгона парогенератора по давлению перегретого пара при возмущении расходом топлива.

К кривой переходного процесса в точке ее перегиба (точка a на рис. 2.5) проводится касательная до пересечения с установившимся значением регулируемой величины $y^{уст}$ и осью абсцисс. Эта касательная пересекает ось абсцисс в точке O' . Через эту точку проводится прямая $O'c$, параллельная оси ординат.

С помощью указанных построений определяются (в масштабе) величины T и τ . При этом линия $O'a$ одновременно служит касательной к экспоненте, сдвинутой вправо на отрезок τ от начала координат. Это означает, что исследуемый объект может быть представлен в виде последовательного соединения двух звеньев: звена запаздывания со временем запаздывания τ и передаточной функцией $W_1(p) = e^{-p\tau}$ и инерционного звена первого порядка с коэффициентом усиления $k = \Delta p^{уст} / \Delta B_T$, постоянной времени T и передаточной функцией $W_2(p) = k / (1 + Tp)$. Результирующая передаточная функция имеет вид $W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) = ke^{-p\tau} / (1 + Tp)$.

Таким образом, реальная кривая переходного процесса $y(t)$ (сплошная линия) заменяется участком запаздывания τ и экспонентой (прерывистая линия).

Величина, обратная коэффициенту усиления $\rho = \Delta B_T / \Delta p^{уст}$, называется степенью самовыравнивания и характеризует присущее многим теплоэнергетическим объектам свойство самовыравнивания или саморегулирования, т.е. способность объекта самостоятельно восстанавливать нарушенное равновесие между притоком и стоком энергии или вещества.

Постоянная времени T численно равна площади S , заключенной между кривой разгона и уровнем ее установившегося значения $y^{уст}$, поделенной на это значение, за вычетом времени запаздывания τ :

$$T = \frac{S}{y^{уст}} - \tau$$

2.4 Типовые законы регулирования

Понятие о законах регулирования. РП-закон. Предположим, что оператор должен поддерживать заданное значение регулируемой величины (например, уровень воды в барабане) при помощи измерительного прибора, показывающего отклонение регулируемой величины от

заданного значения и сервопривода, который может скачком перемещать регулирующий орган из одного крайнего положения («закрыто») в другое («открыто»). Схема управления для данного случая показана на рис. 2.6,а.

Оператор перемещает регулирующий орган 2 из одного положения в другое в двух случаях:

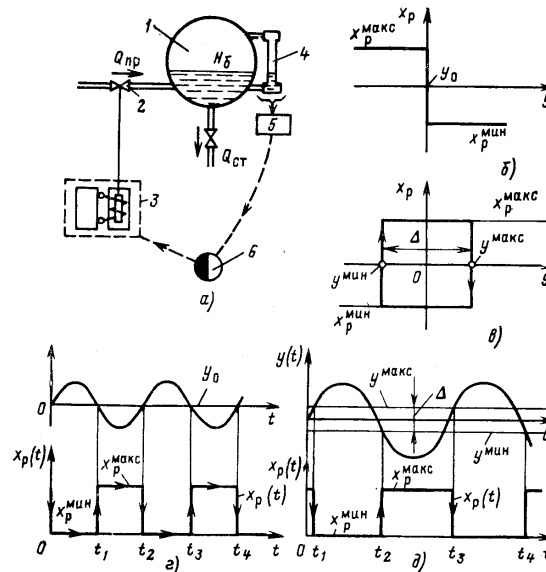


Рис. 2.6 Система регулирования уровня воды в баке с двухпозиционным регулирующим органом.

а – принципиальная схема: 1 – бак; 2 – регулирующий орган; 3 – электромагнитный сервопривод; 4 – водомерное стекло; 5 – прибор; б – оператор или автоматический регулятор. б, в – графики зависимости $x_p = f(y^*)$, г, д – процессы регулирования в системе; $t_1 - t_4$ – точки переключения.

1) при некотором определенном (небольшом) отклонении уровня воды ΔH_6 в водомерном стекле 4 от заданного;

2) по достижении уровнем воды в баке верхнего или нижнего допустимых пределов.

Условимся в дальнейшем называть математическую зависимость между положением регулирующего органа x_p (в данном случае – положения «закрыто» - «открыто» регулятора 2) и отклонением регулируемой величины y (уровень воды H_6) **законом регулирования**

$$x_p = f(y) \quad (2.20)$$

В первом случае закон регулирования описывается двумя уравнениями:

$$x_p = \begin{cases} x_p^{\text{мин}} & \text{при } \infty > y \geq y_0 \\ x_p^{\text{макс}} & \text{при } y_0 > y \geq -\infty \end{cases} \quad (2.21)$$

Графическое изображение уравнений (2.21) приведено на рис. 2.6, б.

Во втором случае (рис. 2.6, в) закон регулирования имеет вид:

$$x_p = \begin{cases} x_p^{\text{мин}} & \text{при } \infty > y \geq y^{\text{макс}} \\ x_p^{\text{макс}} & \text{при } y^{\text{мин}} > y \geq -\infty \end{cases} \quad (2.22)$$

На участке от $y^{\text{мин}}$ до $y^{\text{макс}}$ величина x_p имеет два значения $x_p^{\text{мин}}$ или $x_p^{\text{макс}}$ в зависимости от предшествующих значений y .

Такой способ регулирования называется **двухпозиционным** (по числу позиций, которые может занимать регулирующий орган). В обоих рассмотренных случаях форма процессов регулирования имеет колебательный характер. Работу оператора может выполнять измерительный прибор, снабженный контактным устройством, управляющим перемещением электро-

магнитного сервопривода в нужном направлении. Графики движения $x_p(t) = f[y(t)]$ для этих случаев приведены на рис. 2.6, з, д.

Рассмотренный закон регулирования описывается, как видно, нелинейной (релейной) статической характеристикой (2.21) или (2.22). Поэтому регулятор называется **релейным позиционным**, а закон регулирования – РП-законом.

П- и И-законы. Рассмотрим работу оператора при регулировании температуры перегретого пара барабанного котла (рис. 2.7). В распоряжении оператора δ имеются автоматический показывающий и самопишущий потенциометр 4 и регулирующий клапан 7 на подводе охлаждающей воды к пароохладителю, управляемый сервоприводом 6. В случае отклонения температуры пара $t_{п.п}$ от заданного значения оператор увеличивает или уменьшает расход охлаждающей воды через пароохладитель перемещением регулирующего клапана. При этом изменить положение клапана и расход воды можно различными способами.

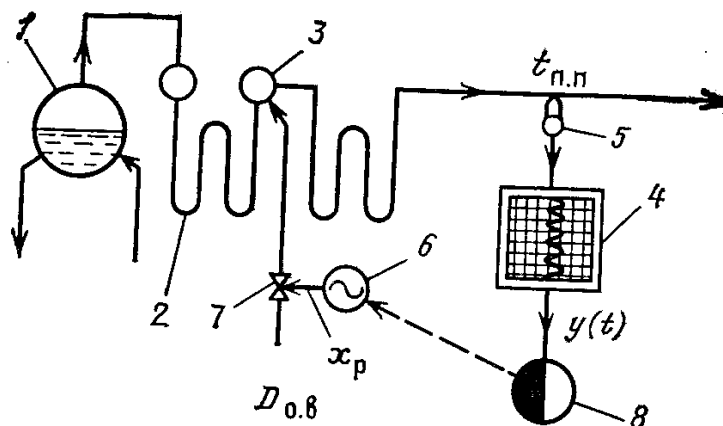


Рис. 2.7 Система регулирования температуры пара:

1 – барабан; 2 – пароперегреватель; 3 – коллектор впрыска охлаждающей воды; 4 – прибор записи температуры; 5 – датчик; 6 – сервопривод с регулируемой частотой вращения; 7 – клапан регулировки расхода охлаждающей воды; 8 – оператор или автоматический регулятор.

Например, перемещение клапана можно осуществлять **пропорционально отклонению** регулируемой величины. В этом случае закон регулирования можно выразить уравнением

$$x_p(t) = k_p y(t) \quad (2.23)$$

где k_p - коэффициент пропорциональности.

Если сервопривод 6 имеет регулируемую скорость перемещения, то оператор 8 может перемещать клапан со скоростью, пропорциональной скорости отклонения регулируемой величины (температуры), о которой он может судить по наклону касательной к кривой ее записи прибором 4. При этом закон регулирования запишется уравнением

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = K_p \frac{dy(t)}{dt} \quad (2.24)$$

Выражения (2.23) и (2.24) соответствуют **пропорциональному закону** регулирования, или сокращенно П-закону. В этом случае каждому установившемуся значению регулируемой величины соответствует определенное положение регулирующего органа. Пример такого регулирования – регулятор И.И. Ползунова (рис. 1.2).

Регулирование можно осуществлять и так, чтобы скорость перемещения клапана 7 была пропорциональна отклонению регулируемой величины:

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = k_n y(t) \quad (2.25)$$

где k_n – коэффициент пропорциональности.

Проинтегрировав обе части выражения (2.25), получим

$$x_p(t) = k_i \int_0^{\infty} y(t) dt \quad (2.26)$$

Последнее выражение аналогично уравнению интегрирующего звена (1.47), а его решение имеет вид

$$x_p(t) = k_i t$$

где $k_i = tg\alpha/y$ характеризует скорость нарастания сигнала на выходе регулятора после нанесения ступенчатого возмущения на входе.

Уравнение (2.26) характеризует **интегральный закон** регулирования, или И-закон.

Пример автоматического регулятора давления, реализующего И-закон, приведен на рис. 1.3.

ПИ- и ПД-законы. Вернемся к регулятору, изображенному на рис. 2.7.

Если перемещать клапан, руководствуясь только скоростью изменения регулируемой величины, можно нарушить соответствие между требуемым количеством охлаждающей воды и отклонением, а если учитывать только отклонение температуры пара, можно запоздать с подачей требуемого количества воды. Поэтому, исходя из требований соответствия температуры пара и расхода воды при перестановке клапана в каждый момент времени, целесообразно руководствоваться не только отклонением или скоростью отклонения регулируемой величины, а учитывать оба эти фактора одновременно. При этом возможны два способа:

- 1) перемещать клапан со скоростью, пропорциональной отклонению и скорости отклонения температуры;
- 2) переставлять клапан в положение, пропорциональное отклонению и скорости отклонения температуры.

В обоих случаях оператор руководствуется не только отклонением температуры, но и направлением ее изменения по кривой записи на приборе 4.

Первый способ регулирования описывается уравнением

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = K_p \frac{dy(t)}{dt} + k_i y(t) \quad (2.27)$$

Проинтегрировав это уравнение, получим

$$x_p(t) = K_p y(t) + k_i \int_0^{\infty} y(t) dt \quad (2.28)$$

Такой закон регулирования в соответствии с наименованиями составляющих правой части уравнения (2.28) называется **пропорционально-интегральным**, или ПИ-законом.

При втором способе регулирования (перемещения) клапана закон регулирования характеризуется уравнением

$$x_p(t) = K_p y(t) + k_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (2.29)$$

В соответствии с наименованиями слагаемых правой части уравнения (2.29) такой закон регулирования называется **пропорционально-дифференциальным**, или ПД-законом.

ПИД-закон. Более точного поддержания регулируемой величины можно добиться, если скорость перемещения клапана сделать зависимой не только от отклонения температуры и ее производной, но также и от второй производной, учитывающей ускорение (замедление) изменения температуры. В этом случае уравнение закона будет более сложным:

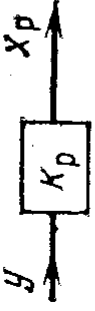
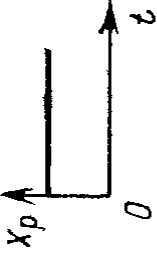
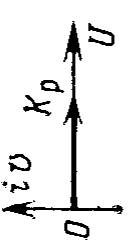
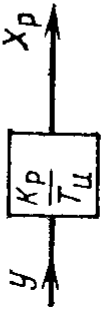

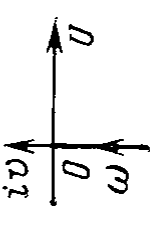
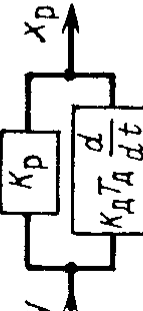
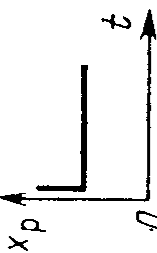
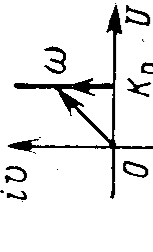
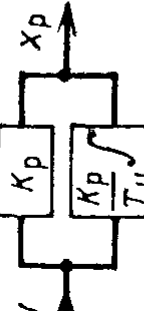
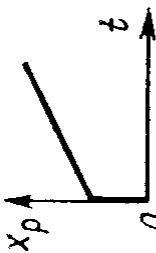
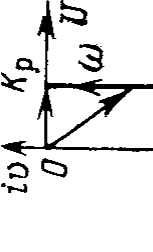
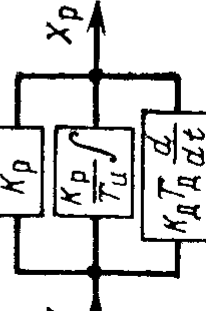
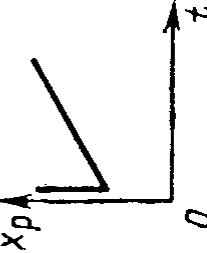
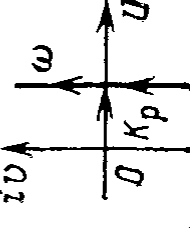
$$\frac{dx_p(t)}{dt} = K_p \frac{dy(t)}{dt} + k_i y(t) + k_d \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (2.30)$$

или после интегрирования

$$x_p(t) = K_p y(t) + k_i \int_0^{\infty} y(t) dt + k_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (2.31)$$

Такой закон регулирования называется **пропорционально-интегрально-дифференциальным** или ПИД-законом.

Автоматические регуляторы различной конструкции имеют единую классификацию по виду реализуемых ими законов регулирования, т.е. все регуляторы вне зависимости от их конструктивных особенностей подразделяются на Р-, П-, И-, ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторы. Динамические характеристики П- и И-регуляторов соответствуют динамическим характеристикам (временным и частотным) соответствующих типовых звеньев. Математические модели и структурные схемы ПД-, ПИ- и ПИД-регуляторов могут быть изображены в виде параллельных соединений пропорционального, интегрального и дифференцирующего звеньев, как показано в таблице.

| Тип регулятора | Структурная схема | Оператор $W(p)$ | Временная характеристика | АФХ $W(i\omega)$ |
|---|---|---------------------------------------|---|---|
| П-пропорциональный $x_p = K_y$ |  | K_p |  |  |
| И-интегральный $x_p = \frac{K_p}{T_u} \int y$ |  | $\frac{K_p}{T_u p}$ |  |  |
| ПД-пропорционально-дифференциальный $x_p = K_p y + K_D T_D y'$ |  | $K_p + K_D T_D p$ |  |  |
| ЛИ-пропорционально-интегральный $x_p = K_p y + \frac{K_p}{T_u} \int y$ |  | $K_p + \frac{K_p}{T_u p}$ |  |  |
| ПИД-пропорционально-интегрально-дифференциальный $x_p = K_p y + \frac{K_p}{T_u} \int y + K_D T_D y'$ |  | $K_p + \frac{K_p}{T_u p} + K_D T_D p$ |  |  |

3. Устойчивость и качество процессов регулирования

3.1 Процессы автоматического регулирования и методы анализа их устойчивости

Процессом автоматического регулирования называется переходный процесс в замкнутой АСР (см. п. 1.3, рис. 1.4). Он характеризуется переходом во времени регулируемой величины из установившегося состояния в другое под действием возмущений, прилагаемых в различных точках системы одновременно или порознь. Для упрощения первоначального анализа условимся считать:

- 1) АСР является одноконтурной (структурная схема рис. 1.4);
- 2) динамические свойства объекта описываются типовыми характеристиками, рассмотренными ранее:

- инерционное звено первого порядка последовательно соединено со звеном запаздывания $W(p) = ke^{-p\tau} / (1 + Tp)$;

- интегрирующее звено последовательно соединено с запаздывающим звеном $W(p) = k_{II} e^{-p\tau} / p$;

- 3) регулятор – идеальный и обрабатывает один из типовых законов регулирования (Р_п, П, И и т.п.);

- 4) возмущающее воздействие является однократным, ступенчатым по форме и прилагается в одной из точек замкнутой системы.

Также будем считать, что возмущения в систему поступают по трем каналам: со стороны регулирующего органа (x_p), со стороны нагрузки (x_b) и со стороны задатчика регулятора (u).

Под **устойчивостью** линейных систем при решении технических задач понимают способность системы, выведенной из установившегося состояния, снова к нему возвращаться после снятия возмущающих воздействий. Следовательно, об устойчивости систем (звеньев) можно судить по виду их импульсной характеристики или реакции системы (звена) на импульсное возмущение.

Все физические системы с точки зрения устойчивости могут быть **устойчивыми, неустойчивыми и нейтральными**. Устойчивый переходной процесс в результате импульсного возмущения со временем затухает, неустойчивый – обладает расходящимися колебаниями. Переходной процесс на границе устойчивости имеет вид незатухающих колебаний. При нейтральном переходном процессе величина реакции системы неизменна (рис. 3.1).

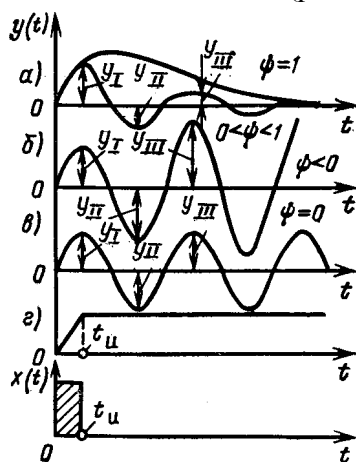


Рис. 3.1 Переходные процессы:

a – затухающие, *б* – расходящиеся; *в* – незатухающие колебательные; *г* – в нейтральной системе. АСР теплоэнергетических установок чаще всего включают устойчивые или нейтральные звенья. Так, устойчивым является типовой теплотехнический объект с операторной характеристикой $W(p) = ke^{-p\tau} / (1 + Tp)$. К нейтральным относятся объекты с типовой характеристикой $W(p) = k_{II} e^{-p\tau} / p$, например уровень воды в барабане парового котла при возмущении расходом питательной воды. Однако замкнутые системы, включающие нейтральные или устойчивые

звенья, при определенных условиях могут быть неустойчивыми или недостаточно устойчивыми, т.е. находиться вблизи границы устойчивости.

Задача анализа устойчивости состоит в том, чтобы выяснить, при каких значениях изменяемых параметров настройки регулятора замкнутая система устойчива при различных возмущениях. Для исследования устойчивости можно воспользоваться двумя методами: прямым и косвенным. Прямой метод предусматривает получение переходного процесса экспериментальным путем на действующей установке, ее модели или с помощью расчета на основе известных динамических характеристик звеньев, составляющих систему. При этом для суждения об устойчивости необходимо располагать множеством реализаций отдельных переходных процессов, что требует больших затрат времени на проведение экспериментов и расчетов. Поэтому важно установить общие первоначальные требования к системе – **критерии устойчивости**, при помощи которых можно было бы судить об устойчивости системы без экспериментального определения переходных процессов, которые в реальных условиях зачастую получить или невозможно или небезопасно. Оценка систем при помощи таких критериев составляет сущность косвенных методов исследования устойчивости. При этом динамические характеристики объекта и регулятора должны быть представлены в одинаковой форме.

3.2 Корневой и алгебраический критерии устойчивости

Характеристики объекта и регулятора, как было показано выше, могут быть представлены в виде дифференциальных уравнений. На основе этих уравнений можно составить общее дифференциальное уравнение всей системы с регулируемой величиной $y(t)$ в качестве переменной

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = kx \quad (3.1)$$

где n – порядок старшей производной; a_n, \dots, a_0 – постоянные коэффициенты.

Из математики известно, что решение такого уравнения относительно $y(t)$ можно записать в виде двух слагаемых, описывающих свободную и вынужденную составляющие поведения системы

$$y(t) = y_{\text{св}}(t) + y_{\text{вын}}(t)$$

Вынужденная составляющая определяется неснимающимся возмущением kx , приложенным к системе. Но поскольку об устойчивости системы можно судить по ее реакции на однократное импульсное возмущение, то для изучения устойчивости можно ограничиться исследованием поведения свободной составляющей регулируемой величины. Для уравнения (3.1) свободная составляющая решения запишется в виде

$$y_{\text{св}}(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + \dots + C_n e^{p_n t} \quad (3.2)$$

где C_1, \dots, C_n – постоянные интегрирования; p_1, \dots, p_n – корни характеристического уравнения, которое в операторной форме запишется так:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (3.3)$$

Корни этого уравнения p_1, \dots, p_n зависят от значений коэффициентов a_n, \dots, a_0 , среди которых могут быть:

- вещественные положительные $p_k = +\alpha_k$ (○);
- вещественные отрицательные $p_k = -\alpha_k$ (Δ);
- комплексные сопряженные с отрицательной действительной частью $p_k = -\alpha_k \pm i\beta_k$ (×);
- комплексные сопряженные с положительной действительной частью $p_k = \alpha_k \pm i\beta_k$ (□);
- мнимые $p_k = \pm i\beta_k$ (*);
- нулевые $p_k = 0$ (●).

На рис. 3.2 показаны возможные случаи расположения корней характеристического уравнения АСР на комплексной плоскости.

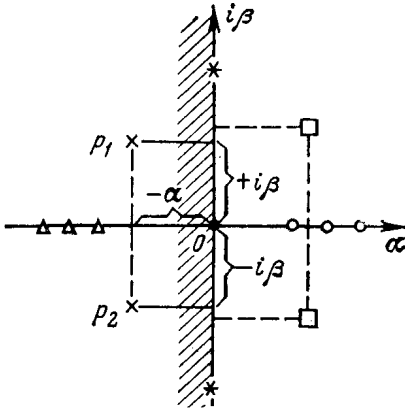


Рис. 3.2 Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости: Δ – устойчивой системы, аperiodический процесс; × – устойчивой системы, колебательный процесс; * – системы на границе устойчивости; ○, □ – неустойчивых систем; ● – нейтральной системы.

Свободная составляющая устойчивой системы должна стремиться к нулю по окончании переходного процесса, т.е. $y_{св}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Для удовлетворения этого условия необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения (3.3) были отрицательными, если они вещественные, или имели отрицательную действительную часть, если они комплексные.

Действительно, уравнение (3.2) в случае вещественных отрицательных корней будет иметь вид

$$y_{св}(t) = C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t} + \dots + C_n e^{-\alpha_n t} \quad (3.4)$$

т.е. свободная составляющая представляет из себя сумму затухающих во времени экспонент.

При комплексных корнях с отрицательной действительной частью $p_k = -\alpha_k \pm i\beta_k$ уравнение (3.2) примет вид

$$y_{св}(t) = C_1 e^{-\alpha_1 t} (\cos \beta_1 t \pm i \sin \beta_1 t) + \dots + C_n e^{-\alpha_n t} (\cos \beta_n t \pm i \sin \beta_n t) \quad (3.5)$$

т.е. свободная составляющая включает синусоиды (косинусоиды) с уменьшающейся во времени амплитудой.

В обоих рассмотренных случаях выполняется условие устойчивости, т.е. $y_{св}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

На основе этого может быть сформулирован **корневой критерий устойчивости**: АСР устойчива, если корни ее характеристического уравнения являются вещественными отрицательными или комплексными с отрицательной вещественной частью, т.е. расположены в левой полуплоскости (заштрихованной) комплексной плоскости. Если хотя бы один корень характеристического уравнения (3.3) будет вещественным положительным или комплексным с положительной действительной частью, то при $t \rightarrow \infty$ член, содержащий экспоненту с положительным α в уравнениях (3.4) и (3.5), будет неограниченно возрастать. Следовательно, будет неограниченно возрастать и свободная составляющая.

Наличие двух сопряженных чисто мнимых корней приведет к появлению незатухающего колебательного слагаемого в свободной составляющей

$$y_k(t) = C_k (\cos \beta_k t \pm i \sin \beta_k t) \quad (3.6)$$

Система в этом случае будет находиться на границе устойчивости.

Система, в характеристическом уравнении которой есть хотя бы один нулевой корень (размещенный в начале координат) при всех остальных корнях, расположенных в левой (устойчивой) полуплоскости, считается нейтральной.

Из сказанного выше следует, что при использовании для исследования устойчивости корневого критерия нужно определить лишь знак корней характеристического уравнения системы. Это определение является чисто алгебраической операцией, которая выполняется с помощью **алгебраических критериев устойчивости**. Эти критерии позволяют судить об устойчивости системы, не вычисляя корней ее характеристического уравнения.

Для примера рассмотрим инерционное звено первого порядка. Его характеристическое уравнение имеет вид

$$a_1 p + a_0 = 0 \quad (3.7)$$

а единственный корень уравнения равен

$$p = -a_0/a_1$$

Отсюда следует, что система первого порядка всегда устойчива, если коэффициенты ее характеристического уравнения a_0 и a_1 положительны (одного знака).

Для системы второго порядка, например интегрального звена с ПИ-регулятором, характеристическое уравнение имеет вид

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \quad (3.8)$$

Его корни равны

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}{2a_2} \quad (3.9)$$

В данном случае система устойчива, если $a_1 > 0$ и $a_1^2 > 4a_2 a_0$ (вещественные корни), или если $a_1 > 0$ и $a_1^2 < 4a_2 a_0$ (комплексные корни).

Отсюда следует, что положительность коэффициента a_1 является необходимым условием устойчивости системы второго порядка. Однако этого не достаточно. Необходимо также, чтобы и коэффициенты a_0 и a_2 также были положительными.

Итак, необходимым и достаточным условием устойчивости систем первого и второго порядка является положительность коэффициентов их характеристических уравнений. Это условие и будет алгебраическим критерием устойчивости для таких систем. Его математическая запись

$$a_2, a_1, a_0 > 0 \quad (3.10)$$

Для систем более высоких порядков этого условия уже не достаточно. Например, для системы третьего порядка с характеристическим уравнением

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \quad (3.11)$$

кроме положительности всех коэффициентов требуется соблюдение дополнительного условия

$$a_1 a_2 > a_3 a_0 \quad (3.12)$$

Для проверки устойчивости систем n -го порядка используются алгебраические критерии Рауса-Гурвица, здесь не рассматриваемые.

3.3 Частотный критерий устойчивости

Сложные системы целесообразнее исследовать на устойчивость с помощью частотных характеристик, которые можно получить экспериментально или аналитически по передаточным характеристикам системы и представить в виде графиков.

Критерий Найквиста-Михайлова. Если КЧХ замкнутой системы (з.с) можно представить через характеристику соответствующей разомкнутой системы (р.с) в виде

$$W_{з.с}(i\omega) = \frac{W_{р.с}(i\omega)}{1 + W_{р.с}(i\omega)}$$

то по расположению на комплексной плоскости U, iV годографа вектора КЧХ разомкнутой системы $W_{р.с}(i\omega)$ относительно **критической точки** с координатами $U(\omega) = -1, iV(\omega) = 0$ (рис. 3.3)

можно судить об устойчивости исходной замкнутой системы. При этом используется критерий Найквиста: *замкнутая система устойчива, если годограф вектора ее КЧХ в разомкнутом состоянии не охватывает критическую точку.*

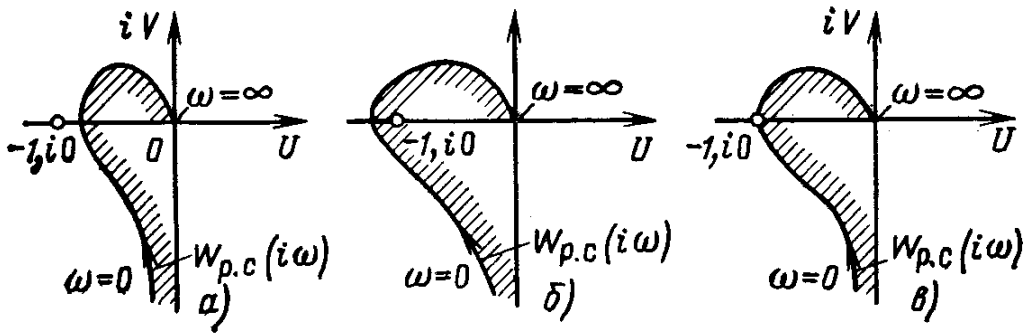


Рис. 3.3 Годографы вектора $W(i\omega)$ разомкнутых систем:
 a – устойчивой; b – неустойчивой; c – предельной

Сравнительная оценка критериев устойчивости. Как отмечалось ранее, методы исследования устойчивости АСР делятся на прямые и косвенные. Опытный прямой метод наиболее достоверен, но не всегда возможен или целесообразен в промышленных условиях. Во многих случаях целесообразно опытное исследование на математических моделях. При этом требуется знание исходных дифференциальных уравнений составных элементов системы.

Расчетный прямой метод определения устойчивости по известным дифференциальным уравнениям звеньев, образующих систему, можно применять всегда, но он трудоемок и требует последующей проверки. Этот метод позволяет исследовать систему на устойчивость до ее реализации в промышленных условиях.

Косвенный метод – корневой или алгебраический – менее трудоемок по сравнению с прямым расчетным методом, но требует определенных навыков в расчете сложных систем. Он неприменим для систем, содержащих звенья запаздывания.

Частотный критерий Найквиста-Михайлова требует построения годографа КЧХ для разомкнутой системы. Его преимущество перед предыдущим критерием состоит в возможности анализа систем с запаздыванием и опытного определения КЧХ разомкнутой системы.

3.4 Запас устойчивости

Важно знать, насколько исследуемая система близка к границе или пределу устойчивости. Мерой удаления характеристик АСР от границы или предела устойчивости служит **запас устойчивости**. В зависимости от принятого метода исследования для одной и той же системы запас устойчивости будет измеряться различными величинами.

Например, при использовании временных характеристик о запасе устойчивости судят по степени затухания переходных процессов (см. рис. 2.8)

$$\psi = 1 - \frac{y^{III}}{y^I}$$

При этом предельным значением степени затухания, при котором система оказывается на границе устойчивости, будет $\psi = 0$ при $y^{III} = y^I$ (см. рис. 3.4, кривая a).

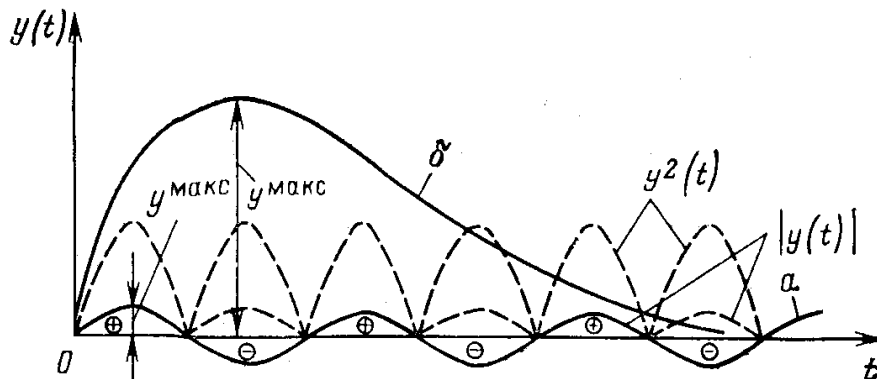


Рис. 3.4 Переходные процессы:

a – колебательный; b – аperiodический

При использовании косвенных методов исследования, например корневого критерия, о запасе устойчивости судят по расположению ближайшего к мнимой оси корня p_k или пары комплексных корней p_1 и p_2 характеристического уравнения системы (см. рис. 3.2). Показателем запаса в данном случае является число

$$m = \alpha/\beta = \operatorname{tg}\varphi$$

называемое **степенью колебательности** системы и равное отношению действительной части α к мнимой β для ближайшей к мнимой оси пары корней p_1 и p_2 (рис. 3.5).

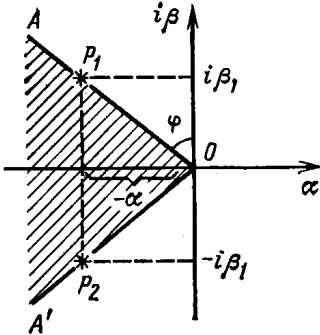


Рис. 3.5 Расположение корней характеристического уравнения системы с заданным показателем качества

Расположение корней характеристического уравнения системы в секторе AOA' обеспечивает степень затухания переходного процесса $\psi = 1 - e^{-2\pi m}$.

При исследовании устойчивости систем с помощью частотных характеристик необходимо построить окружность с центром в точке с координатами $-1, i0$ (критической точки), касающуюся годографа КЧХ (рис. 3.6). К точке касания (точка А) проводятся отрезки АВ (радиус окружности) и АО, который соответствует некоторому значению КЧХ $W_{p.c}$. Это значение КЧХ имеет место при так называемой **резонансной** частоте ω_p . Отношение КЧХ замкнутой системы при этой частоте и при, равной нулю называется **показателем колебательности** и служит мерой устойчивости системы по частотному критерию.

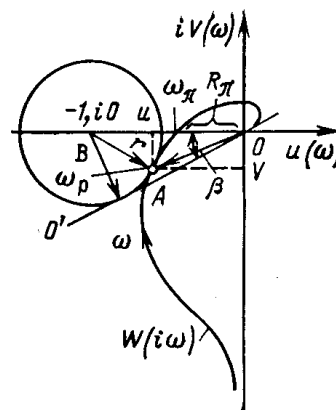


Рис. 3.6 Определение области устойчивости по годографу КЧХ

Промышленные АСР всегда должны обладать определенным запасом устойчивости, но чрезмерный запас в большинстве случаев противоречит требованиям качества регулирования. Например, для рис. 3.4 система a находится на границе устойчивости (степень колебательности равна $\psi = 0$). Система b имеет максимальный запас устойчивости ($\psi = 1$), но значительно уступает системе a по наличию в ней существенного отклонения регулируемой величины y^{\max} .

3.5 Качество процессов регулирования

Понятие о качестве регулирования. Запас устойчивости является необходимым, но не достаточным условием оптимальности АСР. Процессы автоматического регулирования должны удовлетворять ряду дополнительных требований, по степени выполнения которых судят о качестве АСР. В реальных системах под качеством понимают совокупность показателей и критери-

ев, позволяющих оценить характер отклонения регулируемой величины под действием изменяющихся возмущений и судить о том, насколько система удовлетворяет поставленным требованиям при заданных конкретных ограничениях.

Теплоэнергетические установки как объекты управления характеризуются следующими особенностями:

1) значительные по амплитуде и длительные отклонения регулируемой величины от заданного значения не только ухудшают экономические показатели основного оборудования, но также повышают вероятность его повреждения. Например, повышение температуры перегрева пара выше заданного значения может привести к повреждению труб пароперегревателя. В этом случае качество АСР связано с **долговечностью** (сроком службы) основного оборудования.

2) кратковременные, но незначительные отклонения, так называемые выбросы регулируемой величины также могут привести к повреждению основного оборудования. Например, перепитка барабанного парового котла водой может явиться причиной заброса воды в паропровод и повреждения турбины. Следовательно, качество АСР тесно связано с **надежностью** работы основного оборудования.

3) незначительные, но длительные и систематические отклонения регулируемой величины от заданного значения могут привести к ухудшению экономичности того или иного участка технологического процесса или установки в целом. Например, отклонение содержания кислорода в уходящих газах от оптимального значения приводит даже при незначительном понижении КПД паровых котлов, к весьма ощутимому перерасходу топлива в масштабе крупной электростанции или энергосистемы. Качество АСР на этом участке тесно связано с **экономичностью** работы основного оборудования.

Следовательно, экономичность, надежность и срок службы основного оборудования ТЭС тесно связано с качеством работы АСР.

О качестве АСР можно судить либо по форме процесса регулирования при наиболее характерном или опасном однократном возмущении по одному из каналов воздействия, так называемому единичному процессу, либо по данным статистики, т.е. среднесменным, суточным и месячным отклонениям регулируемых величин или числу выбросов за сутки, месяц или год.

Оценка качества по кривым переходных процессов. Рассмотрим переходные процессы в замкнутой одноконтурной системе при ступенчатом возмущении со стороны задатчика регулятора (рис. 3.7, а) и со стороны регулирующего органа (рис. 3.7, б, в). Для оценки качества этих процессов используются следующие показатели:

1) максимальное отклонение регулируемой величины от ее установившегося значения: y^I – динамическая и $y^{уст}$ – статическая ошибки регулирования;

2) время регулирования t_p , определяемое промежутком времени от начала переходного процесса до момента, когда регулируемая величина будет отличаться от установившегося значения менее чем на некоторое заранее заданное значение Δ ;

3) степень затухания регулируемой величины

$$\psi = (y^I - y^{III}) / y^I$$

4) перерегулирование

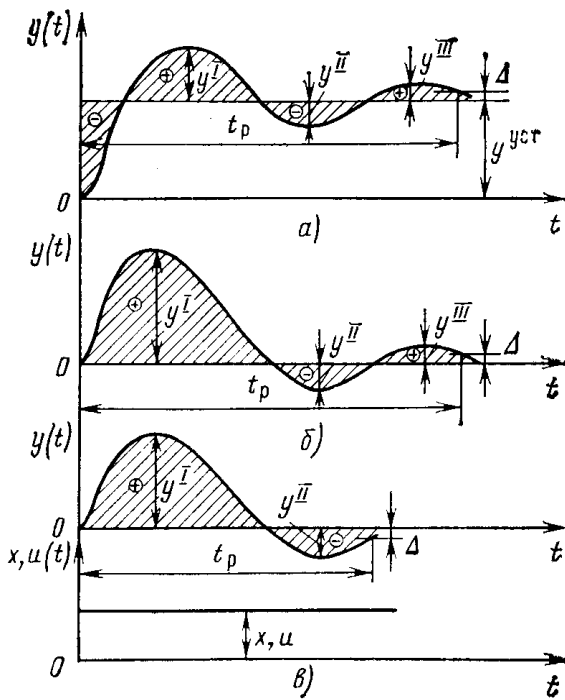


Рис. 3.7 Оценка качества по виду переходного процесса:

a – при возмущении задатчиком регулятора;
б, в – при возмущении нагрузкой или при возмущении со стороны регулирующего органа.

$$\xi = y^{\text{II}} / y^{\text{I}} \quad (3.13)$$

За количественную меру перерегулирования принимается ξ , равное, как видно из формулы (3.13), отношению максимального абсолютного отклонения отрицательного знака y^{II} к максимальному отклонению положительного знака y^{I} .

Система регулирования считается настроенной оптимально, если она удовлетворяет одновременно по крайней мере двум или трем показателям качества.

Косвенные методы оценки качества. Рассмотренные выше методы оценки качества относятся к прямым методам исследования АСР. С их помощью трудно определить общие закономерности влияния изменяемых параметров системы на характер переходного процесса (например, параметров настройки промышленных регуляторов). Для определения влияния изменяемых параметров АСР на ее качество используются косвенные методы оценки, которые позволяют установить характер переходного процесса без построения его графика.

Интегральные критерии. Обобщающим для прямых показателей качества переходных процессов (y^{I} , ψ и t_p) служит линейный интегральный критерий I , численно равный алгебраической сумме площадей (заштрихованных на рис. 3.7, б, в), заключенных между кривой регулируемой величины $y(t)$ и осью времени t или линией установившегося значения $y^{\text{уст}}$ для процесса, изображенного на рис. 3.7, а:

$$I = \int_0^{\infty} y(t) dt \quad (3.14)$$

Практически же вместо знака бесконечности ∞ в это выражение можно подставить время регулирования t_p .

Численное значение линейного интегрального критерия можно получить без построения зависимости $y(t)$ через передаточную функцию замкнутой системы и изображение возмущающего воздействия. При этом получается следующее соотношение

$$I = \int_0^{\infty} y(t) dt = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{W_{\text{зс}}(p)}{p} \quad (3.15)$$

где $W_{\text{зс}}(p)$ - передаточная функция замкнутой системы, p - оператор Лапласа.

Оптимальный по значению линейный интегральный критерий равен минимальной (по возможности) площади между кривой переходного процесса $y(t)$ и осью времени. Но использование этого критерия в случае значительной колебательности процесса может привести к ошибочной оценке качества АСР, как это следует из графика $y(t)$, приведенного на рис. 3.4. Здесь алгебраическая сумма площадей под кривой a , расположенных над и под осью времени, равна нулю. Следовательно, линейный интегральный критерий для незатухающих колебательных процессов, наихудших с точки зрения качества, равен нулю, т.е. своему предельному оптимальному значению. Поэтому для оценки качества колебательных процессов, в том числе слабо затухающих, используют интеграл от модуля регулируемой величины

$$I_M = \int_0^{t_p} |y(t)| dt \quad (3.16)$$

В этом случае значение функции $|y(t)|$, показанной на рис. 3.4 пунктирной линией, и интеграла I_M не зависят от знака переменной. Однако из-за трудностей вычисления интегралов с функциями такого типа (модульная функция), для оценки качества слабо затухающих процессов удобнее использовать квадратичный интегральный критерий

$$I^2 = \int_0^{t_p} [y(t)]^2 dt \quad (3.17)$$

Геометрическое представление этого интеграла показано на рис. 3.4.

Основы сертификации

1. Законодательная и нормативно-методическая база сертификации.

В переводе с латинского «сертификация» означает подтверждение, удостоверение.

Сертификация – это процедура подтверждения соответствия результата производственной деятельности, товара, услуги нормативным требованиям, посредством которой третья сторона документально удостоверяет, что продукция, работа или услуга соответствует заданным требованиям. Документ, подтверждающий соответствие, называется сертификатом соответствия. В процессе сертификации первая сторона – это изготовитель, вторая – потребитель, третья – независимая компетентная организация, прошедшая процедуру аккредитации.

Основопологающий документ в РФ в области сертификации – закон «О сертификации продукции и услуг» № 5151-1 от 10 июня 1993 года, а также закон № 154-ФЗ «О внесении изменений и дополнений в Закон РФ «О сертификации продукции и услуг»» от 31 июля 1998 года.

2. Система сертификации ГОСТ Р

Система сертификации создается Государственными органами управления, предприятиями, организациями и представляет собой совокупность участников сертификации, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в этой системе в соответствии с законами РФ.

В настоящее время Госстандартом РФ зарегистрировано около 15 систем обязательной сертификации. Первой и самой крупной из них является система сертификации ГОСТ Р, в которую входят около сорока систем сертификации однородной продукции, около 900 аккредитованных органов по сертификации и около 2000 испытательных лабораторий. Система ГОСТ Р выдает ежегодно около пятисот тысяч сертификатов на продукцию и услуги.

3. Добровольная и обязательная сертификация

Обязательная сертификация распространяется на продукцию и услуги, связанные с обеспечением безопасности окружающей среды, жизни, здоровья и имущества.

Добровольная сертификация проводится в тех случаях, когда строгое соблюдение требований существующих стандартов на продукцию и услуги государством не предусмотрены, т.е. когда стандарты не касаются требований безопасности.

5. Сертификация продукции и услуг и порядок ее проведения.

При проведении сертификации продукции в качестве способов доказательства соответствия продукции нормам используются:

- испытания выпускаемой продукции на основе оценивания одного или нескольких образцов
- проверка (оценка) производства
- инспекционный контроль
- рассмотрение заявления – декларации о соответствии

6. Сертификация систем качества и производства.

Качество продукции – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Система качества – это способ организации дела на предприятии, позволяющий поставлять потребителю продукцию, которая отвечает его требованиям. Система качества – это совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов.

В РФ разработан «Регистр систем качества». В качестве нормативных документов, на соответствие которым проводится сертификация систем качества, в Регистре используются международные стандарты ИСО семейства 9000.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ (РЕКОМЕНДАЦИИ)

3.1. Методические указания по изучению дисциплины

1) Следует тщательно планировать и организовывать время, необходимое для изучения дисциплины. Недопустимо откладывать ознакомление с теоретической частью, подготовку отчетов к лабораторным работам и выполнение курсового проекта на конец семестра, поскольку это неминуемо приведет к снижению качества освоения материала, оформления отчетов и проекта. Все виды работ по дисциплине рекомендуется выполнять по календарному плану, приведенному в Рабочей программе.

3.2. Методические указания к лабораторным занятиям

1) План проведения занятий с указанием последовательности изучаемых модулей, тем занятий, объема аудиторных часов, отводимых для освоения материалов по каждой теме, а также часов для самостоятельной работы студентов приведен в Рабочей программе.

2) Теоретические положения и указания к выполнению лабораторных работ приведены в учебных пособиях, разработанных ведущими вузами Российской Федерации

3.3. Методические указания по выполнению курсовой работы.

1) Тематика курсовых работ для всех студентов одинакова: «Расчёт трёхфазного трансформатора».

4) Защита практических работ и индивидуальных заданий.

К защите допускаются полностью готовые работы. На краткой пояснительной записке обязательны подписи исполнителя, руководителя, нормоконтроллера, которые поставляются в указанном порядке. Руководитель проекта, кроме подписи, выставляет проекту рекомендуемую оценку.

3.4 Методические указания по самостоятельной работе студентов

1) Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривает выполнение курсового проекта, а также подготовку к выполнению лабораторных работ и оформление отчетов по ним. Общая схема СРС приведена в Рабочей программе.

4 КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

4.1 Текущий контроль знаний

Текущий контроль знаний предусматривает контрольную точку. Оценка по контрольной точке выставляется на основании результатов

выполнения и защиты практических работ согласно плану, составленному для каждой подгруппы преподавателем, ведущим лабораторные работы;

выполнения разделов курсового проекта согласно плану, составленному преподавателем – руководителем курсового проектирования индивидуально для каждого студента;

тестирования по разделам теста, приведенного в п. 4.3. Собственно процедура тестирования дополняется собеседованием преподавателя со студентом по вопросам теста с целью выяснения аргументации последнего.

Итоговая оценка студента формируется преподавателем, ответственным за дисциплину (лектором) по данным, предоставленным преподавателем, ведущим лабораторные занятия, преподавателем – руководителем курсового проектирования и преподавателем, проводившим тестирование.

4.2. Итоговый контроль знаний

Итоговый контроль знаний подразумевает защиту практических работ и экзамен по теоретическому курсу. Экзамен предусматривает письменные ответы студента на два теоретических вопроса из списка вопросов, приведенного в Рабочей программе, а также тестирование по всем разделам теста, приведенного в п. 4.3. Процедура тестирования дополняется собеседованием преподавателя со студентом по вопросам теста с целью выяснения аргументации последнего. Для получения удовлетворительной оценки на экзамене достаточно показать знание основных понятий по теме экзаменационных вопросов и успешно пройти тест (оценка не ниже «удовлетворительно»). Оценка «хорошо» выставляется студенту, прошедшему тестирование с оценкой не ниже «хорошо» и показавшему способность экономического, математического, технического и др. обоснований решений как в своих письменных ответах на экзаменационные вопросы, так и по вопросам теста. Оценка «отлично» выставляется студенту, прошедшему тест с оценкой «отлично», показавшему способность экономического, математического, технического и др. обоснований решений в своих письменных ответах на экзаменационные вопросы и по вопросам теста и правильно ответившему на дополнительные вопросы по смежным темам. При этом неправильные ответы на дополнительные вопросы могут служить основанием для снижения оценки до «удовлетворительно», если эти ответы свидетельствуют о слабом понимании материала.

Тестовые задания для оценки качества знаний

Приведенные в пособии материалы используются для компьютерного тестирования знаний студентов специальности 140106 «энергообеспечение предприятий» по дисциплине «Управление, сертификация и инноватика», а также входного контроля знаний перед изучением дисциплины.

Входной контроль предусматривает решение трех задач по темам: «Матричные уравнения», «Линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами», «Определенные интегралы».

Вопросы для тестирования и контроля знаний по дисциплине охватывают все темы, изучаемые студентами в данном курсе, и сгруппированы по разделам:

1. Основы автоматического управления;
2. Основы стандартизации;
3. Основы сертификации.
4. Основы инноватики в РФ.

Тестирование является составной частью процедуры промежуточного контроля знаний (в ходе изучения дисциплины), а также используется для контроля остаточных знаний (после окончания изучения дисциплины).

1. Основы автоматического управления

1. Автоматическое регулирование – это

- а) автоматическое поддержание вблизи постоянного значения некоторой физической величины;
- б) автоматическое поддержание желаемого управления в любой момент времени;
- в) автоматическое изменение значения некоторой физической величины в зависимости от текущего состояния.

2. Одной из функций автоматического управления является

- а) оперативное отображение информации;

- б) дистанционное управление или управление машинами и механизмами на расстоянии;
 в) сбор, первичная обработка и хранение технологической информации.
3. Какое из приведенных понятий не является понятием теории автоматического управления?
 а) регулирующий орган;
 б) усилительное устройство;
 в) решающее устройство.
4. Системы стабилизации – это системы, в которых:
 а) регулируемая величина постоянна;
 б) сигнал задания постоянен;
 в) управляющий сигнал постоянен.
5. Следящие системы – это системы, в которых задающий сигнал:
 а) изменяется по известному закону;
 б) «следит» за возмущением;
 в) изменяется по неизвестному закону.
6. Линейной называется система,
 а) к которой применим принцип суперпозиции;
 б) к которой применим принцип детерминизма;
 в) в которой используется принцип обратной связи.
7. Какое состояние системы называется установившимся?
 а) Состояние системы при постоянстве возмущающих воздействий;
 б) Состояние системы при отсутствии возмущающих воздействий и постоянстве регулируемой величины;
 в) Состояние системы при постоянстве скорости изменения регулируемой величины.
8. Какие переходные процессы называются устойчивыми?
 а) Переходные процессы, которые не затухают во времени.
 б) Переходные процессы, которые протекают с постоянной скоростью.
 в) Переходные процессы, которые оканчиваются новым установившимся состоянием системы.
9. Какая из перечисленных математических форм является одной из форм математического описания динамических свойств линейных систем?
 а) алгебраические уравнения;
 б) интегральные уравнения;
 в) дифференциальные уравнения.
10. Какая форма записи уравнения соответствует операторной?
 а) $a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$
 б) $y(t) \left(\frac{a_1}{a_0} p + 1 \right) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$
 в) $y(t) = \frac{b_0}{a_0} x_1 + A e^{-\frac{a_0}{a_1} t}$
11. Изображение по Лапласу единичного ступенчатого воздействия (p – оператор Лапласа):
 а) $1(p) = 1$;
 б) $1(p) = 1/p$;
 в) $1(p) = p$.
12. Изображение по Лапласу единичного импульса (p – оператор Лапласа):
 а) $\delta(p) = 1$;
 б) $\delta(p) = 1/p$;
 в) $\delta(p) = p$.

13. Передаточная функция системы есть изображение по Лапласу
- реакции системы на единичное ступенчатое воздействие;
 - весовой функции системы;
 - переходной характеристики системы.
14. Амплитудно-частотная характеристика системы есть
- зависимость отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного от частоты;
 - зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты;
 - зависимость произведения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты.
15. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) последовательно соединенных звеньев определяется
- суммой АЧХ звеньев;
 - произведением АЧХ звеньев;
 - методом, выбираемым в зависимости от вида звеньев.
16. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) последовательно соединенных звеньев определяется
- суммой ФЧХ звеньев;
 - произведением ФЧХ звеньев;
 - методом, выбираемым в зависимости от вида звеньев.
17. Система будет устойчивой, если комплексные корни $p_k = \alpha_k + i\beta_k$ ее характеристического уравнения удовлетворяют требованию:
- $\alpha_k = 0$;
 - $\alpha_k < 0$;
 - $\alpha_k > 0, \beta_k < 0$.
18. Интегрирующее звено имеет передаточную функцию (k и T – постоянные параметры, p – оператор Лапласа):
- $W(p) = kp$;
 - $W(p) = k/p$;
 - $W(p) = k/(Tp+1)$;
19. Идеальное дифференцирующее звено имеет передаточную функцию (k и T – постоянные параметры, p – оператор Лапласа):
- $W(p) = kp$;
 - $W(p) = k/p$;
 - $W(p) = k/(Tp+1)$;

5. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе

В учебном процессе по дисциплине предусматриваются интерактивные технологии и инновационные методы.

Проведение практических занятий и работ связано с использованием современных компьютерных технологий в области автоматизации.

Курсовое проектирование не предусмотрено. Выполнение расчетно-графических работ по дисциплине учебным планом не предусмотрено.

В процедурах промежуточного и итогового контроля знаний используется компьютерное тестирование.