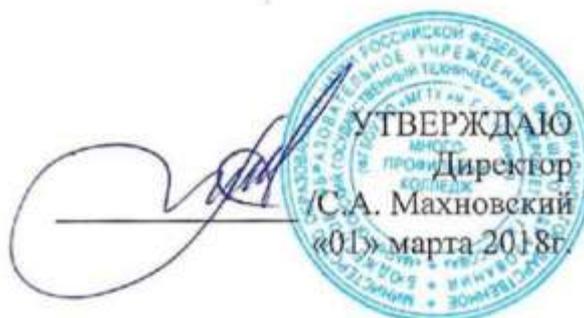


Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»

Многопрофильный колледж



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ  
ПО ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ МОДУЛЮ  
ПМ.01 РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ  
СПЕЦИФИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
программы подготовки специалистов среднего звена  
по специальности СПО  
15.02.14 Оснащение средствами автоматизации технологических  
процессов и производств (по отраслям)**

Магнитогорск, 2018

**ОДОБРЕНО**

Предметно-цикловой комиссией  
Автоматизации технологических  
процессов

Председатель: Н.В. Андрусенко  
Протокол №6 от 21.02.2018 г.

Методической комиссией

Протокол №4 от 01.03.2018 г.

**Разработчики**

Н.В. Андрусенко,  
преподаватель МпК ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Методические указания разработаны на основе рабочей программы  
ПМ.01 Разработка и компьютерное моделирование элементов систем  
автоматизации с учетом специфики технологических процессов.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	4
2 ПЕРЕЧЕНЬ ПРАКТИЧЕСКИХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ	6
3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	9
МДК.01.01 Осуществление анализа решений для выбора программного обеспечения в целях разработки и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания	
Практическое занятие 1	9
Практическое занятие 2	9
Лабораторное занятие 1	10
Лабораторное занятие 2	11
Лабораторное занятие 3	12
Лабораторное занятие 4	15
Лабораторное занятие 5	16
Лабораторное занятие 6	18
Лабораторное занятие 7	19
Лабораторное занятие 8	19
Лабораторное занятие 9	22
Практическое занятие 3	22
Практическое занятие 4	27
Практическое занятие 5	31
Практическое занятие 6	34
Практическое занятие 7	36
Практическое занятие 8	43
Практическое занятие 9	44
Лабораторное занятие 10	47
Лабораторное занятие 11	47
Лабораторное занятие 12	48
Лабораторное занятие 13	48
Лабораторное занятие 14	49
Практическое занятие 11	49
Практическое занятие 12	52
МДК.01.02 Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации	
Лабораторное занятие 1	54
Лабораторное занятие 2	55
Лабораторное занятие 3	56
Лабораторное занятие 4	57
Лабораторное занятие 5	59
Лабораторное занятие 6	61
Практическое занятие 1	62
Практическое занятие 2	70
Практическое занятие 3	73
Практическое занятие 4	73
Практическое занятие 5	76
Практическое занятие 6	86
Практическое занятие 7	87
Практическое занятие 8	89
Практическое занятие 9	94
Практическое занятие 10	96
Практическое занятие 11	97

## 1 ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Состав и содержание практических и лабораторных занятий направлены на реализацию Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

Ведущей дидактической целью практических занятий является формирование профессиональных практических умений (умений выполнять определенные действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности).

Ведущей дидактической целью лабораторных занятий является экспериментальное подтверждение и проверка существенных теоретических положений (законов, зависимостей).

В соответствии с рабочей программой ПМ.01 Разработка и компьютерное моделирование элементов систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов, МДК.01.01 Осуществление анализа решений для выбора программного обеспечения в целях разработки и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания, МДК.01.02 Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации, предусмотрено проведение практических и лабораторных занятий. В рамках практического/лабораторного занятия обучающиеся могут выполнять одну или несколько практических/лабораторных работ.

В результате их выполнения, обучающийся должен:

**уметь:**

- анализировать технические проекты и другую техническую документацию для выбора программного обеспечения для создания модели элементов систем автоматизации.

Содержание практических и лабораторных занятий ориентировано на формирование общих компетенций по профессиональному модулю программы подготовки специалистов среднего звена по специальности и овладению **профессиональными компетенциями**:

ПК 1.1. Осуществлять анализ имеющихся решений для выбора программного обеспечения для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания.

ПК 1.2. Разрабатывать виртуальную модель элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания.

ПК 1.3. Проводить виртуальное тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации для оценки функциональности компонентов

ПК 1.4. Формировать пакет технической документации на разработанную модель элементов систем автоматизации

А также формированию **общих компетенций**:

ОК 01 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности, применительно к различным контекстам

ОК 02 Осуществлять поиск, анализ и интерпретацию информации, необходимой для выполнения задач профессиональной направленности

ОК 03 Планировать и реализовывать собственное профессиональное и личностное развитие

ОК 04 Работать в коллективе и команде, эффективно взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами

ОК 05 Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке с учетом требований особенностей социального и культурного контекста

ОК 06 Проявлять гражданско-патриотическую позицию, демонстрировать осознанное поведение на основе традиционных общечеловеческих ценностей

ОК 07 Содействовать сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, эффективно взаимодействовать в чрезвычайных ситуациях

ОК 08 Использовать средства физической культуры для сохранения и укрепления здоровья в процессе профессиональной деятельности и поддержания необходимого уровня физической подготовленности

ОК 09 Использовать информационные технологии в профессиональной деятельности

ОК 10 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языке

ОК 11 Планировать предпринимательскую деятельность в профессиональной сфере.

Выполнение обучающимися практических и лабораторных работ по ПМ.01 Разработка и компьютерное моделирование элементов систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов, МДК.01.01 Осуществление анализа решений для выбора программного обеспечения в целях разработки и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания, МДК.01.02 Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации, направлено на:

- *обобщение, систематизацию, углубление, закрепление, развитие и детализацию полученных теоретических знаний по конкретным темам учебной дисциплины;*

- *формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;*

- *формирование и развитие умений: наблюдать, сравнивать, сопоставлять, анализировать, делать выводы и обобщения, самостоятельно вести исследования, пользоваться различными приемами измерений, оформлять результаты в виде таблиц, схем, графиков;*

- *приобретение навыков работы с различными приборами, аппаратурой, установками и другими техническими средствами для проведения опытов;*

- *развитие интеллектуальных умений у будущих специалистов: аналитических, проекторочных, конструктивных и др.;*

- *выработку при решении поставленных задач профессионально значимых качеств, таких как самостоятельность, ответственность, точность, творческая инициатива.*

Практические и лабораторные занятия проводятся после соответствующей темы, которая обеспечивает наличие знаний, необходимых для ее выполнения.

## 2 ПЕРЕЧЕНЬ ПРАКТИЧЕСКИХ/ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

### МДК.01.01 Осуществление анализа решений для выбора программного обеспечения в целях разработки и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания

Разделы/темы	Темы практических/лабораторных занятий	Количество часов	Требования ФГОС СПО (уметь)
<b>Раздел 1. Осуществление анализа решений для выбора программного обеспечения в целях разработки и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания</b>		<b>80</b>	
<b>Тема 1.1. Основные элементы автоматизации</b>	Практическая работа №1 Расчет класса точности прибора		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Практическая работа №2 Построение статической и динамической характеристики		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Лабораторная работа № 1 Поверка термоэлектрического преобразователя		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Лабораторная работа № 2 Поверка термопреобразователя сопротивления		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Лабораторная работа № 3 Изучение и поверка газоанализатора для определения содержания кислорода в продуктах сгорания.		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Лабораторная работа № 4 Сравнение методов измерения температуры		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Лабораторная работа № 5 Сравнение методов измерения давления		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Лабораторная работа № 6 Анализ работы бесконтактного датчика - выключателя		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Лабораторная работа № 7 Анализ работы аналогового датчика положения		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Лабораторная работа № 8 Анализ работы триггеров		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Лабораторная работа № 9 Анализ работы регистров		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Практическое занятие № 3 Расчет автоматического потенциометра КСП		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Практическое занятие № 4 Расчет и выбор сужающего устройства		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Практическое занятие № 5 Изучение обозначения элементов средств автоматизации		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Практическое занятие № 6 Анализ и построение функциональные схемы автоматического регулирования		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Практическое занятие № 7 Анализ и построение схемы автоматического контроля		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Практическое занятие № 8 Анализ и построение схемы автоматического регулирования		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
Практическое занятие № 9 Анализ и построение принципиальных электрических схем автоматического регулирования		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,	
<b>Тема 1.2 Использование</b>	Лабораторная работа № 10 Сборка структурной схемы с операционным усилителем		У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11,

элементов автоматизации для конкретной системы управления	Лабораторная работа № 11 Исследование работы коммутаторов		У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1, У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,	
	Лабораторная работа № 12 Исследование работы командоаппарата с жесткой логикой			
	Лабораторная работа №13 Анализ управления программируемого реле			
	Лабораторная работа №14 Программирование реле с помощью ПК			
	Практическое занятие № 11 Расчет и выбор исполнительного механизма			У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.
	Практическое занятие № 12 Выбор и расчет регулирующих органов			
ИТОГО		80		

### МДК.01.02 Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации

Разделы/темы	Темы практических/лабораторных занятий	Количество часов	Требования ФГОС СПО (уметь)	
<b>Раздел 2. Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации</b>		<b>46</b>		
<b>Тема 2.1. Тестирование модели элементов систем автоматизации</b>	Лабораторная работа № 1 Снятие кривой разгона объекта регулирования		У1, У01.1-У01.3, У01.11, У02.1, У02.6, У04.2, У05.2, У05.3, У09.1, У10.1, У10.3, У10.4, У10.5, У10.7.	
	Лабораторная работа № 2 Разработка виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)			
	Лабораторная работа № 3. Осуществление выбора и применения программного обеспечения для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания.			
	Лабораторная работа № 4. Разработка виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)			
	Лабораторная работа № 5. Проведение виртуального тестирования разработанной модели различных элементов систем автоматизации			
	Лабораторная работа № 6. Оценка функциональности компонентов разработанной модели элементов систем автоматизации			
	Практическое занятие № 1 Исследование динамических звеньев			У1, У01.1, У01.2, У01.5, У01.6, У01.11, У02.1, У02.2, У02.4, У02.6, У02.7, У03.1,
	Практическое занятие № 2 Расчет траектории выходного параметра инерционного звена I			

	порядка методом Эйлера		У03.4, У04.1, У04.2, У04.5, У04.8, У05.1, У05.3, У07.2, У07.3, У10.1, У10.2, У10.3, У10.4, У10.6, У10.7,
	Практическое занятие № 3 Расчет траектории выходного параметра инерционного звена II порядка методом Эйлера		
	Практическое занятие № 4 Расчет передаточных функций систем при наличии обратных связей		
	Практическое занятие № 5 Типовые законы регулирования		
	Практическое занятие № 6 Определение показателей качества процесса регулирования		
	Практическое занятие № 7 Построение годографа АФЧХ объекта по кривой разгона		
	Практическое занятие № 8 Расчет устойчивости замкнутой системы АУ		
	Практическое занятие № 9 Выбор закона регулирования и расчет оптимальных настроек регулятора		
	Практическое занятие № 10 Расчет запаса устойчивости		
	Практическое занятие № 11 Определение показателей качества		
<b>ИТОГО</b>		<b>46</b>	

### 3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

#### МДК.01.01 Осуществление анализа решений для выбора программного обеспечения в целях разработки и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания

##### Тема 1.1. Основные элементы автоматизации

###### Практическое занятие № 1

###### Расчет класса точности прибора

**Цель:** формировать знания и умения отличать технические средства, которые служат для измерения электрических величин; по каким признакам различают измерительные приборы, принципы их действия, погрешности измерений и различия между классами точности.

###### Выполнив работу, Вы будете:

###### *уметь:*

- рассчитать действительное значение измеряемого параметра, исходя из погрешности измерения и класса точности прибора.

###### Материальное обеспечение:

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

###### Задание:

Решить задачи, номера которых приведены в таблице 4, согласно полученному варианту.

###### Порядок выполнения работы:

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

###### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания.

###### Критерии оценки:

«5» - полностью выполненные задания, без ошибок или с 1 ошибкой

«4» - полностью выполненные задания, с 2-3 ошибками

«3» - задания, выполненные наполовину

«2» - задания, не выполненные или задания, выполненные меньше, чем наполовину

###### Практическое занятие № 2

###### Построение статической и динамической характеристики

###### Цель:

– научиться строить характеристики;  
– научить находить по динамической характеристике: время запаздывания и время инерционности.

###### Выполнив работу, Вы будете:

###### *уметь:*

- строить статические и динамические характеристики;
- определять основные показатели по динамической характеристике.

**Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание.

**Задание:**

1. Построить статическую характеристику по данным практической работы № 1.
2. Построить динамическую характеристику и определить время запаздывания и время инерционности.

**Порядок выполнения работы:**

1. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
2. Оформите результаты работы.

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

**Критерии оценки:**

«5» - полностью выполненные задания, без ошибок или с 1 ошибкой

«4» - полностью выполненные задания, с 2-3 ошибками

«3» - задания, выполненные наполовину

«2» - задания, не выполненные или задания, выполненные меньше, чем наполовину

## **Лабораторная работа № 1**

### ***Проверка термоэлектрического преобразователя***

**Цель работы:** научиться производить проверку термоэлектрического преобразователя и определять его класс точности

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- снимать характеристики и производить подключение приборов.

**Материальное обеспечение:**

Установка для проверки и градуировки датчиков температуры УПСТ-2М

**Задание:**

- 1 Произвести проверку термопары.
- 2 Рассчитать ее класс точности.

**Краткие теоретические сведения:**

Проверка термопар заключается в их градуировке - определении зависимости термо-ЭДС от температуры рабочих концов при температуре свободных концов 0 °С.

Термопары проверяют сравнением показаний проверяемой термопары с показаниями образцовой. При проверке термопар с пределами измерения до 300 °С их помещают в водяной, масляный или солевой термостаты, а при более высокой температуре - в специальные электрические трубчатые печи.

Для проведения проверки требуются следующие оборудование и приборы:

- 1) образцовая медь-константановая термопара для температуры от -50 до 0 °С;
- 2) образцовая платиновый-платиновая термопара в интервале температур от 300 и до 1200 °С;
- 3) образцовая термопара ПР-30/6 для интервала 90 - 1770 °С;
- 4) электрическая нагревательная горизонтальная муфельная печь;
- 5) термостаты - нулевой (0 °С), водяной (от 9 до 100 °С) и масляный (от 90 до 300 °С);
- 6) лабораторные потенциометры класса 0,03 и выше.

Поверяемую термопару 3 (рис 1, б) освобождают от защитной арматуры, связывают с образцовой термопарой 4 асбестовым шнуром так, чтобы их рабочие концы были совмещены.

Рабочий конец образцовой термопары не должен иметь электрического контакта с термопарой из неблагородных металлов. Для этого образцовую термопару защищают тонкостенным колпачком из фарфора или кварца. Рабочие концы проверяемых термопар остаются обнаженными на 8 - 10 мм от спая, остальную часть электрода необходимо изолировать фарфоровыми бусами. Пучок термопар вводят внутрь печи 2 так, чтобы их рабочие концы располагались в зоне максимального нагрева и не касались стенок печи. В этом положении термопары закрепляют, и отверстия печи закрывают асбестом. Допускается одновременная проверка шести термопар. Свободные концы термопар удлиняют компенсационными проводами и пропускают через нуль-термостаты 5, в которых поддерживают температуру 0°С. Компенсационные провода образцовой и проверяемых термопар подключают к потенциометру через переключатель 6. ТермоЭДС термопар измеряют через каждые 100 °С.

При достижении в печи температуры, необходимой для проведения измерения, ток нагревателя регулируют реостатом 1 так, чтобы скорость измерения температуры не превышала 1- 2 °С/мин и при этом делается 3 - 4 отсчета показаний образцовой и проверяемых термопар. ТермоЭДС термопар равны среднеарифметическим значениям, найденным из отсчетов показаний по каждой из термопар в соответствующей температурной точке.

При проверке термопар ведут протокол, в который записывают следующие данные: градуировку проверяемой термопары, ее рабочий диапазон измерений, температуру свободных концов, показания потенциометра.

#### **Порядок выполнения работы:**

- 1 Подготовить установку для проверки.
- 2 Присоединить проверяемую термопару к образцовой.
- 3 Включить муфельную печь.
- 4 Произвести измерения показания проверяемой и образцовой термопар
- 5 Вычислить класс точности

#### **Форма представления результата:**

Отчет по лабораторной работе

## **Лабораторная работа № 2** ***Проверка термопреобразователя сопротивления***

**Цель работы:** научиться производить проверку термометра сопротивления и определять его класс точности

#### **Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;

- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- снимать характеристики и производить подключение приборов.

**Материальное обеспечение:**

Установка для поверки и градуировки датчиков температуры УПСТ-2М

**Задание:**

- 1 Произвести поверку термометра сопротивления.
- 2 Рассчитать его класс точности.

**Краткие теоретические сведения:**

Технические термометры сопротивления поверяют в следующем порядке:

- 1) внешний осмотр, выявление видимых повреждений как защитной арматуры, так и чувствительного элемента, удаленного из защитной арматуры;
- 2) измерение сопротивления изоляции мегомметром на 500 В. При этом клеммы чувствительного элемента соединяются накоротко;

3) проверка соотношения  $R_{100}/R_0$  путем сравнения проверяемого термометра  $R_N$  с контрольным термометром сопротивления  $R_1$  с помощью двойного моста, в котором контрольный термометр служит образцовым, а проверяемый — неизвестным сопротивлением.

Уравновешивание моста необходимо производить дважды: первый раз после помещения и выдержки контрольного и проверяемого термометров в течение 30 мин в тающем льде, второй раз - после помещения и выдержки обоих термометров в течение 30 мин в насыщенных парах кипящей воды. Так как температура 0 и 100 °С при этом методе не поддерживается с высокой точностью, то  $R_{100}$  и  $R_0$  не обязательно должны соответствовать табличным. Важно, чтобы значения отношения  $R_{100}/R_0$  были одинаковыми у контрольного и проверяемого термометров (ошибка должна составлять не более 0,02 %).

Измерение сопротивлений может производиться и с помощью потенциометрической установки. При этом измеряют падение напряжения на проверяемом и контрольном термометрах, соединенных последовательно.

Перед поверкой чувствительные элементы извлекают из защитной арматуры и помещают в стеклянные пробирки. Для устранения погрешности от саморазогрева термометров током измерительной схемы сила тока, проходящего через термометры, ограничивается  $R_p$  и не должна превышать 5мА.

**Порядок выполнения работы:**

- 1 Подготовить установку для поверки.
- 2 Присоединить проверяемый и образцовый термометры к мосту.
- 3 Подать напряжение.
- 4 Произвести измерения показания термометров
- 5 Вычислить класс точности

**Форма представления результата:**

Отчет по лабораторной работе

**Лабораторная работа № 3**

*Изучение и поверка газоанализатора для определения содержания кислорода в продуктах сгорания*

**Цель работы:** научиться производить поверку газоанализатора и определять его класс точности

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- снимать характеристики и производить подключение приборов.

**Материальное обеспечение:**

Установка для поверки газоанализаторов

**Задание:**

- 1 Произвести поверку газоанализатора.
- 2 Рассчитать его класс точности.

**Краткие теоретические сведения:**

Газоанализатор подвергается поверке или калибровке в зависимости от сферы применения, согласно Закону РФ "Об обеспечении единства измерений".

При проведении первичной и периодической поверки должны быть выполнены следующие операции и применены средства поверки с характеристиками, указанными в таблице:

Наименование операции	Наименование средств поверки
1. Внешний осмотр	Визуально
2. Опробование. Определение электрического сопротивления изоляции, проверка герметичности газовой системы	Мегаомметр постоянного тока 500 В, КТ1.0 Вентиль запорный, условный проход ДУ2; тройник, условный проход ДУ2; манометр образцовый с диапазоном измерений 0...100 кПа, КТ 0,4; секундомер, КТ 3,0; баллон с техническим аргоном
3. Определение метрологических характеристик. Определение основной приведенной погрешности газоанализатора, в том числе, по выходному унифицированному сигналу. Проверка сигнализации о диапазоне измерений по унифицированному выходному сигналу	Миллиамперметр постоянного тока с диапазоном измерений 0-30 мА, КТ 1,0; поверочные газовые смеси. Прибор комбинированный типа Ц4360 (тестер)

**Примечания:**

1. Допускается применение других средств поверки с аналогичными характеристиками.

2. Все средства измерений должны иметь непросроченные поверительные клейма или свидетельства о поверке.

Время проведения поверки не более 8 ч.

Поверку газоанализаторов следует проводить при температуре окружающей среды и анализируемого газа + 20±5 °С, относительной влажности окружающего воздуха до 80 % и атмосферном давлении от 84 до 106,7 кПа.

Подготовку газоанализаторов к поверке следует проводить в соответствии с руководством по эксплуатации, подготовку средств поверки - в соответствии с указаниями в их эксплуатационной документации.

Газоанализатор и средства поверки перед проведением поверки следует выдержать в условиях проведения поверки не менее 2 ч. При проведении внешнего осмотра должно быть установлено соответствие газоанализатора следующим требованиям:

- комплектность газоанализатора должна соответствовать настоящему руководству по эксплуатации, кроме израсходованных запасных частей;
- маркировка газоанализатора должна соответствовать требованиям;
- корпус газоанализатора не должен иметь дефектов, препятствующих его функционированию;
- резьба на штуцерах газоанализатора должна быть исправной, штуцеры должны быть прочно закреплены на корпусе и закрыты защитными заглушками.

Измерение электрического сопротивления изоляции производите мегаомметром при включенном тумблере "СЕТЬ". Электрическое сопротивление измерьте между закороченными штырьками сетевой вилки и корпусом. Оно должно быть не менее 20 МОм. Проверку герметичности газовой системы газоанализатора производите методом определения спада давления по манометру с диапазоном измерений 0...100 кПа на аргоне.

Для определения метрологических характеристик газоанализатор подготовьте и включите в работу.

Перед проведением поверки проведите юстировку прибора согласно настоящего руководства по эксплуатации. Определение основной приведенной погрешности газоанализатора, в том числе, по выходному сигналу, производите для каждого диапазона измерений с помощью поверочных газовых смесей (ПГС), аттестованных заводом изготовителем, указанных в таблице.

Номер ПГС	Диапазон измерений, млн-1	Объемная доля азота в аргоне, млн-1	Относительная погрешность аттестации, %
1	0-10	2-8	±10
2	0-100	15-30	±5
3	0-100	50-90	±5

Основную приведенную погрешность газоанализатора, % определите по формуле:

$$\gamma_0 = \frac{C_n - C_d}{C_n} \cdot 100,$$

где  $C_n$  - показания газоанализатора, млн-1;  $C_d$  - действительная объемная доля азота в ПГС, млн-1;  $C_n$  - наибольшее значение диапазона измерений, млн-1; 100 - коэффициент, обусловленный выбором единиц физических величин, %.

Проверку сигнализации о диапазоне измерений по унифицированному выходному сигналу производите одновременно с определением основной приведенной погрешности газоанализатора. Для проверки сигнализации соответствующего диапазона измерений присоедините тестер в режиме измерения сопротивления к контактам 1-6 разъема "ДИАПАЗОНЫ". Номера контактов соответствующего диапазона измерений приведены в таблице.

Диапазон измерений, млн1	Номера контактов разъема "ДИАПАЗОНЫ"	Включение индикаторной лампы диапазона измерений
0-10	1,2	X1
0-100	3,4	X10
0-1000	5,6	X100

#### Порядок выполнения работы:

- 1 Провести внешний осмотр измерительной системы.

2 Опробование. Определить электрическое сопротивление изоляции, проверить герметичность газовой системы.

3 Определить метрологические характеристики. Определить основную приведенную погрешность газоанализатора, в том числе, по выходному унифицированному сигналу.

#### **Форма представления результата:**

В ходе поверки следует вести протокол произвольной формы. В протоколе должны быть указаны:

- номер протокола, дата поверки и владелец газоанализатора;
  - заводской номер поверяемого газоанализатора;
  - показания поверяемого газоанализатора и значения погрешностей.
- Отчет по лабораторной работе.

### **Лабораторная работа № 4** **Сравнение методов измерения температуры**

**Цель работы:** изучение и сравнение методов измерения температуры.

#### **Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- выбирать метод и вид измерения.

#### **Материальное обеспечение:**

Установка «Методы измерения температуры»

#### **Задание:**

- 1 Изучить методы измерения температуры.
- 2 Провести сравнительный анализ.

#### **Краткие теоретические сведения:**

Выбор метода измерения температуры зависит от диапазона измеряемых температур, требуемой точности, быстродействия и допустимой величины входного теплового сопротивления измерительного устройства, т.е. его входной теплоемкости.

В диапазоне низких и средних температур используются в основном контактные методы измерения, при этом используются термометры сопротивления и термоэлектрические преобразователи (термопары). В терморезисторных преобразователях используется свойство проводников или полупроводников изменять свое сопротивление при изменении их температуры. В термометрах сопротивления обычно используют в качестве проводников медь или платину. Преимуществом медных термометров сопротивления является линейная зависимость их сопротивления от температуры:  $R=R_0(1+0,004\Delta T)$ , где  $R_0$  - сопротивление при  $293^\circ\text{K}$ . Чувствительность такого ПИП  $0,004R_0K^{-1}$ , а относительная чувствительность  $0,004K^{-1}$ . Недостатком медных термометров сопротивления является узкий температурный диапазон (220-400K). С целью расширения этого диапазона применяют платиновые термометры сопротивления. Их использование возможно до 1400K. Однако, зависимость их сопротивления от температуры имеет нелинейный характер, что является их недостатком.

Значительно более высокие температуры позволяют измерять термоэлектрические преобразователи – термопары. Верхняя граница их диапазона достигает 2300K. Недостатки – высокая инерционность и очень низкий коэффициент полезного действия.

Бесконтактные методы измерения температуры основаны на использовании энергии излучения нагретых тел. Приборы для измерения температуры, основанные на использовании энергии нагретых тел, называют пирометрами, которые делятся на яркостные, радиационные и цветовые.

**Порядок выполнения работы:**

- 1 Подготовить установку к работе.
- 2 Включить питание.
- 3 Нагреть печь до требуемой температуры и провести снятие показаний с датчиков в нескольких точках диапазона.
- 4 Провести сравнительный анализ показаний.

**Форма представления результата:**

Отчет по лабораторной работе

**Лабораторная работа № 5**  
***Сравнение методов измерения давления***

**Цель работы:** изучение и сравнение методов измерения давления.

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- выбирать метод и вид измерения.

**Материальное обеспечение:**

Установка «Методы измерения давления»

**Задание:**

- 1 Изучить методы измерения давления.
- 2 Провести сравнительный анализ.

**Краткие теоретические сведения:**

**Единицы измерения давления.** В системе СИ единицей измерения давления является Паскаль.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{H}{m^2} = \text{Па}$$

Давление в один Паскаль равно силе равномерно распределённой по поверхности площадью один кв. м. Иногда в качестве технической единицы измерения применяют единицу называемую атмосферой, обозначается 1 атм. Одна атмосфера это давление, которое оказывает столб воды высотой 1 м на площадку 1 см<sup>2</sup> при температуре +4°C. В промышленности применяются другая единица давления – **торр** (физик Торричелли). Идеальное давление атмосферы Земли, равное 760 торр, называется **технической атмосферой**.

- 1 бар = 10<sup>5</sup> Па;
- 1 мм вод. ст. = 9,80665 Па ≈ 9,8 Па;
- 1 мм рт. ст. = 133,322 Па ≈ 133,3 Па;
- 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98 066,5 Па;

1 атм = 101,325 Па.

1 атм = 760 торр

В США применяется psi: 1 psi =  $6,89 \cdot 10^3$  Па = 0,0703 атм.

При измерении давления нас м. интересовать абсолютное (полное), избыточное и вакуумметрическое (давление разрежение) давления.

Можно различать абсолютное давление его измеряют по отношению к нулевому давлению, и относительное давление, которое измеряют относительно давления окружающей среды.

**Абсолютное давление** - это сумма избыточного или манометрического давления и атмосферного. Абсолютное давление – это сумма действующего на нас давления воды и атмосферы. Давление на поверхности Земли обычно называется атмосферным давлением. Абсолютное давление необходимо знать в тех случаях, когда влияние атмосферного давления исключить нельзя. При контроле технологических процессов и при проведении научных исследований в большинстве случаев приходится иметь дело с измерением избыточного и вакуумметрического давлений, а также с измерением разности давлений (дифманометр).

$$P = P_a + P_{и}$$

P – полное давление;

$P_a$  – атмосферное давление;

$P_{и}$  – избыточное давление – это давление газа, превышающее давление окружающей среды.

$$P_v = P_a - P.$$

По измеряемому давлению приборы подразделяются:

1. Барометр – приборы для измерения атмосферного давления;
2. Манометры – приборы для измерения избыточного давления; Избыточное давление – в трубопроводах, в закрытых емкостях.
3. Дифманометры – приборы для измерения разности давлений;
4. Вакуумметры – приборы для измерения давления ниже  $P_a$ . Вакуум – это давление ниже атмосферного.
5. Мановакуумметры – приборы для измерения небольших давлений и разрежения.

### **Методы и средства измерения давления**

Методы измерения давления во многом определяют как принципы действия, так и конструктивные особенности средств измерений.

Давление, исходя из самых общих позиций, может быть определено как путем его непосредственного измерения, так и посредством измерения другой физической величины, функционально связанной с измеряемым давлением.

В первом случае измеряемое давление воздействует непосредственно на чувствительный элемент прибора, который передает информацию о значении давления последующим звеньям измерительной цепи, преобразующим ее в требуемую форму. Этот метод определения давления является методом прямых измерений и получил наибольшее распространение в технике измерения давления. На нем основаны принципы действия большинства манометров и измерительных преобразователей давления.

Во втором случае непосредственно измеряются другие физические величины или параметры, характеризующие физические свойства измеряемой среды, значения которых закономерно связаны с давлением (температура кипения жидкости, скорость распространения ультразвука, теплопроводность газа и т. д.). Этот метод является методом косвенных измерений давления и применяется, как правило, в тех случаях, когда прямой

метод по тем или иным причинам неприменим, например, при измерении сверхнизкого давления (вакуумная техника) или при измерении высоких и сверхвысоких давлений.

Относительный метод измерений, в отличие от абсолютного, основан на предварительном исследовании зависимости от давления физических свойств и параметров чувствительных элементов средств измерения давления при методах прямых, измерений или других физических величин и свойств измеряемой среды — при методах косвенных измерений. На пример, деформационные манометры перед их применением для измерения давления должны быть сначала отградуированы по образцовым средствам измерений соответствующей точности.

Помимо классификации по основным методам измерений давлений и видам давления, средства измерений давления классифицируют по:

- принципу действия,
- функциональному назначению,
- диапазону и точности измерений.

**Порядок выполнения работы:**

- 1 Подготовить установку к работе.
- 2 Включить питание.
- 3 Провести снятие показаний с датчиков в нескольких точках диапазона.
- 4 Провести сравнительный анализ показаний.

**Форма представления результата:**

Отчет по лабораторной работе

**Лабораторная работа № 6**

Анализ работы бесконтактного датчика – выключателя

**Цель работы:** изучение принципа действия бесконтактного датчика – выключателя

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы бесконтактного датчика – выключателя

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить бесконтактный датчик – выключатель.
2. Снять характеристику бесконтактного датчика – выключателя.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради.

## **Лабораторная работа № 7**

Анализ работы аналогового датчика положения

**Цель работы:** изучение принципа действия аналогового датчика положения.

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы аналогового датчика положения

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить аналоговый датчик положения.
2. Снять характеристику аналогового датчика положения.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради

## **Лабораторная работа № 8**

*Анализ работы триггеров*

**Цель работы:** изучение принципа действия триггеров.

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы RS-триггера

**Краткие теоретические сведения:**

Основным устройством, которое способно запомнить цифровую информацию, является триггер. Триггер — это устройство, которое имеет два устойчивых состояния, одно из которых принимается за «1», а другое — за «0».

В цифровых схемах для автоматики наибольшее распространение получили полупроводниковые триггеры, выпускаемые в виде интегральных микросхем. Такие триггеры, как правило, являются двухкаскадными усилителями постоянного тока с положительной обратной связью (выход усилителя соединен с его входом).

Схема простейшего статического триггера имеет следующий вид:

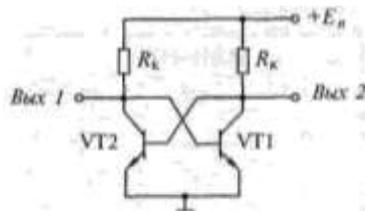


Рис. 27.7. Статический триггер

Из двух транзисторов один обязательно открыт, а другой закрыт.

Если закрыт VT1, то положительный потенциал с его коллектора подается на базу VT2, и наоборот. Соединение коллектора одного транзистора с базой другого и обеспечивает положительную обратную связь. Несмотря на полную симметрию схемы, такое ее состояние, когда оба транзистора открыты, является неустойчивым и практически невозможным. Даже незначительное случайное увеличение коллекторного тока одного транзистора приведет к уменьшению положительного потенциала на его коллекторе и соответственно на базе другого транзистора. Это приводит к уменьшению коллекторного тока другого транзистора, увеличению потенциала на его коллекторе и соответственно на базе первого транзистора. В итоге первый транзистор еще больше открывается, а второй — еще больше закрывается. Этот процесс протекает очень быстро, лавинообразно и заканчивается тогда, когда первый транзистор полностью откроется (режим насыщения), а второй транзистор полностью закроется, поскольку на его базу будет подан практически нулевой потенциал. Перевод триггера из одного устойчивого состояния в другое осуществляется подачей положительных или отрицательных импульсов на коллекторы одного или другого транзистора. При этом один из входов принимают устанавливающим триггер в состояние «1» и называют вход S (от английского set — установить), а другой, устанавливающий (сбрасывающий) триггер в состояние «0», называют входом R (от английского reset — сбросить). Такой триггер называют RS-триггером.

Условное обозначение RS-триггера следующее:

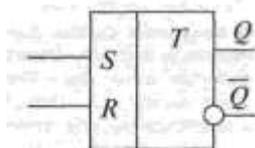


Рис. 27.8. Условное обозначение триггера

В сериях микросхем RS-триггеры обычно построены на двух базовых логических элементах, тех, на которых основана вся серия (ИЛИ-НЕ либо И-НЕ). Такие триггеры имеют следующий вид:

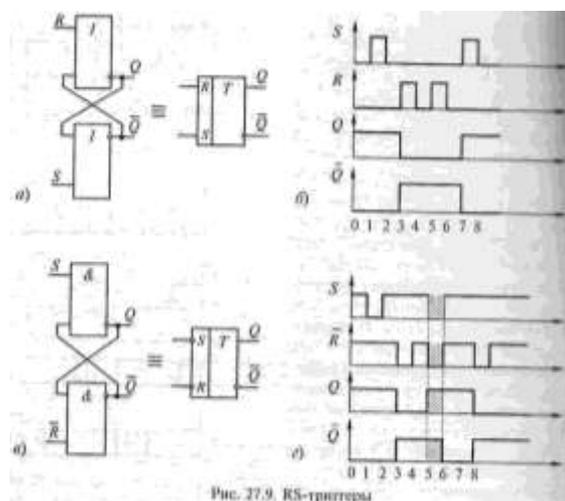


Рис. 27.9. RS-триггеры

При поступлении сигнала «1» на вход S триггер переключится в состояние «1», если он был в состоянии «0», или сохраняет «1» на выходе Q, если он уже находился в этом состоянии. Соответственно при поступлении «1» на вход R триггер переключится в «0» или сохранит это состояние. Исходное состояние триггера (сразу после включения и при отсутствии сигналов «1» на входах S и R) не определено, оно является случайной величиной. В отличие от схемы а в схеме в используется отрицательная логика, т. е. «1» имеет менее положительный потенциал, чем «0».

По способу записи информации различают асинхронные и синхронные триггеры. Состояние (выходной сигнал) асинхронного триггера может измениться в любой момент — тогда, когда придет входной сигнал. В синхронном триггере состояние может меняться только в определенные моменты времени — тогда, когда поступает дополнительный синхронизирующий сигнал. RS-триггер является асинхронным. На его базе может быть построен синхронный D-триггер:

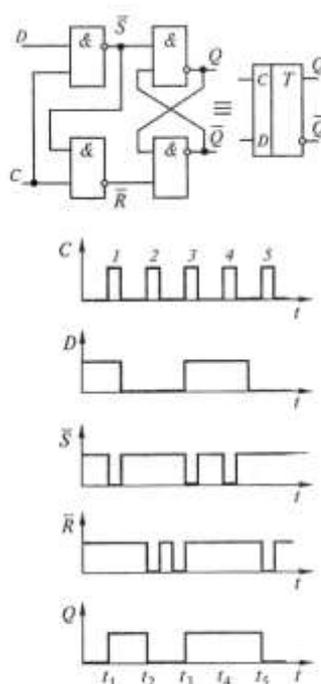


Рис. 27.10. Синхронный D-триггер

Сигналы, предназначенные для записи в триггер, поступают на информационный вход D. Сигналы, определяющие момент записи, поступают на вход C. Изменение состояния статического D-триггера возможно только в течение того времени, когда  $C = 1$ . Если же на вход C поступает сигнал «0», то изменение сигнала на выходе триггера не происходит, он сохраняет предыдущее состояние. На диаграмме видно, что по окончании первого синхроимпульса на информационный вход D поступал уже сигнал «0», а не «1». Однако состояние триггера, соответствующее этому сигналу, возникло только тогда, когда пришел второй синхроимпульс. Аналогичным образом состояние «1» на выходе Q сохранялось от третьего до пятого синхроимпульса, хотя сигнал «1» на входе D сменился сигналом «0» еще раньше, чем пришел синхроимпульс 5. Поскольку такой триггер задерживает выходной сигнал до прихода очередного синхроимпульса, он и получил свое название D-триггер (от английского delay — задержка).

В динамическом синхронном D-триггере информация записывается только в момент перепада напряжения на входе C, т. е. передним фронтом синхроимпульса.

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить RS - триггер.
2. Снять характеристику RS - триггер

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради.

**Лабораторная работа № 9**

Анализ работы регистров

**Цель работы:** изучение принципа действия регистров.

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы регистров

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить регистры.
2. Снять характеристику регистров.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради

**Практическое занятие № 3**

*Расчет автоматического потенциометра КСП*

**Цель работы:**

- изучить принцип работы автоматического потенциометра КСП;
- научиться рассчитывать измерительную схему электронного автоматического потенциометра

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

**Задание:**

1. Изучить схему автоматического потенциометра
2. Рассчитать измерительную схему КСП

**Краткие теоретические сведения:**

Автоматические мосты. Мосты с автоматизированным процессом уравнивания называются автоматическими мостами; они находят широкое применение для непрерывных показаний и регистрации измеряемых величин. Автоматические мосты с дополнительным регулирующим устройством применяются для автоматического управления производственными процессами. В настоящее время широко распространены автоматические мосты для измерения, регистрации и регулирования температуры различных объектов. В качестве измерительного преобразователя температуры в электрическое сопротивление в этих мостах применяются термометры сопротивления.

В автоматических потенциометрах используется компенсационная мостовая измерительная схема. Напряжение, компенсирующее измеряемую термо-ЭДС термоэлектрического термометра - термопары, в этой измерительной схеме получается как разность потенциалов в двух точках. Потенциал одной из этих точек определяется положением движка реохорда, а потенциал другой зависит от температуры свободных концов термометра. Это дает возможность осуществлять автоматическое введение поправки на изменение термо-ЭДС термопары, вызванное отклонением температуры свободных концов ее от  $0^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения потенциометром постоянного тока ЭДС  $E_x$  необходимо установить рабочий ток и подобрать такие значения сопротивлений на декадах потенциометра, при которых гальванометр отметит отсутствие тока, т. е. осуществить компенсацию  $E_x$ . Процессы установки рабочего тока и компенсации  $E_x$  могут быть автоматизированы, что упрощает пользование прибором, ускоряет процесс измерения  $E_x$  и, позволяет непрерывно регистрировать значение

измеряемой величины. Потенциометры постоянного тока, у которых установка рабочего тока и процесс компенсации  $E_x$  производятся автоматически, называются *автоматическими потенциометрами постоянного тока*.

Автоматические потенциометры применяются для измерения электрических и неэлектрических величин, которые могут быть предварительно преобразованы в напряжение или ЭДС постоянного тока.

Процесс уравнивания в автоматических потенциометрах может осуществляться как непрерывно (потенциометры со следящей системой уравнивания), так и периодически (потенциометры с разvertyвающим уравниванием или динамической компенсацией). Чаще всего применяются потенциометры с непрерывным уравниванием. Они в свою очередь могут быть разделены на две группы: потенциометры с полным уравниванием, или с астатической характеристикой, и потенциометры с неполным уравниванием, или со статической характеристикой.

В настоящее время выпускаются автоматические потенциометры с полным уравниванием различных типов и форм записи. Запись измеряемой величины производится на дисковой диаграмме или на диаграммной ленте.

Автоматические потенциометры переменного тока. Автоматические потенциометры переменного тока в работе значительно удобнее потенциометров с ручным уравниванием, и область их применения более широкая, так как они позволяют производить непрерывные точные измерения  $U_x$ . Автоматические потенциометры, как и ручные, могут быть полярно-координатными и прямоугольно-координатными.

### **Методика расчета измерительной схемы электронного автоматического моста**

Термометр сопротивления (его сопротивление  $R_t$ ) включается в измерительную мостовую схему автоматического уравновешенного моста по трехпроводной схеме включения (см. рис.1). Это делается для того, чтобы можно было компенсировать влияние изменения сопротивления соединительных проводов на точность измерения температуры теплового объекта при отклонениях температуры окружающей соединительные провода среды. В измерительную схему моста кроме сопротивления  $R_t$  входят:

$R_L$  - сопротивление соединительных проводов и подгоночных катушек равно обычно для одной линии - 2,5 Ом;

$R_D$  - сопротивление, определяющее начало шкалы (имеющее подгоночное сопротивление в виде спирали  $r_d$ , являющееся частью сопротивления  $R_D$ ), его выбирают согласно паспортным данным электронных автоматических мостов равным 3,7-5,5 Ом;

$R_1, R_2, R_3$  - расчетные резистивные сопротивления;

$R_B$  - балластное сопротивление в цепи источника питания, которое служит для ограничения тока в плечах измерительной схемы;

В схеме измерения имеется также реохорд, который с помощью своего подвижного контакта, связанного с ротором реверсивного двигателя, делится на две части, одна из которых  $R_{1p}$  относится к левой части реохорда, а другая  $R_{2p}$  - к правой его части. Вместе обе части реохорда составляют его полное сопротивление  $R_p = R_{1p} + R_{2p}$ . Параллельно реохорду включаются два резистивных сопротивления — сопротивление шунта  $R_{ш}$  и сопротивление  $R_n$ , определяющее верхний предел изменения сопротивления датчика температуры (или шкалы прибора). Эквивалентное сопротивление для двух указанных сопротивлений будем обозначать  $R_{шп}$ . Оно будет равно:

$R_{шп} = R_{ш} \cdot R_n / (R_{ш} + R_n)$ . Совместно сопротивления  $R_{шп}$ ,  $R_{1p}$  и  $R_{2p}$  оказываются включенными по отношению к внешним выводам по схеме треугольника.

Для расчета режимов измерения работы мостовой схемы такое включение указанных трех сопротивлений является неудобным. Поэтому целесообразно от реальной схемы включения этих сопротивлений перейти к эквивалентной расчетной схеме их включения «звездой», в которой будут фигурировать сопротивления: с левой стороны  $R_{1пр}$ , с правой стороны  $R_{2пр}$  и в ветви, относящейся к сопротивлению измерительной диагонали моста (дополнительному сопротивлению нагрузки),  $R_d$

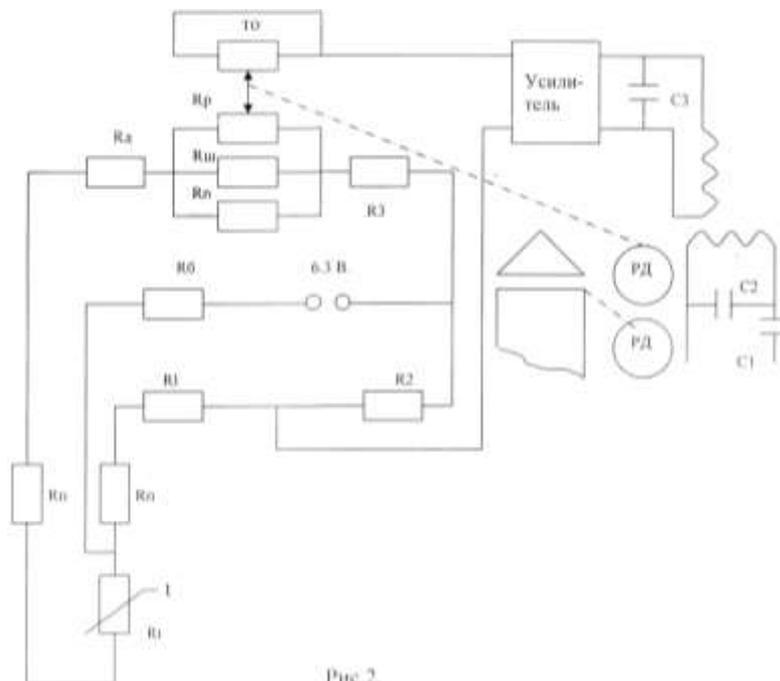


Рис 2. Схема автоматического моста

Принимаем для расчета

$$R_L = 2,5 \text{ Ом}$$

$$R_D = 4,3 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_3 = 300 \text{ Ом}$$

$$R_B = 450 \text{ Ом}$$

По градуировочной таблице определяем

$$R_{t_{max}} = 68,81 \text{ Ом}; \quad R_{t_{min}} = 53 \text{ Ом};$$

Определяем  $R_{np}$ ,  $R_I$ ,  $R_{II}$ ;

$$R_{III} = \frac{0,5 \cdot (-A) + \sqrt{A^2 + B}}{1 - \lambda}$$

где  $A = (R_{t_{\min}} + (R_{JI} + R_{JD} + R_3) \cdot (1 - 2 \cdot \lambda)) - (R_{t_{\min}} + R_{t_{\max}}) \cdot \lambda$

$$A = (53 + (2,5 + 4,3 + 300) \cdot (1 - 2 \cdot 0,032)) - (57,52 + 68,81) \cdot 0,032 = 375,25$$

$$B = 4 \cdot (R_{t_{\max}} - R_{t_{\min}}) \cdot R_3 \cdot (1 - 2 \cdot \lambda)$$

$$R_{III} = \frac{0,5 \cdot (-375,25 + \sqrt{375,25^2 + 177577})}{1 - 0,032} = 100,96$$

$$R_I = \frac{(R_{I_{\min}} + R_{JI} + R_{JD} + R_{III} \cdot (1 - \lambda)) \cdot R_2}{R_{III} \cdot \lambda + R_3} - R_{JI}$$

$$R_I = \frac{(53 + 2,5 + 4,3 + 100,96 \cdot (1 - 0,032)) \cdot 300}{100,96 \cdot 0,032 + 300} - 2,5 = 153,35 \text{ OM}$$

$$R_{II} = \frac{R_{PI} \cdot R_{III}}{R_{PI} + R_{III}}$$

$$R_{II} = \frac{90 \cdot 100,96}{90 + 100,96} = 47,58 \text{ OM}$$

Определяем  $U_{II}$

$$U_{II} = \frac{U_0}{1 + \frac{R_5}{R_{JI} + R_I + R_2} + \frac{R_5}{R_{JI} + R_{JD} + R_{I_{\min}} + R_{III} + R_3}}$$

$$U_{II} = \frac{6,3}{1 + \frac{450}{2,5 + 153,35 + 300} + \frac{450}{2,5 + 4,3 + 53 + 100,96 + 300}} = 2,12 \text{ B}$$

Затем находим соответствующее значение тока в цепи реохорда при  $R_t = R_{t_{\min}}$

$$I_{R_{\min}} = \frac{U_0}{R_3 + R_{III} + R_{JD} + R_{JI} + R_{I_{\min}}}$$

$$I_{R_{\min}} = \frac{2,12}{300 + 100,96 + 4,3 + 2,5 + 53} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$4,5 \cdot 10^{-3} \leq 5 \dots 7 \cdot 10^{-3}$$

Неравенство выполняется. Аналогично находим значение тока в цепи включения реохорда при  $R_t = R_{t_{\max}}$

$$U_{II} = \frac{U_0}{1 + \frac{R_5}{R_{JI} + R_I + R_2} + \frac{R_5}{R_{JI} + R_{JD} + R_{I_{\max}} + R_{III} + R_3}}$$

$$U_{II} = \frac{6.3}{1 + \frac{450}{2.5 + 153.35 + 300} + \frac{450}{2.5 + 4.3 + 68.81 + 100.96 + 300}} = 2.18B$$

$$I_{R_{\max}} = \frac{U_{II}}{R_3 + R_{III} + R_{II} + R_{II} + R_{I_{\max}}}$$

$$I_{R_{\max}} = \frac{2.18}{300 + 100.96 + 4.3 + 2.5 + 68.81} = 4.5 \cdot 10^{-3} A$$

Определяем отношение токов при  $R_t = R_{t_{\max}}$  к  $R_t = R_{t_{\min}}$ :

$$\frac{I_{R_{\max}}}{I_{R_{\min}}} = \frac{4.5 \cdot 10^{-3}}{4.6 \cdot 10^{-3}} = 0.98$$

Сравниваем это значение с предельно допустимым равным 0,8 ... 0,9. Расчетное значение должно быть больше. В нашем случае условие выполняется, поэтому можно полученные расчетные значения считать найденными. Остается для порядка проверить градуировку шкалы, например при 20, 40, 60, 80 градусах. Для этого рассчитываются значения  $U_{\text{вых}}$  при указанных значениях температуры, определив предварительно  $R_t$  по градуировочной таблице. Далее строится график функции  $U_{\text{вых}} = f(R_t)$ . Далее определяем динамические параметры:  $K1_{cc}$ ,  $K_{oc}$ ,  $K2_{cc}$ .

$$K_{OC} = -R_{III} \cdot (1 - 2 \cdot \lambda)$$

$$K_{OC} = -100,96 \cdot (1 - 2 \cdot 0,032) = -94,49 \text{ Ом}$$

$$K2_{OC} = \frac{U_{II}}{R_{II} + R_{II} + R_{I_{\min}} + R_{III} + R_3}$$

$$K2_{OC} = \frac{2.12}{2.5 + 4.3 + 53 + 18.3 + 300} = 5.5 \cdot 10^{-3} A$$

Для вычисления коэффициента  $K1_{cc}$  необходимо определить  $\Delta U_{\text{вых}}$  и  $\Delta R$ . Выберем температуру +20 и +40°C, тогда

$$U_{\text{вых}20} = 0,255B; U_{\text{вых}40} = 0,175B; R_{t20} = 57,52 \text{ Ом}; R_{t40} = 62,03 \text{ Ом}$$

Исходя из этого получим:

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}40} - U_{\text{вых}20} = 0,175 - 0,255 = -0,08 \text{ В}$$

$$\Delta R_t = R_{t40} - R_{t20} = 62,03 - 57,52 = 4,51 \text{ Ом}$$

Следовательно, будем иметь:

$$K1_{cc} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta R}$$

$$K1_{cc} = \frac{-0.08}{4.51} = -0.018A$$

### Порядок выполнения работы:

1 Изучить принцип действия потенциометра КСП.

2 Рассчитать по приведенной методике КСП.

**Форма представления результата:**

Отчет о проделанной работе

**Практическое занятие № 4**  
**Расчет и выбор сужающего устройства**

**Цель работы:** научиться рассчитывать и выбирать сужающее устройство

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- рассчитывать параметры типовых схем и устройств;
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

**Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

**Задание:**

1. Выполнить расчет сужающего устройства в соответствии с “Правилами измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД–50–231–80”.

**Краткие теоретические сведения:**

Одним из наиболее распространенных средств измерений расхода жидкостей и газов (паров), протекающих по трубопроводам, являются расходомеры переменного перепада давления, состоящие из стандартного сужающего устройства, дифманометра, приборов для измерения параметров среды и соединительных линий. В комплект расходомерного устройства также входят прямые участки трубопроводов до и после сужающего устройства с местными сопротивлениями.

Сужающее устройство расходомера является первичным измерительным преобразователем расхода, в котором в результате сужения сечения потока измеряемой среды (жидкости, газа, пара) образуется перепад (разность) давления, зависящий от расхода. В качестве стандартных (нормализованных) сужающих устройств применяются измерительные диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы - Вентури. В качестве измерительных приборов применяются различные дифференциальные манометры, рассмотренные в главе VII, снабженные показывающими, записывающими, интегрирующими, сигнализирующими и другими устройствами, обеспечивающими выдачу измерительной информации о расходе в соответствующей форме и виде.

Измерительная диафрагма представляет собой диск, установленный так, что центр его лежит на оси трубопровода (рис. VIII.1). При протекании потока жидкости или газа (пара) в трубопроводе с диафрагмой сужение его начинается до диафрагмы. На некотором расстоянии за ней под действием сил инерции поток сужается до минимального сечения, а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и после нее образуются зоны завихрения. Давление струи около стенки вначале возрастает из-за подпора перед диафрагмой. За диафрагмой оно снижается до минимума, затем снова повышается, но не достигает прежнего значения, так как вследствие трения и завихрений происходит потеря давления  $p_{пот}$ .

Таким образом, часть потенциальной энергии давления потока переходит в кинетическую. В результате средняя скорость потока в суженном сечении повышается, а статическое давление в этом сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность этих давлений (перепад давления) служит мерой расхода

протекающей через сужающее устройство жидкости, газа или пара.

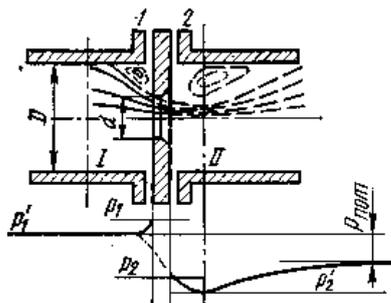


Рис. VIII.1. Схема распределения статического давления в потоке при установке в трубопроводе сужающего устройства — диафрагмы

Из рис. VIII.1 видно, что давление по оси трубопровода, показанное штрихпунктирной линией, несколько отличается от давления вдоль стенки трубопровода только в средней части графика. Через отверстия 1 и 2 производится измерение статических давлений до и после сужающего устройства.

## Расчет специального сужающего устройства

### 2.1. Выбор специального сужающего устройства.

2.1.1. При выборе специального сужающего устройства необходимо руководствоваться следующими соображениями:

при одних и тех же значениях величин  $m$  и  $Dr$  сопла позволяют измерять больший расход, чем диафрагмы;

при одних и тех же значениях величин  $m$  и  $Q$  потеря давления в соплах меньше, чем в диафрагмах;

диафрагмы с входным конусом, сопла «четверть круга», двойные диафрагмы, цилиндрические сопла рекомендуются для измерения расхода веществ при малых числах Рейнольдса, что имеет практическое значение в случаях установки сужающих устройств в трубопроводах малого диаметра, вязких жидкостей и горячих газов;

при измерении расхода загрязненных жидкостей и газов\*, а также жидкостей\*\*, из которых могут выделяться газы, необходимо использовать сегментные диафрагмы;

\* Для газов содержание жидкой фазы должно быть в количестве  $\eta \leq 0,4 \rho / \rho_{\text{п}}$  или твердой фазы в количестве  $\eta \leq \rho / \rho_{\text{п}}$ .

\*\* Для жидкостей, содержащих газовую фазу, измерение расхода возможно при  $D \rho / \rho \leq D 0,04 + 4,8 m^{6,4}$ .

износоустойчивые диафрагмы рекомендуется применять взамен стандартных диафрагм. Это вызвано тем, что стандартные диафрагмы обладают существенным недостатком: в процессе эксплуатации их острая входная кромка неизбежно притупляется под влиянием абразивного действия потока, что приводит к значительным погрешностям при измерении расхода. Напротив, износоустойчивые диафрагмы сохраняют свой профиль при длительной эксплуатации, что увеличивает срок ее службы;

стандартные диафрагмы для трубопроводов с внутренним диаметром менее 50 мм рекомендуются для измерения малых расходов газов (менее  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и малых расходов жидкостей (менее  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), обладающих кинематической вязкостью менее  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### 2.2. Методика расчета сужающего устройства для измерения расхода газа.

2.2.1. При расчете сужающего устройства для измерения расхода газа необходимы следующие исходные данные: наибольший расход газа  $Q_{\text{max}}$ ; наименьший расход газа  $Q_{\text{min}}$  (рекомендуется  $Q_{\text{min}}$  не менее  $\frac{1}{3} Q_{\text{max}}$ ); компонентный состав газа; температура газа; избыточное давление газа; барометрическое давление окружающей среды; допустимая

потеря давления на сужающем устройстве при максимальном расходе газа  $p'_{пд}$  диаметр трубопровода  $D_{20}$  материал трубопровода и сужающего устройства.

2.2.2. Определяют недостающие для расчета данные  $p$ ;  $D$ ;  $\mu$  или  $\nu$ ;  $\chi$ ;  $K$ ;  $\rho_{ном}$ ,  $\rho$ . Значения  $K$  (а для расхода газа в рабочем состоянии также  $\rho_{ном}$ ) не требуются, если значения  $\rho$  заданы. При применении разделительных сосудов определяют, кроме того,  $\rho_{рс}$ ,  $\rho_c$ .

2.2.3. Выбирают разновидность дифманометра. Требуемую разновидность дифманометра устанавливают в зависимости от наличия у него необходимых устройств для отсчета и передачи показаний, интегрирования, автоматической коррекции, сигнализации, регулирования и др.

Верхний предел измерений дифманометра  $Q_{п}$  ( $Q_{оп}$ ,  $Q_{мп}$ ,  $Q_{ном п}$ ) выбирают по заданному наибольшему измеряемому расходу ( $Q_{о max}$ ,  $Q_{м max}$ ,  $Q_{ном max}$ ) так, чтобы стандартное значение  $Q_{п}$ , взятое из стандартного ряда (см. разд. 1 ГОСТ 18140-77), было ближайшее к  $Q_{max}$  и не менее его.

2.2.4. Определяют предельный номинальный перепад давления дифманометра. Предельный номинальный перепад давления  $\Delta c_{н}^0$  следует выбирать из ряда значений, указанных в разд. 1 ГОСТ 18140-77. При этом необходимо исходить из следующего: чем больше перепад, тем меньшая относительная площадь ( $m$ ) сужающего устройства требуется для измерения заданного расхода.

При измерении расхода газа желательно, чтобы отношение  $\Delta c_{н}^0 / \rho$  было наименьшим.

2.2.4.1. Если задана допустимая потеря давления  $p'_{пд}$  сужающем устройстве при наибольшем измеряемом расходе  $Q_{max}$  то допустимую потерю давления  $p_{пд}$  определяют при расходе, равном  $Q_{п}$

$$p_{пд} = p'_{пд} \left( \frac{Q_{п}}{Q_{max}} \right)^2. \quad (2.1)$$

Подсчитывают (с четырьмя значащими цифрами) вспомогательную величину  $c$ , которая в зависимости от единицы измерения расхода равна

$$c = \frac{Q_{ном п}}{D^2} \sqrt{\frac{\rho_{ном} \cdot T \cdot K \cdot \rho_{ном}}{T_{ном} \cdot \rho}} \cdot \frac{4}{\sqrt{2\pi}}; \quad (2.2)$$

$$c = \frac{Q_{ном п} \rho_{ном}}{D^2 \sqrt{\rho}} \cdot \frac{4}{\sqrt{2\pi}}; \quad (2.3)$$

$$c = \frac{Q_{оп} \sqrt{\rho}}{D^2} \cdot \frac{4}{\sqrt{2\pi}}; \quad (2.4)$$

$$c = \frac{Q_{мп}}{D^2 \sqrt{\rho}} \cdot \frac{4}{\sqrt{2\pi}}. \quad (2.5)$$

Из стандартного ряда чисел (см. разд. 1 ГОСТ 18140-77) выбирают величину  $\Delta c_{н}^0$ , которая при подстановке в формулу

$$m \alpha = \frac{c}{\sqrt{\Delta c_{н}^0}} \quad (2.6)$$

обеспечивает допустимое значение  $m \alpha$  для рассчитываемого типа сужающего устройства. По формулам приложения 2 и данным приложений 3 и 4 РД 50-411-83 определяют для найденной величины  $m \alpha$  приближенное значение  $m$ . Из рис. 11 для полученной величины  $m$ , определяют относительную потерю давления ( $\Pi$ ). Затем проверяют выполнение неравенства

$$\frac{p_{пд}}{\Pi} \geq \Delta c_{н}^0. \quad (2.7)$$

Если неравенство выполняется, то величину  $\Delta c_{н}^0$  считают предельным номинальным перепадом давления. В противном случае, из стандартного ряда выбирают следующее

меньшее значение ( $\Delta p_H^0$ ) и для него определяют в той же последовательности новые величины  $m$ ;  $t$ ;  $\Pi$  и проверяют выполнение неравенства (2.7). Если неравенство не выполняется, то подбор величины  $\Delta p_H^0$  продолжают.

2.2.4.2. Если допустимая потеря давления в сужающем устройстве не задана, то по формулам (2.2)-(2.5) определяют вспомогательную величину  $c$ . За значение предельного номинального перепада давления принимают величину  $\Delta p_H^0$  из стандартного ряда (см. разд. 1 ГОСТ 18140-77), которая при подстановке в формулу (2.6) обеспечивает допустимое значение  $m$  (см. приложения 2-4 РД 50-411-83). По формулам приложения 2 и данным приложений 3 и 4 РД 50-411-83 определяют для найденной величины  $m$  приближенное значение  $t$ .

2.2.5. Определяют числа Рейнольдса  $Re_{min}$ ,  $Re_{max}$  (см. п. 4.7 РД 50-411-83), соответствующие наименьшему и наибольшему расходам ( $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ). Если значения  $Re_{min}$  и  $Re_{max}$  лежат вне области постоянства коэффициента расхода  $\alpha$  для данной величины  $m$  (см. п. 3.1 РД 50-411-83), то при принятых параметрах расходомера измерение данным методом невозможно. В этом случае желательно изменить  $\Delta p_H^0$ , а следовательно  $m$ , так, чтобы соблюдались следующие соотношения:

$$\left. \begin{array}{l} Re_{max} \leq Re_{max} \\ Re_{min} \leq Re_{min} \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

Если и в этом случае неравенства не будут выполняться, то необходимо перейти к другому типу сужающего устройства или изменить диаметр трубопровода.

2.2.6. Проверяют соблюдение требований п. 8.4 РД 50-411-83 при данном значении  $m$ .

2.2.7. Определяют (с четырьмя значащими цифрами) наибольший перепад давления  $Dp_{max}$  в сужающем устройстве по формулам, приведенным в п. 4.2.2 РД 50-411-83, в которых вместо  $Dp_H$  должно быть  $\Delta p_H^0$ .

2.2.8. Вычисляют отношение  $Dp_{max}/p$  и проверяют выполнение условий п. 1.5 РД 50-411-83.

2.2.9. Подсчитывают отношение  $Dp_{cp}/p$  по следующей зависимости:

$$\frac{\Delta p_{cp}}{\rho} = \frac{\Delta p_{max}}{\rho} \left( \frac{Q_{cp}}{Q_{\Pi}} \right)^2 \quad (2.9)$$

В этом случае для всех значений  $Q \neq Q_{cp}$  возникает дополнительная погрешность, обусловленная отклонением действительных значений множителя  $\varepsilon$  от его расчетного среднего значения (см. п. 4.5.2 РД 50-411-83).

2.2.10. Учитывая ранее найденные приближенные значения  $m$  и  $Dp_{cp}/p$ , определяют поправочный множитель  $(\varepsilon_{cp})_1$  (см. п. 4.5.2 РД 50-411-83).

2.2.11. Вычисляют (с четырьмя значащими цифрами) вспомогательную величину

$$m_1 \alpha_1 = \frac{c}{(\varepsilon_{cp})_1 \sqrt{\Delta p_{max}}} \quad (2.10)$$

Для полученного значения  $m_1 \alpha_1$  по формулам приложения 2 и данным приложения 3, 4 РД 50-411-83 находят (с четырьмя значащими цифрами)  $m_1$ .

2.2.12. Определяют множитель  $(\varepsilon_{cp})_2$ , соответствующий величине  $m_1$  при том же отношении  $Dp_{cp}/p$ . Если разность значений  $(\varepsilon_{cp})_2$   $(\varepsilon_{cp})_1$  не превышает 0,001, то значения  $m_1$  и  $(\varepsilon_{cp})_2$  считают окончательными. В противном случае определяют величину

$$m_2 \alpha_2 = \frac{c}{(\varepsilon_{cp})_2 \sqrt{\Delta p_{max}}} \quad (2.11)$$

а по ней величину  $m_2$  и соответствующее ей значение  $(\varepsilon_{cp})_3$ , которое и является окончательным.

2.2.13. Подсчитывают (с четырьмя значащими цифрами) вспомогательную величину

$$d_{20} = \frac{D}{k_t} \sqrt{m} \quad (2.12)$$

и  $d$  по формуле  $d = d_{20} [1 + \alpha_t (t - 20)] = d_{20} K_t$ ,

2.2.14. Проверяют правильность выполненного расчета, для чего определяют коэффициент расхода  $\alpha$  для значений  $d$  и  $m$  (см. п. 3.2 РД 50-411-83). По одной из формул разд. 2 РД 50-411-83 вычисляют (с четырьмя значащими цифрами) расход  $Q$ , соответствующий наибольшему перепаду давления  $Dp_{\max}$ . Найденное значение расхода не должно отличаться от верхнего предела измерения более чем на  $\pm 0,2\%$ .

2.3. Методика расчета сужающего устройства для измерения расхода жидкости.

2.3.1. При расчете сужающего устройства для измерения расхода жидкости необходимо иметь следующие исходные данные:  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$ ,  $t$ ,  $D_{20}$ ,  $\rho_{\text{и}}$ ,  $\rho_{\text{б}}$ ,  $\rho'_{\text{пл}}$ , а также знать материал сужающего устройства и трубопровода.

2.3.2. Определяют недостающие для расчета данные:  $p$ ;  $D$ ;  $\rho$ ;  $\mu$  или  $\nu$ .

2.3.3. Выбирают тип и разновидность дифманометра, его верхний предел измерений  $Q_{\text{п}}$  (п. 2.2.3).

2.3.4. Для поплавковых дифманометров определяют  $\rho'_y$ ,  $\rho'$ ,  $\rho_y$ . При применении разделительных сосудов определяют также  $\rho_c$  и  $\rho_{\text{рс}}$ .

2.3.5. Определяют предельный номинальный перепад давлений дифманометра и приближенное значение  $m$  (п. 2.2.4).

2.3.6. Проверяют выполнение условия п. 2.2.5.

2.3.7. Проверяют соблюдение требований п. 8.4 РД 50-411-83

2.3.8. Определяют (с четырьмя значащими цифрами)  $Dp_{\max}$  по формулам, приведенным в п. 4.2 РД 50-411-83, в которых вместо  $Dp_{\text{п}}$  должно быть  $\Delta p_{\text{н}}^0$ . Проверяют выполнение условий п. 1.6 РД 50-411-83.

2.3.9. Определяют (с четырьмя значащими цифрами) вспомогательную величину

$$m\alpha = \frac{c}{\sqrt{\Delta p_{\max}}}, \quad (2.13)$$

где

$$c = \frac{4Q_{\text{оп}} \sqrt{\rho}}{\pi D^2 \sqrt{2}} \quad \text{или} \quad c = \frac{4Q_{\text{мп}}}{\sqrt{2} D^2 \sqrt{\rho \pi}}$$

2.3.10. Для данных значений  $D$  и  $m\alpha$  по формулам приложения 2 и данным приложений 3, 4 РД 50-411-83 находят искомое значение  $m$ .

2.3.11. Подсчитывают  $d_{20}$  (то же, что в п. 2.2.13).

2.3.12. Проверяют правильность выполнения расчета (то же, что в п. 2.2.14). При этом необходимо учесть, что  $\varepsilon = 1,0$ .

#### Порядок выполнения работы:

- 1 Изучить назначение и конструкцию сужающего устройства (СУ).
- 2 Выбрать СУ по приведенной методике.

#### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания.

### Практическое занятие № 5

#### Изучение обозначения элементов средств автоматизации

#### Цель работы:

- 1 Изучить обозначение КИПиА в функциональных схемах.
- 2 Научиться использовать обозначения в функциональных схемах САР

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- применять Общероссийский классификатор продукции (ОКП);
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

**Материальное обеспечение:**

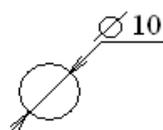
Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

**Задание:**

1. Изучить обозначения средств автоматизации.
2. Определить по условному обозначению назначение и основные функции приборов.

**Краткие теоретические сведения:**

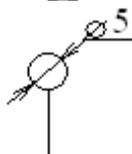
Условное обозначение приборов в функциональных схемах



- прибор установлен вне щита, т.е. по месту измерения;



- прибор установлен на щите;



- автоматический исполнительный механизм;



- исполнительный механизм что-либо открывает;



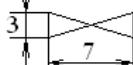
- исполнительный механизм что-либо закрывает;



- исполнительный механизм остается в неизменном положении;



- исполнительный механизм с ручным приводом;



- регулирующий орган;



- электрический сигнал;



- гидравлический сигнал;



- пневматический сигнал;

Е – электрический сигнал;

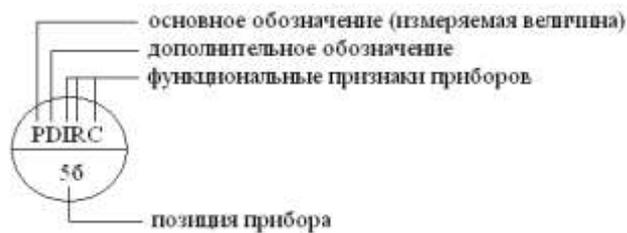
Р – пневматический сигнал;

Г – гидравлический сигнал;

Н – верхний предел измеряемой величины;

Л – нижний предел измеряемой величины.

*Буквенные обозначения*



### Основные обозначения

- Е – электрическая величина;
- D – плотность;
- F – расход;
- G – положение, перемещение;
- H – ручное воздействие;
- K – временная программа;
- L – уровень;
- M – влажность;
- P – давление;
- Q – характеризует состав, содержание;
- R – радиоактивность;
- S – скорость;
- T – температура;
- V – вязкость;
- W – масса.

### Дополнительные обозначения

- E – чувствительный элемент, устройство выполняет первичные преобразования;
- T – дистанционная передача (приборы бесшкальные с дистанционной передачей);
- K – выбор управления (автоматическое, ручное);
- Y – преобразования;
- S – включение, отключение, переключение, блокировка;
- Q – интегрирование, суммирование по времени.

### Функциональные обозначения

- I – показывает;
- R – регистрирует, записывает;
- A – сигнализация;
- C – автоматическое управление и регулирование.

### Примеры приборов

**TI** – прибор для измерения температуры, показывающий, установленный по месту;

**TE** – первичный измерительный преобразователь для измерения температуры, установленный по месту;

**TI** – прибор для измерения температуры, показывающий, установленный на щите;

**TT** – прибор для измерения температуры, бесшкальный с дистанционной передачей;

– прибор для измерения температуры, регистрирующий, установленный на щите;

**TR** – прибор для измерения температуры, показывающий, регистрирующий, установленный на щите;

– прибор для измерения температуры, показывающий, регистрирующий, установленный на щите;

 - первичный измерительный преобразователь для измерения расхода, установленный по месту;

 - прибор для измерения расхода, бесшкальный с дистанционной передачей;

 - прибор для измерения расхода, снабженный вычислительным устройством, извлекающим корень, установленный на щите;

 - прибор для измерения расхода, интегрирующий, показывающий, установленный на щите;

 - прибор для измерения уровня с сигнализацией верхнего предела измерений, установленный по месту;

 - прибор для измерения концентрации кислорода, показывающий, регистрирующий, установленный на щите;

 - прибор для измерения температуры, преобразующий входной электрический сигнал в выходной электрический сигнал, установленный на щите;

 - прибор для измерения давления, преобразующий входной пневматический сигнал в выходной электрический сигнал, установленный на щите;

 - пусковая аппаратура для управления электродвигателями, исполнительными механизмами;

- аппаратура предназначена для ручного дистанционного управления;

 - прибор для измерения любой электрической величины, показывающий, установленный на щите

### **Порядок выполнения работы:**

- 1 Изучить обозначения средств автоматизации.
- 2 Определить по условному обозначению назначение и основные функции приборов.

### **Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

## **Практическое занятие № 6**

### ***Анализ и построение функциональных схем автоматического регулирования***

#### **Цель работы:**

- 1 Изучить методику выполнения функциональных схем
- 2 Научиться составлять функциональную схему САР

#### **Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- применять Общероссийский классификатор продукции (ОКП);
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

#### **Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

### Задание:

1. Изучить обозначения средств автоматизации.
2. Определить по условному обозначению назначение и основные функции приборов.

### Краткие теоретические сведения:

Функциональная схема – это схема, отображающая функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, сигнализации, управления и регулирования технологического процесса и определяющая оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации (ПиСА).

На технологических трубопроводах показывают регулируемую и запорную арматуру, которая участвует в контроле и управлении процессом.

Технологические установки и агрегаты изображаются в верхней части чертежа. Приборы и средства автоматизации, встраиваемые в технологическое оборудование, изображают на схеме в непосредственной близости от технологического оборудования.

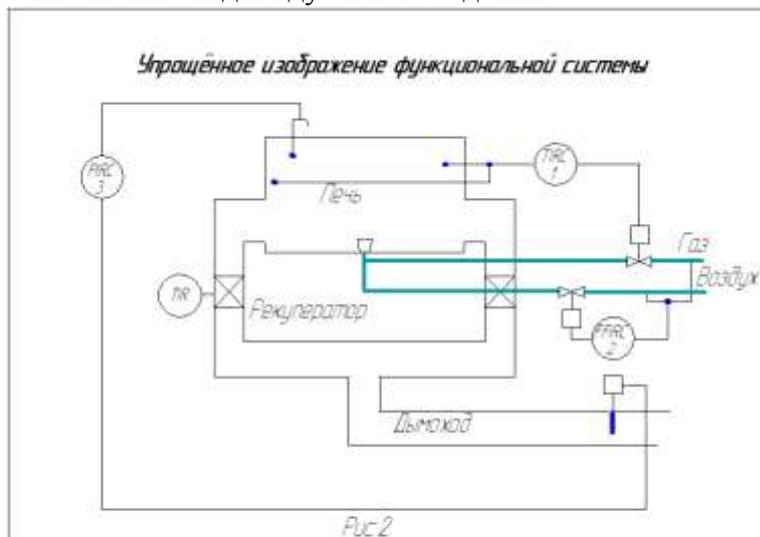
Приборы и средства автоматизации на щитах и пультах показывают в прямоугольниках в нижней левой части чертежа.

### Порядок выполнения работы:

- 1 Изучить правил выполнения функциональных схем.
- 2 Выполнить схемы на миллиметровке.

### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания.



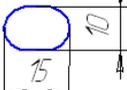
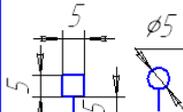
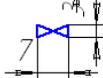
*Условные цифровые обозначения трубопроводов для жидкостей и газов.*

*Таблица 4*

<i>Наименование среды транспортируемой трубопроводом</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Наименование среды транспортируемой трубопроводом</i>	<i>Обозначение</i>
Вода	-1-1-	Горючие газы	-16-16-
Газ	-2-2-	Водород	-17-17-
Воздух	-3-3-	Аммиак	-18-18-
Азот	-4-4-	Фреон	-19-19-
Кислород	-5-5-	Метан	-20-20-
Инертные газы		Этан	-21-21-
этан	-6-6-	Этилен	-24-24-
метан	-7-7-	Пропан	-22-22-
азот	-8-8-	Дихлорэтан	-23-23-
кислород	-9-9-	Бутан	-24-24-
кислоты	-10-10-	Бутилен	-25-25-
Аммиак	-11-11-		
Кислота (окислитель)	-12-12-	Горючая жидкая среда	-26-26-
Щелочи	-13-13-		
Масло	-14-14-		
Жидкое горючее	-15-15-	Водяной пар	-27-27-

## Основные условные обозначения КИП и А по ГОСТ 21404–85

Таблица 1

Наименование	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь, прибор, установленный по месту (базовое обозначение)	
То же, на шпите	
То же, (допускаемое обозначение)	
Исполнительный механизм. Общее обозначение (Положение регулирующего органа при прекращении управляющего сигнала не регламентируется)	
Регулирующий орган	
Линия связи	
Пересечение линий связи без соединения друг с другом	
Пересечение линий связи с соединением друг с другом	

### Практическое занятие № 7

#### Анализ и построение схемы автоматического контроля

#### Цель работы:

- 1 Изучить методику выполнения принципиальных схем
- 2 Научиться строить и вычерчивать принципиальные схемы автоматического контроля

#### Выполнив работу, Вы будете уметь:

- применять Общероссийский классификатор продукции (ОКП);
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

#### Материальное обеспечение:

**Задание:**

1. Изучить системы автоматического контроля (САК).
2. Начертить принципиальную электрическую схему САК.

**Краткие теоретические сведения:**

Системы автоматического контроля (САК) предназначены для автоматического контроля различных технологических параметров на производственном объекте (объекте автоматизации) и, в конечном счёте, для непосредственного измерения и регистрации этих параметров. Поэтому их часто называют *измерительными системами*. Исключение составляют системы контроля дискретного типа, в которых выходная величина может принимать только два (0 – 1) или несколько фиксированных значений.

Структура измерительных систем включает в себя сам объект автоматизации **ОА** (объект контроля), измерительное устройство **ИУ** и регистрирующее устройство **РУ** для конечной фиксации или записи измеренного параметра при его изменении в течение определённого промежутка времени (рис. 1).

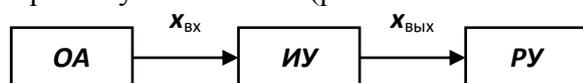


Рис.1. Структурная схема системы автоматического контроля

В зависимости от вида измерительного устройства автоматические измерительные системы делятся на две большие группы:

1. *Небалансные* (некомпенсационные, неуравновешенные) системы;
2. *Балансные* (компенсационные, уравновешенные) системы.

*Небалансные системы* – это системы прямого измерения. Они просты по своей структуре и конструкции, но имеют существенный недостаток, т.к. обладают погрешностью измерения, возникающей под действием различных внешних условий, таких как, изменение окружающей температуры, нестабильность величины напряжения источника питания, а также погрешностью, обусловленной изменением внутренних параметров входящих в систему элементов.

Структурно измерительные устройства таких систем состоят из датчика **Д**, преобразующего неэлектрическую величину в электрический сигнал, измерительной схемы **ИС** и, как правило, усилителя **У** (рис.2), т.е. представляют собой последовательное соединение нескольких элементов, изменение, по какой-либо причине, выходного параметра одного из них сказывается на изменении результирующей выходной величины.

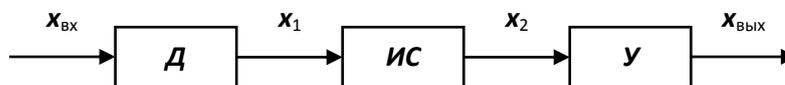


Рис.2. Структурная схема измерительного устройства (системы прямого измерения)

*Балансные системы* – основаны на автоматическом уравновешивании (*балансировании*) выходной величины датчика, поступающей на измерительную схему, с помощью равной ей величины такого же рода, пропорциональной изменению выходной величины датчика  $x_1$ .

На рис.3 представлена структурная схема измерительной системы непрерывного балансирования, чаще всего используемая на практике. В таких системах, как видно из схемы, имеется жесткая обратная связь, т.е. такие системы – *замкнутые*, и в них вводятся дополнительные звенья, значительно усложняющие структуру в целом.

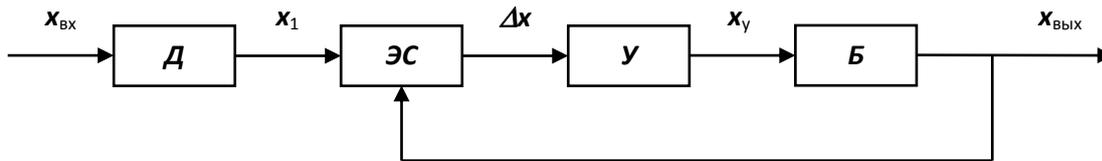


Рис.5.3. Структурная схема балансной измерительной системы

В этой схеме используется, прежде всего, элемент сравнения **ЭС**, выполняющий функции *«нуль-органа»* и работающий на установление нулевого выходного сигнала  $\Delta x=0$ , поступающего на вход усилителя **У**. В качестве *нуль-органа* в балансных системах используются уравновешенные измерительные схемы, такие, как мостовые, дифференциальные или компенсационные (см. ч.1 *Схемы включения датчиков*). Другое дополнительное звено *балансирующий орган Б*, который своей выходной величиной соответствующим образом воздействует на элемент сравнения. В качестве этого элемента обычно используется электродвигатель с редуктором, который по цепи обратной связи, как правило, механической, уравнивает применяемую измерительную схему, устанавливая, таким образом, на ее выходе нулевой сигнал. При выполнении условия  $\Delta x=0$  выходной сигнал усилителя также отсутствует ( $x_у=0$ ). При этом балансирующий орган не работает, не оказывая никакого воздействия на элемент сравнения, и вся система находится в состоянии покоя. Малейшее изменение измеряемого параметра  $x_{вх}$  вызывает на выходе элемента сравнения появление сигнала рассогласования  $\Delta x$ , отличного от нуля, причем определенной полярности или фазы. Этот сигнал, увеличенный количественно с помощью усилителя, поступает на обмотку управления используемого электродвигателя. При этом двигатель приходит в движение и, в соответствии со знаком (или фазой) управляющего сигнала  $x_у$ , через редуктор перемещает движок регулирующего элемента измерительной схемы в требуемом направлении, уравнивая ее снова, т.е. добиваясь равенства нулю выходного сигнала измерительной схемы, а следовательно и  $x_у$ , при котором двигатель вновь останавливается до следующего изменения измеряемого параметра.

Выходной величиной подобных *балансных измерительных систем* является угловое перемещение выходного вала редуктора и угловое (или линейное) перемещение механически связанного с ним движка переменного резистора (*реохорда*), а в некоторых случаях (при дифференциальной схеме включения датчика) положение движка измерительного трансформатора, уравнивающих соответствующую измерительную схему. Поэтому подобные регулирующие элементы всегда оснащаются специальной измерительной шкалой, проградуированной в единицах измеряемого параметра, по которой и определяется величина контролируемого параметра  $x_{вх}$ .

Как видим, подобные измерительные системы более сложные и по структуре они подобны *системам автоматического регулирования – САР* (см. далее), но в них исключаются многие погрешности, свойственные небалансным системам, и, кроме этого, обеспечивается большая мощность выходного сигнала.

По виду балансируемой величины балансные измерительные системы в зависимости от используемых датчиков и схем их включения подразделяются на *автоматические потенциометры*, уравнивающие выходное напряжение датчика, и *автоматические мосты*, уравнивающие выходное сопротивление датчика.

Далее рассмотрим на конкретных примерах некоторые измерительные системы, остановимся на их работе, на положительных и отрицательных свойствах этих систем, а также на причинах возникновения погрешностей измерения и методах их компенсации.

Так простейший измеритель температуры – *пирометр* (рис.4) состоит из датчика генераторного типа – *термопары*, измерительного милливольтметра и двух соединительных проводов СП, длина которых в большинстве случаев может достигать значительной величины, из-за удалённости самого объекта контроля от пункта наблюдения. В этой схеме,

под действием возникающей в датчике *термо-э.д.с.*, в зависимости от измеряемой температуры, по соединительным проводам будет протекать ток, под действием которого на каждом из этих проводов будет наблюдаться падение напряжения, пропорциональное величине тока и внутреннему сопротивлению проводов. Поэтому величина напряжения на самом милливольтметре соответственно уменьшится, что приведёт, тем самым, к появлению погрешности измерения. Причём, сопротивление соединительных проводов зависит от их длины и может также изменяться от окружающих температурных условий. В результате возникающая погрешность ещё больше может возрасти. Таким образом, несмотря на простоту рассмотренной измерительной системы (пирометра), она всегда имеет достаточно высокую погрешность измерения.

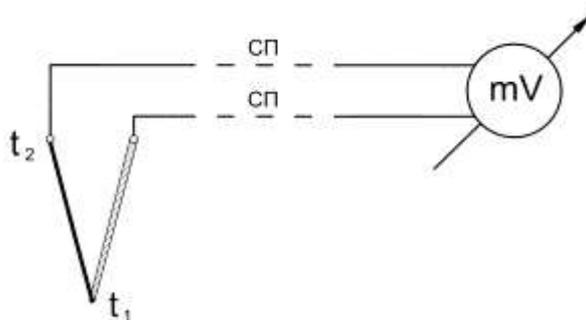


Рис.4. Принципиальная электрическая схема пирометра

В качестве другого примера рассмотрим измерительную систему с применением мостовой схемы, в которую включен тензочувствительный датчик сопротивления (рис.5) и предназначенную для измерения деформаций строительных конструкций.

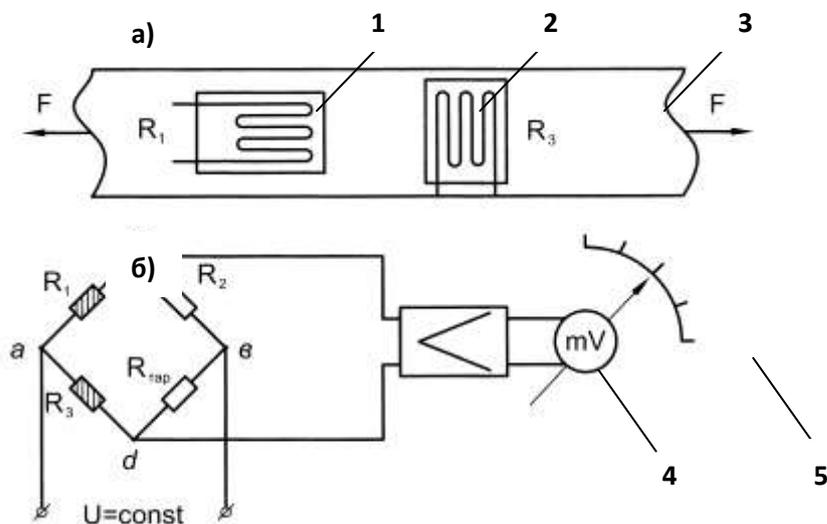


Рис.5. Конструктивная и электрическая схема измерителя деформаций

В этой измерительной системе используется схема *неравновесного моста*, в котором в качестве резистора  $R_1$  (рис.5.б), подключён *проволочный датчик сопротивления 2* (тензодатчик), прикрепленный (тщательно приклеенный) к исследуемой детали (конструкции) *1* (рис.5.5.а) и воспринимающий деформацию этой детали при воздействии на неё механических усилий  $F$ . Для увеличения чувствительности рассматриваемой измерительной системы в ней дополнительно используется усилитель *4*, вход которого подключен к измерительной диагонали моста *c-d*, а усиленный им сигнал поступает затем на регистрирующий прибор *5*, по шкале которого и фиксируется контролируемый параметр

Рассматриваемая схема может быть использована не только для измерения деформаций различных конструкций или их отдельных элементов, но также она позволяет определять величины действующих усилий  $F$ , а также механических напряжений, возникающих в результате деформации.

Погрешность измерения рассмотренной системы обусловлена несколькими причинами. Прежде всего, в ней имеет место температурная составляющая погрешности, вызванная тем, что, во-первых, возможна дополнительная деформация конструкции, на которой закреплен тензодатчик, из-за изменения окружающей температуры и, во-вторых, сам тензодатчик может работать как *термосопротивление*, т.е. его сопротивление от температуры тоже может изменяться.

Для компенсации температурной погрешности, в подобных случаях, необходимо на исследуемой конструкции рядом с рабочим тензодатчиком установить ещё один, точно такой же, датчик  $Z$  (рис.5.а), включив его в смежное плечо мостовой схемы (например, в качестве резистора -  $R_3$ ). Однако располагать этот датчик на детали необходимо так, чтобы он не воспринимал её деформацию от нагрузки, т.е. перпендикулярно рабочему датчику  $R_1$ . В результате, оба датчика будут находиться в одинаковых температурных условиях, и в уравнении равновесия мостовой схемы при изменении температуры будут одинаково изменяться и правая и левая части равенства (см. ч.1 «Схемы включения датчиков»). При этом равновесие моста не нарушится, а деформацию конструкции от нагрузки будет воспринимать только рабочий датчик  $R_1$ .

Однако в подобной измерительной системе кроме температурной погрешности может иметь место погрешность за счет изменения напряжения источника питания  $U$ , т.к. величина сигнала, поступающего на усилитель и, в конечном счете, показание измерительного прибора пропорциональны величине этого напряжения. Для компенсации такой составляющей погрешности необходимо применять стабилизированный источник питания мостовой схемы. Если такой возможности нет, то в качестве измерительного прибора следует использовать *логометр*.

*Логометр* - это электродинамическая измерительная система, в которой вместо одной используются две жестко соединённые между собой под определенным углом подвижные катушки. Поэтому угол их поворота и результирующее отклонение стрелки (показание измерительного прибора) пропорционально не величине протекающего по этим катушкам тока, а зависит только от соотношения токов, протекающих по каждой катушке отдельно.

Так на рис.6 представлена схема измерителя температуры с использованием в качестве регистрирующего прибора *логометра*. Здесь в качестве температурного датчика применяется *термосопротивление*  $R_t$ , включенное также в неравновесную мостовую схему, а к измерительной диагонали моста  $c-d$  подключена одна из подвижных катушек логометра. Вторая катушка логометра подключена к тому же источнику питания через дополнительный резистор  $R_3$ . При этом величины токов  $I_1$  и  $I_2$  в зависимости от значения напряжения питания  $U$  будут изменяться одинаково, и соотношение этих токов будет оставаться неизменным.

Но в этой системе имеет место погрешность измерения, обусловленная наличием соединительных проводов, идущих от мостовой схемы к датчику, и длина которых также может быть значительной из-за удаленности объекта контроля от пункта наблюдения. Величина сопротивления этих двух проводов  $R_{cn}$  является ненужной составляющей к термосопротивлению, и она может также изменяться от окружающих условий.

Для исключения этой составляющей погрешности измерения, в большинстве случаев, как правило, вместо двухпроводной цепи используют трехпроводную схему подключения датчика. На рис.6 третий провод показан жирной пунктирной линией, а провод, идущий к точке  $a$ , - обрывается. При этом точка питания « $a$ » смещается вниз (по схеме) - к термодатчику  $R_t$ . (точка  $\acute{a}$ ) При этом в уравнение равновесия мостовой схемы величина сопротивлений каждого из двух соединительных проводов, идущих от мостовой схемы к термосопротивлению, входит в состав сопротивлений смежных сторон мостовой схемы, и их

изменение за счет длины и воздействия окружающей температуры не нарушает равновесия мостовой схемы. Влияние величины сопротивления третьего провода, по которому, в данном случае, подается питание к мостовой схеме, сказывается лишь на уменьшении величины напряжения питания на ней, но это изменение скомпенсировано применением в качестве измерительного прибора *логометра*.

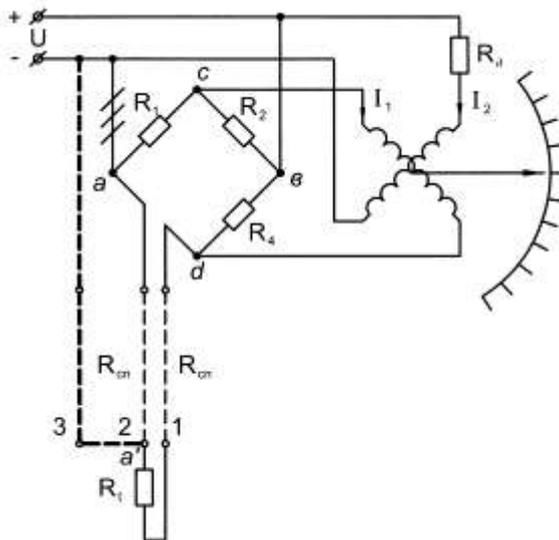


Рис.6. Принципиальная электрическая схема измерителя температуры с логометром

При трехпроводной схеме включения датчиков, кроме сказанного, компенсируется и величина электромагнитных наводок от внешних магнитных полей на длинные соединительные провода.

В рассмотренных измерительных системах, являющихся системами прямого измерения (*небалансными*), все погрешности скомпенсировать невозможно, особенно такие, которые обусловлены изменением внутренних параметров самих элементов, составляющих систему в целом. Например изменение коэффициента усиления усилителя по различным причинам, как в схеме на рис.5, и даже наличие чисто субъективной погрешности измерения.

Для исключения перечисленных погрешностей и были разработаны *балансные измерительные системы*.

Так на рис.7 представлена схема автоматического моста для измерения температуры. В рассматриваемой системе датчиком также является *термосопротивление*  $R_t$ , включенное здесь в схему *равновесного моста*, запитанного от сети переменного тока. В схеме также используется трёхпроводная схема подключения датчика. Сигнал с равновесной мостовой схемы поступает на вход электронного усилителя ЭУ, нагрузкой которого служит обмотка управления асинхронного электродвигателя АД с редуктором. Двигатель работает в режиме управляемого электропривода (рис. 1), и выходной вал редуктора жестко связан с движком реохорда  $R$ , включенного в схему равновесного моста.

Обмотка возбуждения асинхронного двигателя через фазосдвигающую емкость  $C$  также запитана от сети переменного тока, чтобы получить вращающееся магнитное поле, создаваемое его статорными обмотками.

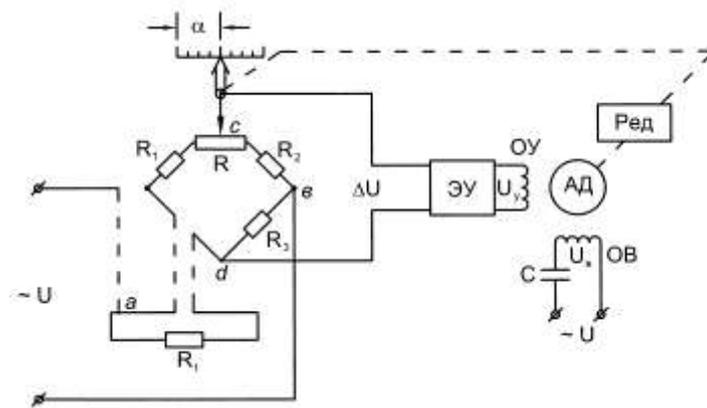


Рис.7. Принципиальная электрическая схема балансной измерительной системы

В работе рассматриваемой системы при каждом изменении измеряемого параметра (*температуры*) равновесие мостовой схемы будет нарушаться, что вызывает появление на входе электронного усилителя *сигнала рассогласования*  $\Delta U$ , причем соответствующей фазы. В результате на выходе усилителя и на обмотке управления электродвигателя появляется напряжение управления  $U_y$ , и двигатель приходит в движение. Через редуктор он перемещает движок реохорда в требуемом направлении, в соответствии с фазой сигнала рассогласования и величиной напряжения управления, до тех пор, пока сигнал рассогласования не станет равным нулю, т.е. мостовая схема вновь уравнивается, а двигатель при этом остановится. При этом, по шкале реохорда, заранее проградуированной в единицах температуры (градусах), можно определить текущее значение температуры на объекте контроля.

Рассмотренная система работает в режиме непрерывного балансирования, но, в некоторых случаях, для измерения одновременно нескольких параметров используют системы периодического балансирования, в которых используется один электропривод, поочередно используемый для каждой схемы измерения.

В балансных измерительных системах все погрешности, в том числе от изменения внутренних параметров входящих элементов, таких как изменение коэффициента усиления усилителя, исключаются. Единственным недостатком подобных измерительных систем является невозможность их применения для контроля быстроизменяющихся во времени параметров, т.е. для динамических измерений, например, таких, как взаимодействие ж/д пути и подвижного состава. Это связано с использованием в балансных измерительных системах такого инерционного элемента как электродвигатель с редуктором. Поэтому для динамических измерений возможно применение лишь систем прямого измерения (*небалансных систем*) с соответствующими быстродействующими регистрирующими устройствами.

Все рассмотренные выше измерительные системы являются аналоговыми приборами непосредственной оценки. Благодаря современным достижениям в области микроэлектроники и измерительной техники всё большее применение получают цифровые измерительные приборы, т.е. измерительные системы с цифровым отсчетом.

Дискретная форма представления результатов измерения более точна и удобна как для визуального наблюдения и регистрации, так и для передачи на расстояние в системах телемеханики и телеизмерений. В цифровых измерительных системах, кроме этого, полностью исключается и субъективная составляющая погрешности.

Структура цифровой измерительной системы представлена на рис.5.8, и она состоит из входного устройства *ВУ*, в состав которого входят датчики с соответствующими схемами их включения и усилителями, аналогово-цифрового преобразователя *АЦП*, созданного на основе современной микроэлектроники, цифрового отсчетного устройства *ЦОУ* и устройства управления *УУ*.

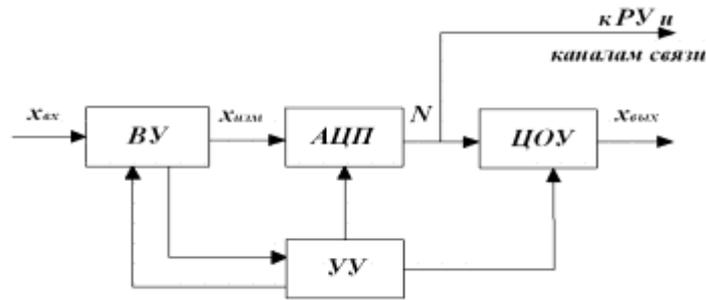


Рис.8. Структурная схема цифровой измерительной системы

Входное устройство предназначено для масштабного преобразования (усиления) входной измеряемой величины  $x_{вх}$  и, кроме этого, отделения от неё возможных помех.

Аналогово-цифровой преобразователь преобразует измеряемую величину  $x_{изм}$  в цифровой код  $N$ , который поступает на цифровое отсчетное устройство **ЦОУ**, где измеряемая величина индицируется в виде ряда цифр на соответствующем цифровом табло. Кроме этого, цифровой код  $N$  может использоваться для его фиксации на регистрирующем устройстве **РУ** и для передачи его по каналам связи в системах телеизмерения и телемеханики.

Устройство управления, в зависимости от входного сигнала, вырабатывает определенную последовательность командных сигналов во все функциональные узлы цифровой измерительной системы, обеспечивая их четкую и надежную работу.

Цифровые измерительные системы обладают, по сравнению с аналоговыми, следующими достоинствами:

- высокая точность,
- быстродействие,
- помехоустойчивость,
- минимально потребляемая энергия от объекта измерения (с датчиков),
- удобство визуального отсчета,
- возможность выдачи результатов измерения (в виде кода) в различные внешние устройства, обеспечивающие автоматизацию процессов измерения и управления.

К недостаткам подобных систем следует отнести сравнительную сложность, что обуславливает их более высокую стоимость и, в некоторых случаях, относительно невысокую надежность.

К сожалению, ограниченный объем настоящего учебного пособия и программа изучаемой дисциплины не позволяют более подробно на них останавливаться.

#### **Порядок выполнения работы:**

1 Изучить принципы построения и правила выполнения принципиальных схем автоматического контроля.

2 Выполнить схемы автоматического контроля на миллиметровке и на компьютере с применением программы «Компас – 3Д».

#### **Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

### **Практическое занятие № 8**

#### *Анализ и построение схемы автоматического регулирования*

#### **Цель работы:**

1 Изучить методику выполнения принципиальных схем

## **2 Научиться строить и вычерчивать принципиальные схемы автоматического регулирования**

### **Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- применять Общероссийский классификатор продукции (ОКП);
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

### **Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

### **Задание:**

1. Изучить системы автоматического регулирования (САР).
2. Начертить принципиальную электрическую схему САР.

### **Краткие теоретические сведения:**

**Система автоматического регулирования (САР)** поддерживает или улучшает функционирование управляемого объекта. В ряде случаев вспомогательные для САР операции (пуск, остановка, контроль, наладка и т.д.) также могут быть автоматизированы. САР функционирует в основном в составе производственного или какого-либо другого комплекса.

### **Порядок выполнения работы:**

- 1 Изучить принципы построения и правила выполнения принципиальных схем автоматического регулирования
- 2 Выполнить схемы автоматического регулирования на миллиметровке и на компьютере с применением программы «Компас – 3Д».

### **Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

## **Практическое занятие № 9**

### **Анализ и построение принципиальных электрических схем автоматического регулирования**

### **Цель работы:**

- 1 Изучить принцип построения принципиальных электрических схем

### **Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- снимать характеристики и производить подключение приборов;
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы систем.

### **Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

### **Задание:**

1. Изучить принципы построения принципиальных электрических схем.
2. Начертить схему управления приводом.

### **Краткие теоретические сведения:**

Электрический привод (сокращённо — *электропривод*) — это электромеханическая система для приведения в движение исполнительных механизмов рабочих машин и управления этим движением в целях осуществления **технологического процесса**.

Современный электропривод — это совокупность множества электромашин, аппаратов и систем управления ими. Он является основным потребителем электрической энергии (до 60 %) <sup>[1]</sup> и главным источником механической энергии в промышленности.

Электропривод - электромеханическая система, состоящая из **преобразователей электроэнергии**, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

### **Принципы построения схемы управления электроприводом переменного тока**

Трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в наибольшей степени удовлетворяет требованиям эксплуатационной надёжности электроприводов, так как он является бесконтактным и коммутация его рабочей цепи не сопровождается высокими переходными токами и напряжениями. Однако такой вид подключения к сети в нашей стране не получил столь широкого распространения как двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением. Одна из основных причин этого заключается в том, что схемы управления трёхфазным двигателем существенно превышают по расходу кабеля или аппаратурным затратам типовую двухпроводную схему управления электроприводом постоянного тока. Наиболее близка к двухпроводной схеме по технико-экономическим показателям и алгоритму трёхпроводная схема управления электроприводом с трёхфазным двигателем, имеющая местное реверсирование.

Рабочая и контрольная цепи схемы (рис. 4.28, а) содержат фазо-контрольное устройство ФК для блокировки пускового реле НПС по рабочему току, узел контроля К и положения стрелки, фазочувствительное реверсирующее реле ФЧ, электропривод СП с автопереключателем АП, источник трёхфазного напряжения С1Ф—С3Ф. Расчёты кабельных линий показывают, что благодаря большей дальности управления без дублирования кабельных жил данная схема по расходу кабеля находится на уровне предельно экономичной двухпроводной схемы.

Но она содержит большее число приборов, а также реверсирующее реле с открытой контактной системой, работающее в эксплуатируемых условиях, что является основной причиной, сдерживающей ее широкое применение. Однако имеется принципиальная возможность построения трех-проводной схемы без реверсирующего реле, т. е. с центральным реверсированием. Для совмещения рабочей и контрольной цепей в такой схеме применяют силовой диод VD, включенный в один из линейных проводов для выполнения контрольных функций (рис. 4.28, б). Возможно также использование трех батарей конденсаторов С1—С3, устраняющих замыкание постоянной составляющей контрольного тока через обмотки электродвигателя и асимметрию рабочего тока (рис. 4.28, в).

Но первая из этих схем не обеспечивает номинального вращающего момента на валу электродвигателя при пуске электропривода из крайних положений, так как все три обмотки в это время подмагничиваются постоянной составляющей выпрямленного диодом VD рабочего тока. Вторая же схема содержит большое число параллельно соединенных и поэтому неконтролируемых рабочей и контрольными цепями конденсаторов. Первая и вторая схемы требуют индивидуального для каждой стрелки времязадающего датчика I класса для автоматического размыкания рабочей цепи по истечении времени нормального перевода, что обусловлено невозможностью остановки электропривода по окончании перевода стрелки в случае неисправности контрольной цепи. Трёхпроводными схемами без реверсирующего органа невозможно последовательно переводить спаренные электроприводы, в связи с чем для стрелок съездов требуется удвоенный расход кабеля. Необходимо также обеспечивать непрерывность

работы контрольной цепи при размыкании блок-контакта электропривода, так как контрольный ток проходит через обмотки электродвигателя.

Добавление в схему с центральным реверсированием четвертого провода уменьшает аппаратную избыточность, так как облегчается задача совмещения рабочей и контрольной цепей (рис. 4.28, г). Однако при этом сохраняются параллельный перевод спаренных электроприводов и более высокий (на 30—35%) расход кабеля по сравнению с двухпроводной схемой. Четырехпроводная схема применяется на ряде станций магистральных железных дорог и промышленного транспорта.

### Порядок выполнения работы:

- 1 Изучить принципы построения и правила выполнения схем управления приводами
- 2 Выполнить схему управления приводами на миллиметровке и на компьютере с применением программы «Компас – 3Д».

### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания.

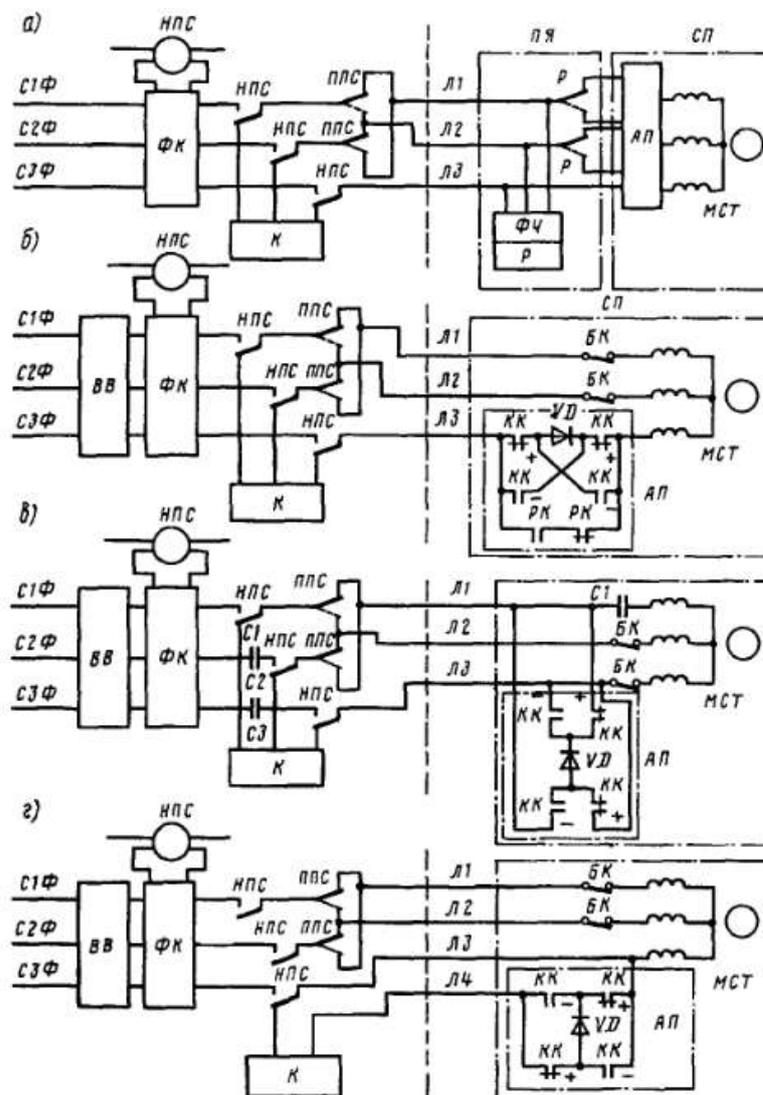


Рис. 4.28. Принципиальные схемы управления стрелочным приводом переменного тока

## Тема 1.2 Использование элементов автоматики для конкретной системы управления

### Лабораторная работа № 10 Сборка структурной схемы с операционным усилителем

**Цель работы:** изучение принципа работы операционного усилителя.

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы операционного усилителя.
- 2 Собрать структурную схему с операционным усилителем.

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить операционный усилитель.
2. Снять характеристику усилителя.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради

### Лабораторная работа № 11 Исследование работы коммутаторов

**Цель работы:** изучение принципа действия коммутатора

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы коммутатора

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить работу коммутатора.
2. Снять характеристику коммутатора.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради.

## **Лабораторная работа № 12**

### **Исследование работы командоаппарата с жесткой логикой**

**Цель работы:** изучение принципа действия командоаппарата с жесткой логикой

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы командоаппарата с жесткой логикой

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить командоаппарат с жесткой логикой.
2. Снять характеристику командоаппарата с жесткой логикой.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради.

## **Лабораторная работа № 13**

### **Анализ управления программируемого реле**

**Цель работы:** изучение принципа действия программируемого реле

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

- 1 Изучить принцип работы программируемого реле

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить программируемое реле
2. Снять характеристику программируемого реле.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради.

## **Лабораторная работа № 14** **Программирование реле с помощью ПК**

**Цель работы:** изучение принципа работы программированного реле с помощью ПК

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- осуществлять рациональный выбор средств измерений;
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

**Материальное обеспечение:**

Учебный стенд «Основы автоматизации производства» ОАП1-С-Р

**Задание:**

1 Изучить принцип работы программируемого реле с помощью ПК

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить программируемое реле с помощью ПК
2. Снять характеристику программируемого реле с помощью ПК.

**Форма представления результата:**

Оформление лабораторной работы в тетради.

## **Практическое занятие № 11** **Расчет и выбор исполнительного механизма**

**Цель работы:** изучение методики выбора исполнительного механизма для соответствующего регулирующего органа.

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

**Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальный раздаточный материал по расчету расходной характеристики регулирующего органа

**Задание:**

1 В соответствии с выбранным регулирующим органом выбрать исполнительный механизм

**Краткие теоретические сведения:**

Исполнительный механизм – это устройство для перемещения регулирующего органа в соответствии с поступающими от управляющего устройства сигналами.

По виду потребляемой энергии исполнительные механизмы могут быть электрические, гидравлические и пневматические.

Наибольшее распространение в системах автоматизации нашли электрические исполнительные механизмы, в частности, однооборотные типа МЭО.

Основными параметрами исполнительных механизмов являются:

- 1) номинальный вращающий момент на валу или усилие на выходном штоке;

- 2) зона нечувствительности (в ее пределах изменение управляющего сигнала не вызывает движение вала исполнительного механизма);
- 3) постоянная времени (характеризует инерционное запаздывание начала движения вала или штока исполнительного механизма после подачи на его вход управляющего сигнала);
- 4) время оборота выходного вала исполнительного механизма или хода его штока;
- 5) величина инерционного выбега выходного вала исполнительного механизма (перемещение после прекращения подачи сигнала от регулятора).

### **Сочленение регулирующих органов с исполнительными механизмами**

Качество работы системы автоматического регулирования зависит от сочленения исполнительного механизма и регулирующего органа.

Способы сочленения зависят от типа и конструкции исполнительного механизма и регулирующего органа и их взаимного расположения и других факторов.

Наиболее простой способ сочленения является непосредственное соединение выходного вала исполнительного механизма с валом регулирующего органа (жесткое соединение). При этом перемещение выходных устройств исполнительного механизма и регулирующего органа одинаковы и их скорости равны.

Наиболее распространенный способ сочленения исполнительного механизма и регулирующего органа с помощью промежуточных звеньев.

Сочленения можно разделить на две группы:

- 1) прямые – кривошип исполнительного механизма и рычаг регулирующего органа вращаются в одном направлении;
- 2) обратные - кривошип исполнительного механизма и рычаг регулирующего органа вращаются в противоположном направлении.

### **Порядок выполнения работы:**

1. Рассчитать и выбрать исполнительный механизм по номинальному крутящему моменту:

$$M = K(M_p + M_t),$$

где  $K = 2 - 3$  – коэффициент, учитывающий затяжку сальников;

$M_p$  – реактивный момент, обусловленный стремлением потока закрыть заслонку;

$M_t$  – момент трения в опорах.

Реактивный момент  $M_p$  находят по следующей формуле:

$$M_p = 0,07 \Delta P_{po} \cdot D_y^3,$$

где  $\Delta P_{po}$  – перепад давления на заслонке (рекомендуется при расчете принимать  $\Delta P_{po}$  равным избыточному давлению перед заслонкой  $P_i$ ), Па;

$D_y$  – диаметр заслонки, м.

Момент трения  $M_t$  находят по следующей формуле:

$$M_t = 0,785 D_y^2 \cdot P_i \cdot r_{ш} \cdot \lambda,$$

где  $P_i$  - избыточное давление перед заслонкой, Па;

$r_{ш}$  – радиус шейки вала заслонки (0,015), м;

$\lambda = 0,15$  – коэффициент трения в опорах.

Рассчитав номинальный крутящий момент, определяют тип исполнительного механизма по таблицам 2 и 3, необходимого для стабильной работы системы.

Таблица 2. Электрические исполнительные механизмы.

Тип	Номинальный крутящий момент на выходном валу, Н · м	Номинальное время полного хода выходного вала, с	Номинальный ход выходного вала, обороты
МЭО-4/10-0,25-68	40	10	0,25
МЭО-4/25-0,63-68	40	25	0,63
МЭО-10/10-0,25	100	10	0,25
МЭО-10/25-0,63	100	25	0,63
МЭО-10/25-0,25-68	100	25	0,25
МЭО-25/25-0,25	250	25	0,25
МЭО-25/63-0,63	250	63	0,63
МЭО-25/63-0,25	250	63	0,25
МЭО-25/160-0,63	250	160	0,63
МЭО-10/63-0,63	100	63	0,63
МЭО-1,6/25-0,63	16	25	0,63
МЭО-4/63-0,63	40	63	0,63
ИМТМ-4/25	40	25	0,97
МЭМ-4Б	40	25; 63; 160; 400	10; 25; 63
МЭМ-10Б	100	25; 63; 160; 400	10; 25; 63

Таблица 3. Электрические исполнительные механизмы

Тип механизма	Номинальный крутящий момент на выходном валу, Н · м	Номинальное время полного хода выходного вала, с	Номинальный полный ход выходного вала, обороты	Тип электродвигателя	Тип электромагнита	Потребляемая мощность в номинальном режиме, В · А, не более	Масса механизма, кг, не более
МЭО-630/10-0,25К-84	630	10	0,25	4АА56В4	ТЭМП-81	700	155
МЭО-630/25-0,63К-84	630	25	0,63	4АА56В4	ТЭМП-81	700	155
МЭО-1600/25-0,25К-84	1600	25	0,25	4АА56В4	ТЭМП-81	700	155
МЭО-1600/63-0,63К-84	1600	63	0,63	4АА56В4	ТЭМП-81	700	155
МЭО-1600/63-0,25К-84	1600	63	0,25	4АА56В4	ТЭМП-81	420	155
МЭО-1600/160-0,63К-84	1600	160	0,63	4АА56В4	ТЭМП-81	420	155
МЭО-4000/63-0,25К-84	4000	63	0,25	4АА56В4	ТЭМП-81	700	270
МЭО-4000/160-0,63К-84	4000	160	0,63	4АА56В4	ТЭМП-81	700	270
МЭО-10000/63-0,25К-	10000	63	0,25	4АА63В4	ТЭМП-81	900	580

84							
МЭО-10000/160-0,63К-84	10000	160	0,63	4АА63В4	ТЭМП-81	900	580

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания

**Практическое занятие № 12**  
**Выбор и расчет регулирующих органов**

**Цель работы:** изучение принципа построения статической характеристики регулирующего органа

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- рассчитывать и выбирать регулирующие органы
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем.

**Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальный раздаточный материал по расчету расходной характеристики регулирующего органа

**Задание:**

1 Изучить методику расчета расходной характеристики регулирующего органа

**Краткие теоретические сведения:**

Регулирующим органом в системе автоматического регулирования называется устройство, сочлененное с исполнительным механизмом и непосредственно воздействующее на регулируемую среду или энергию.

Основное назначение регулирующего органа – менять количество (расход) вещества (энергии), подаваемого на объект в зависимости от регулируемой величины.

Этот расход зависит:

- 1) от степени открытия регулирующего органа;
- 2) от физических свойств вещества;
- 3) от перепада давления в регулирующем органе и в системе.

Регулирующее воздействие регулирующего органа заключается в изменении проходного сечения его (степени открытия), а значит в изменении гидравлического сопротивления в регулирующем органе (напора в регулирующем органе), а значит в изменении количества вещества, проходящего через регулирующий орган.

Основными характеристиками регулирующего органа являются диаметр условного прохода, конструктивная характеристика и расходная характеристика.

Конструктивная характеристика представляет собой зависимость проходного сечения от степени открытия регулирующего органа  $F_{PO} = f(h_{PO})$ .

Эта характеристика не связана с особенностями потока среды регулируемого объекта и в основном имеет линейную форму.

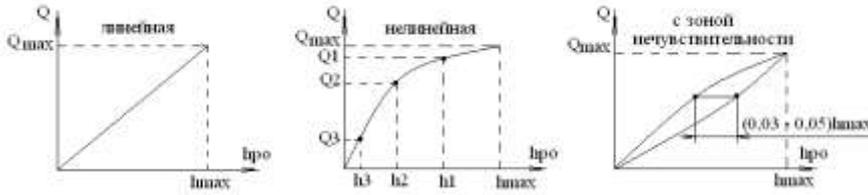
Расходная характеристика представляет собой зависимость расхода регулируемой среды от степени открытия регулирующего органа  $Q_{PO} = f(h_{PO})$ .

Эта характеристика зависит:

- 1) от конструкции регулирующего органа;
- 2) от напора среды;

- 3) от перепада давления на регулирующем органе;
- 4) от сопротивления в линии;
- 5) от характеристики объекта и т.д.

Расходная характеристика имеет нелинейный вид, но для упрощения регулирования необходимо, чтобы она была линейной или приближалась к линейному виду.



**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить выданный вариант задания.
2. Задаем значения  $Q_i$  от  $Q_{max}$  до  $Q_{min}$ .  $Q_{min} = (1/3 - 1/4) Q_{max}$ ;  
Рассчитывается перепад давления на участке РО:

$$\Delta P_i = \Delta P_{PO} \frac{Q_i}{Q_{max}}$$

Рассчитывается эффективное проходное сечение  $\alpha F_i$ :

$$\alpha F_i = \frac{Q_i}{5095 \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_i}}$$

Находится отношение  $\frac{\alpha F_i}{F_y}$ ,

где  $F_y$  – максимальная площадь проходного сечения:

$$F_y = \frac{\pi D_{PO}^2}{4}$$

По графикам в соответствии с заданным РО находим степень открытия РО  $\phi$ .  
Заполняется таблица 1 и строится график – рабочая характеристика  $Q_i = f(\phi)$

Таблица 1

$Q_i$	$\Delta P_i$	$\alpha F_i$	$F_y$	$\alpha F_i / F_y$	$\phi$
-------	--------------	--------------	-------	--------------------	--------

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания

## МДК.01.02 Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации

### Тема 2.1. Тестирование модели элементов систем автоматизации

#### Лабораторная работа № 1 Снятие кривой разгона объекта регулирования

##### Цель работы:

- 1) научиться снимать статические характеристики объекта при прямом и обратном ходах;
- 2) научиться строить кривую разгона по времени запаздывания  $\tau_3$ , времени инерционности  $T_{OB}$  и коэффициента передачи объекта  $K_{OB}$ ;
- 3) изучить метод наименьших квадратов для построения касательной к кривой разгона;
- 4) получить практические навыки анализа причин дрейфа статической характеристики

##### Выполнив работу, Вы будете:

уметь:

- снимать характеристики и производить подключение элементов автоматики

##### Материальное обеспечение:

Лабораторная установка «Автоматизация технологических процессов»

##### Задание:

- 1 Снять статическую характеристику объекта
- 2 Построение кривой разгона по динамическим характеристикам объекта.

##### Порядок выполнения работы:

###### I. Снятие статической характеристики

1. Включить установку.
2. С помощью блока ручного управления установить вал исполнительного механизма в положение 0%.
3. Изменяя положение вала исполнительного механизма через каждые 10% фиксировать показания вторичного прибора.
4. Продолжить хронометраж, изменяя положения вала исполнительного механизма от 100% до 0%.
5. Повторить пункты 3 и 4 пять раз.
6. Перенести снятые показания на ПК и с помощью приложения Excel построить 5 характеристик при прямом ходе на одном графике и 5 характеристик при обратном ходе на другом графике.
7. Провести анализ и сделать выводы о наличии и причинах дрейфа статической характеристики объекта.

###### II. Построение кривой разгона по динамическим характеристикам объекта

1. Значение динамических характеристик по вариантам (таблица 2):

Таблица 2

№ варианта	Время запаздывания $\tau_3$	Время инерционности $T_{OB}$	Коэффициент передачи $K_{OB}$
1	0,5	9,5	1
2	0,7	9	2

3	0,9	8,5	1
4	1,1	8	2
5	1,3	7,5	1
6	1,5	7	2
7	1,7	6,5	1
8	1,9	6	2
9	2,1	5,5	1
10	2,3	5	2
11	2,5	4,5	1
12	2,7	4	2

2. Перенести полученную кривую разгона на ПК и с помощью метода наименьших квадратов найти уравнение касательной к наибольшему прямолинейному участку кривой в виде  $y = a + bx$ .

3. Выбрать на наибольшем прямолинейном участке кривой 2 точки и определить их координаты X и Y.

4. Заполнить таблицу 2:

Таблица 2

№ точки	X	Y	X <sup>2</sup>	X · Y
1				
2				
Σ				

5. Полученные данные подставить в систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum Y &= na + b\sum X \\ \sum X \cdot Y &= a\sum X + b\sum X^2 \end{aligned}$$

6. Полученные коэффициенты a и b подставить в уравнение касательной  $y = a + bx$ .

7. По полученному уравнению построить касательную на том же графике, что и кривая разгона, подставляя значения X.

#### Форма представления результата:

Отчет о проделанной работе, определение по динамическим характеристикам основных динамических параметров объектов

### Лабораторная работа № 2

#### Разработка виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)

**Цель работы:** построение виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)

#### Выполнив работу, Вы будете:

*уметь:*

- строить виртуальную модель элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения

**Материальное обеспечение:**

Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

**Задание:**

- создать простейшую диаграмму (виртуальный лабораторный стенд), состоящую из генераторов, осциллографа и надписей;
- создать виртуальный лабораторный стенд, состоящий из генераторов, цифрового и стрелочного индикаторов;
- удостовериться, что виртуальные генераторы и измерительные приборы работают правильно;
- сохранить виртуальные стенды и их снимки в личной папке, распечатать;
- познакомиться с элементами управления измерительных приборов и генераторов.

**Порядок выполнения работы:**

1. Построить в Vissim'е переходные и весовые характеристики разомкнутых систем управления и систем с единичной отрицательной обратной связью с передаточными функциями.
2. Проанализировать влияние изменения их параметров на переходные характеристики в соответствии с вариантом.

**Форма представления результата:**

- отчет о проделанной работе, временные характеристики;
- выводы.

**Лабораторная работа № 3.**

**Осуществление выбора и применения программного обеспечения для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания.**

**Цель работы:** выбор и применения программного обеспечения для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации

**Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- выбирать элементы и строить виртуальную модель систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения;
- тестировать модель элементов систем автоматизации.

**Материальное обеспечение:**

Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

**Задание:**

- смоделировать последовательно все рассмотренные схемы со всеми регуляторами;
- протестировать последовательно все рассмотренные схемы со всеми регуляторами.

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить теоретическое введение. Особенное внимание обратить на пояснение принципа действия различных видов регуляторов и на переходные процессы, имеющие место в системах с этими регуляторами.

2. Смоделировать и протестировать последовательно все рассмотренные схемы со всеми регуляторами (рис. 3, 6, 9, 10, 11, 12).

3. Посмотреть, как влияет изменение параметров настройки различных регуляторов на вид переходного процесса в системе. Сделать вывод о достоинствах и недостатках каждого регулятора. Определить наилучший регулятор с наилучшими настройками.

**Форма представления результата:**

- цель и задачи работы;
- отчет о проделанной работе;
- выводы.

**Лабораторная работа № 4.**

**Разработка виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)**

**Цель работы:** разработка виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)

**Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

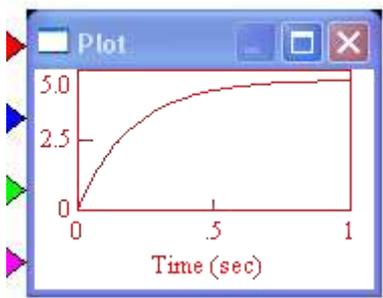
- рассчитывать параметры типовых схем и устройств;
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем;
- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов;
- рассчитывать и выбирать регулирующие органы;
- разрабатывать виртуальную модель систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения;

**Материальное обеспечение:**

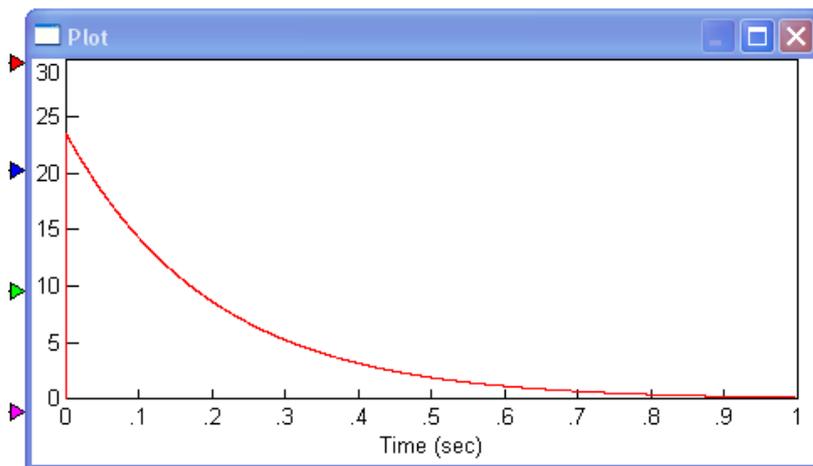
Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

**Задание:**

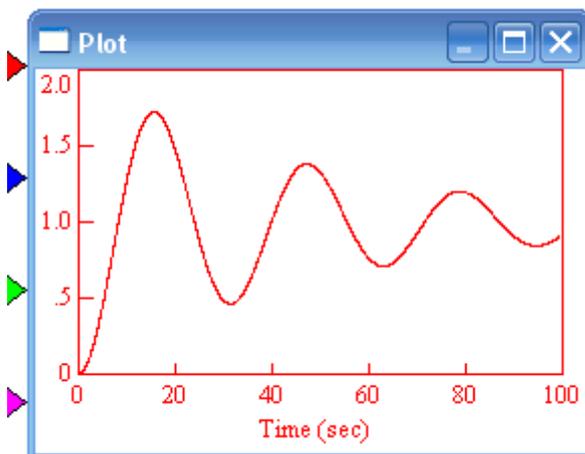
1. Определить по графику параметры САУ



2. Определить по графику параметры САУ



3. Определить по графику параметры САУ



**Порядок выполнения работы:**

1. Собрать схему с релейным регулятором и объектом с указанными по варианту параметрами (без модели ИМ).
2. Определить по переходным процессам параметры  $K_{180}$  и  $\omega_{180}$ . Привести в отчете все процессы и расчеты, связанные с определением этих параметров.
3. Рассчитать по таблице параметры настройки П-, ПИ- и ПИД-регулятора по методу ЦИГЛЕРА-НИКОЛЬСА. Собрать контуры с исследуемым объектом и регуляторами и получить переходные процессы по изменению задания. В отчете привести рассчитанные параметры настройки с полученными переходными процессами.

**Форма представления результата:**

- цель и задачи работы;
- отчет о проделанной работе;
- выводы.

## **Лабораторная работа № 5.**

### **Проведение виртуального тестирования разработанной модели различных элементов систем автоматизации**

**Цель работы:** тестирование виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)

#### **Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- рассчитывать параметры типовых схем и устройств;
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем;
- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов;
- рассчитывать и выбирать регулирующие органы;
- тестировать виртуальную модель систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения;

#### **Материальное обеспечение:**

Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

#### **Задание:**

1. Оценить устойчивость замкнутых систем с помощью критериев **Михайлова и Найквиста**, определить критический коэффициент усиления, запас устойчивости по амплитуде и фазе.

#### **Порядок выполнения работы:**

Критерий Михайлова:

1. Открыть файл MHAAYLOV-1.VSM и задать в нем коэффициенты первой системы  $K$ ,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  в соответствии с вариантом.
2. Определить устойчивость замкнутой системы управления с помощью критерия Михайлова (рис. 4.3).

Для выбора наилучшего представления графика можно воспользоваться функцией динамического масштабирования – нажать Ctrl и выделить область, которую нужно увеличить. Для закрепления выбранного масштаба следует щелкнуть правой кнопкой мыши на области построения и отметить галочкой пункт Fixed Bounds.

3. Изменить значение коэффициента  $K$ , чтобы система находилась на границе устойчивости.
4. Повторить те же действия (шаги 1-3) для систем №№ 2 и 3.
5. Создать новый файл. Собрать замкнутую систему с единичной обратной связью, задать коэффициенты первой системы в соответствии с вариантом.
6. Определить с помощью критерия Рауса (см. теоретическое введение предыдущей лабораторной работы) устойчивость разомкнутой САУ и число правых корней ее характеристического полинома.

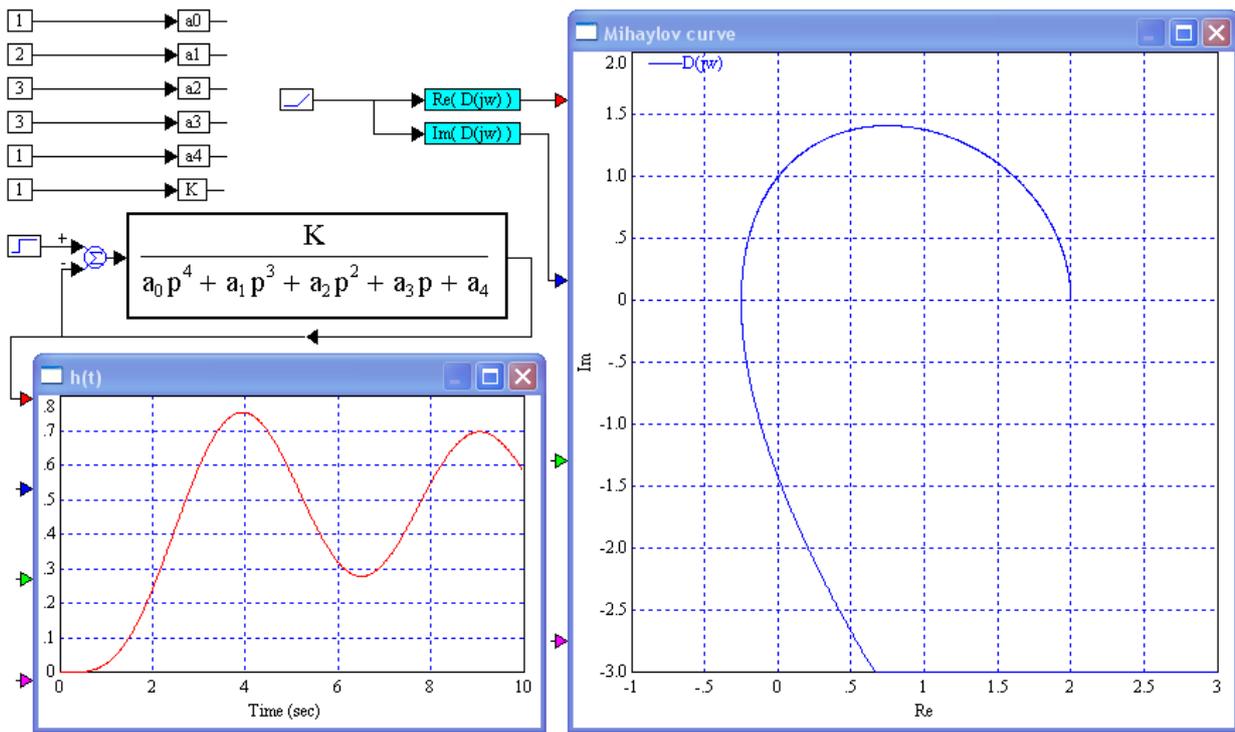


Рис. 4.3. Определение устойчивости по критерию Михайлова

7. Построить (рис. 4.4) АФЧХ (годограф Найквиста), ЛАЧХ и ЛФЧХ для разомкнутой системы ( $\omega = 0.01..100$ ).

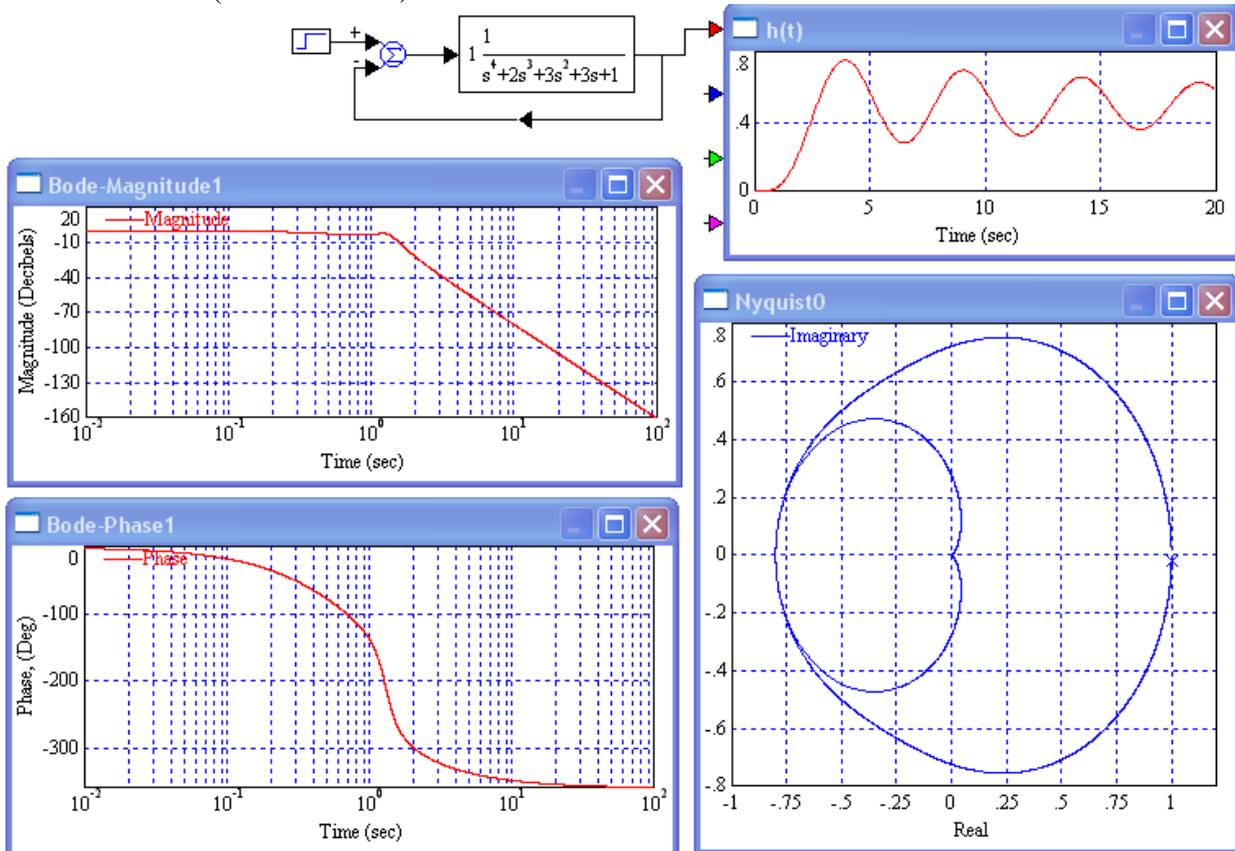


Рис. 4.4. Определение устойчивости по критерию Найквиста

8. Определить устойчивость замкнутой системы управления с помощью критерия Найквиста, а также запас устойчивости по амплитуде и фазе.
9. Изменить значение коэффициента  $K$ , чтобы система находилась на границе устойчивости.
10. Повторить те же действия (шаги 5-9) для систем №№ 2-5.

**Форма представления результата:**

- цель и задачи работы;
- отчет о проделанной работе;
- выводы.

**Лабораторная работа № 6.**

**Оценка функциональности компонентов разработанной модели элементов систем автоматизации**

**Цель работы:** оценивать работу виртуальных моделей элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания с применением прикладных программ (CAD/CAM – системы)

**Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- рассчитывать параметры типовых схем и устройств;
- выбирать элементы автоматики для конкретной системы управления, исполнительные элементы и устройства мехатронных систем;
- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов;
- рассчитывать и выбирать регулирующие органы;
- оценивать виртуальную модель систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения;

**Материальное обеспечение:**

Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации

**Задание:**

1. Оценить экспериментально устойчивость типовых САР и сравнить полученные результаты со значениями устойчивости Найквиста.
2. Оценить диапазон измерения параметра, в котором САР сохраняет устойчивость.

**Порядок выполнения работы:**

1. Построить виртуальную модель для исследования устойчивости САР.
2. Оценить экспериментально устойчивость типовых САР и сравнить полученные результаты со значениями устойчивости Найквиста.
3. Оценить диапазон измерения параметра, в котором САР сохраняет устойчивость

**Форма представления результата:**

- цель и задачи работы;
- отчет о проделанной работе;
- выводы.

### **Критерии оценки:**

- «5» - полностью выполненные задания, без ошибок или с 1 ошибкой
- «4» - полностью выполненные задания, с 2-3 ошибками
- «3» - задания, выполненные наполовину
- «2» - задания, не выполненные или задания, выполненные меньше, чем наполовину

## **Практическое занятие № 1** *Исследование динамических звеньев*

**Цель работы:** научиться определять вид выходного сигнала при подаче на вход звена произвольного сигнала

### **Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

### **Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по определению выходного сигнала какого-либо звена

### **Задание:**

- 1 Изучить реакции пропорционального, инерционного, интегрирующего и дифференцирующего звеньев
- 2 Ответить на контрольные вопросы

### **Краткие теоретические сведения:**

Любой контур регулирования, вернее его динамические свойства, можно представить в виде комбинации различных соединений элементарных динамических звеньев.

Под контуром регулирования понимается соединение объекта управления и регулирующего устройства.



Существует шесть типовых элементарных звеньев: пропорциональное, инерционное I порядка, инерционное II порядка, запаздывания, интегрирующее и дифференциальное.

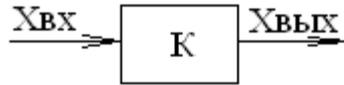
Все звенья изображаются в виде прямоугольников, внутри которых записывается передаточная функция данного звена.

Передаточная функция – это тот закон, по которому изменяется выходная величина.

### **Пропорциональное звено**

Это самое простое звено.

Пропорциональное звено имеет следующий вид:



Зависимость выходного параметра от входного имеет следующий вид:

$$X_{BXX} = X_{BX} \cdot K.$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = kp.$$

Данное звено также называется усилительным.

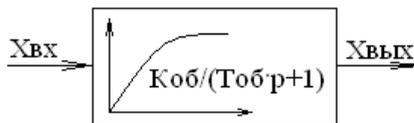
### Инерционное звено I порядка

Инерционность – это способность параметра сохранять начальное установившееся состояние или изменение в выбранном направлении.

Инерционность – враг технологических процессов, но иногда ее целесообразно использовать для подавления высокочастотных помех.

Для количественной оценки величины инерционности используют постоянную времени или время инерционности.

Инерционное звено I порядка имеет следующий вид:



где  $K_{OB}$  – постоянный коэффициент;

$T_{OB}$  – постоянная времени или время инерционности.

Зависимость выходной величины от входной имеет следующий вид:

$$X_{BXX}(\tau) = \frac{K_{OB}}{T_{OB} p + 1} X_{BX}(\tau).$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{K_{OB}}{T_{OB} p + 1}.$$

где  $p$  – символ дифференцирования, показывающий скорость изменения параметра во времени;

$1/p$  – символ интегрирования.

Инерционное звено I порядка описывается дифференциальным уравнением I порядка:

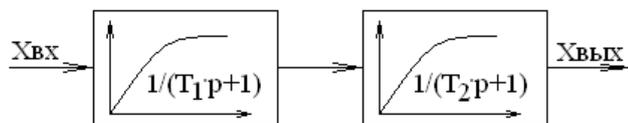
$$T_{OB} \frac{dX_{BXX}(\tau)}{d\tau} + X_{BXX}(\tau) = K_{OB} X_{BX}(\tau).$$

Особенностью инерционного звена I порядка является то, что выходная величина меняется с запаздыванием.

Процесс считается установившемся при  $\tau = (3 - 4)T_{OB}$ .

### Инерционное звено II порядка

Инерционное звено I порядка часто не может полностью описать свойства объекта управления. Для этого используется инерционное звено II порядка, представляющее собой последовательное соединение инерционных звеньев I порядка с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$ .



Зависимость выходной величины от входной имеет следующий вид:

$$X_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} X_{\text{ВХ}}(\tau).$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{1}{T_1 T_2 p^2 + p(T_1 + T_2) + 1}.$$

Инерционное звено II порядка описывается дифференциальным уравнением II порядка: при  $T_1 = T_2 = T$

$$T^2 \frac{d^2 X_{\text{ВЫХ}}(\tau)}{d\tau^2} + 2T\xi \frac{dX_{\text{ВЫХ}}(\tau)}{d\tau} + X_{\text{ВЫХ}}(\tau) = X_{\text{ВХ}}(\tau).$$

Если  $\zeta \neq 0$ , то передаточная функция будет иметь следующий вид:

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

при  $T_1 \neq T_2$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 X_{\text{ВЫХ}}(\tau)}{d\tau^2} + (T_1 + T_2)\xi \frac{dX_{\text{ВЫХ}}(\tau)}{d\tau} + X_{\text{ВЫХ}}(\tau) = X_{\text{ВХ}}(\tau).$$

где  $\zeta$  – показатель степени затухания, определяющий вид переходного процесса. Если  $\zeta < 1$  – затухающий колебательный процесс, если  $\zeta > 1$  – аperiodический переходной процесс.

Если  $\zeta \neq 0$ , то передаточная функция будет иметь следующий вид:

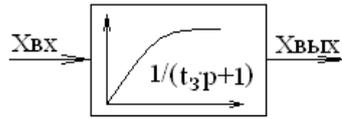
$$W(p) = \frac{1}{T_1 T_2 p^2 + \zeta p(T_1 + T_2) + 1}.$$

Особенностью инерционного звена II порядка является то, что выходная величина меняется с большим запаздыванием.

### Звено запаздывания

Звено запаздывания представляется в виде инерционного звена I порядка, но только вместо времени инерционности ставится время запаздывания.

Звено запаздывания имеет следующий вид:



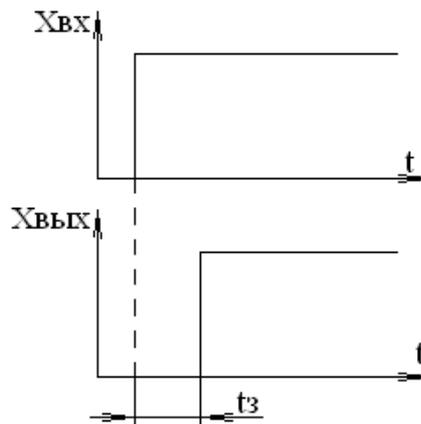
Зависимость выходной величины от входной имеет следующий вид:

$$X_{ВЫХ}(\tau) = \frac{1}{\tau_3 p + 1} X_{ВХ}(\tau).$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{1}{\tau_3 p + 1}.$$

Особенностью звена запаздывания является то, что выходной сигнал передается идентичный или практически идентичный входному, только через некоторое время – время запаздывания.



### Интегрирующее звено

Отличительной чертой интегрирующего звена является то текущее значение выходного параметра звена пропорционально интегралу от входного сигнала:

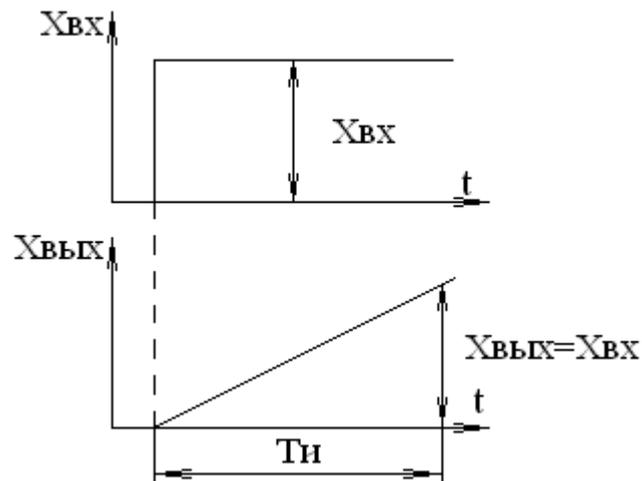
$$X_{ВЫХ}(\tau) = K_{p1} \int_0^{\tau} X_{ВЫХ}(\tau) d\tau,$$

$$K_{p1} = \frac{dX_{ВЫХ}(\tau)}{X_{ВХ}(\tau) d\tau},$$

где  $K_{p1}$  – коэффициент пропорциональности (показывает скорость, приходящуюся на единицу входного сигнала, т.е. это скорость изменения выходного сигнала), находящийся по следующей формуле:

$$K_{p1} = \frac{1}{T_{И}},$$

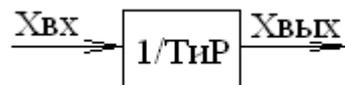
где  $T_{и}$  – время интегрирования, находящееся из следующих графиков:



Другими словами, время интегрирования – это время, за которое выходная величина достигнет значения входной величины.

Чем меньше время интегрирования, тем больше скорость изменения выходного параметра.

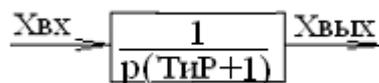
Идеальное интегрирующее звено имеет следующий вид:



Передаточная функция этого звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{T_{и}P}$$

Реальное интегрирующее звено имеет следующий вид:



Передаточная функция этого звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{p(T_{и}P + 1)}$$

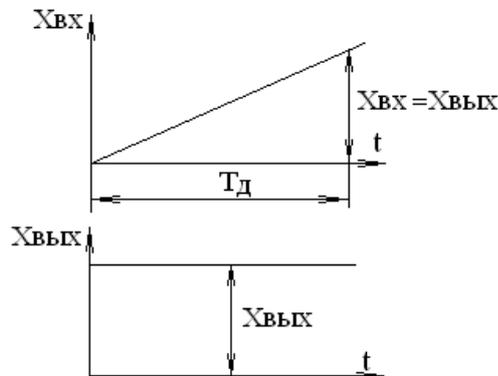
### Дифференцирующее звено

Отличительной чертой дифференциального звена является то, что выходная величина пропорциональна скорости изменения входной величины:

$$X_{ВЫХ}(\tau) = T_{д} \frac{dX_{ВХ}(\tau)}{d\tau},$$

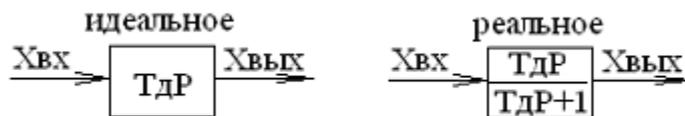
где  $T_d$  – это время дифференцирования, определяющее чувствительность дифференциального звена к изменению входного параметра.

Время дифференцирования находят следующим способом:



Таким образом, время дифференцирования численно определяет то время, за которое входная величина достигнет выходную величину, т.е. данное звено содержит элемент предварения, позволяющий выходной величине сразу отработать настолько, насколько входная величина отработает через некоторое время (время дифференцирования).

Существует идеальное и реальное звено дифференцирования:



Передаточные функции этих звеньев имеют следующий вид:

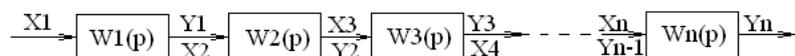
$$W(p) = T_d p \text{ - для идеального звена;}$$

$$W(p) = \frac{T_d p}{T_d p + 1} \text{ - для реального звена.}$$

### Соединения звеньев

Различают последовательное, параллельное и встречно-параллельное соединение типовых звеньев.

При последовательном соединении звеньев выходная величина каждого предыдущего звена является входной величиной для последующего звена:

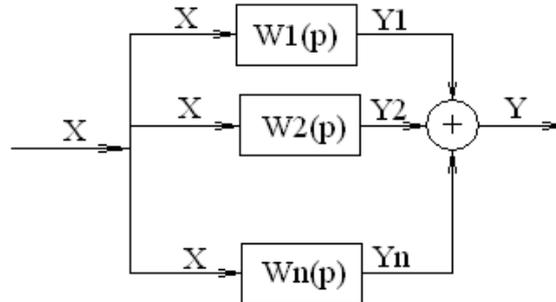


Передаточная функция звеньев при последовательном соединении равна произведению всех передаточных функций самих звеньев:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot \dots \cdot W_n(p).$$

При параллельном

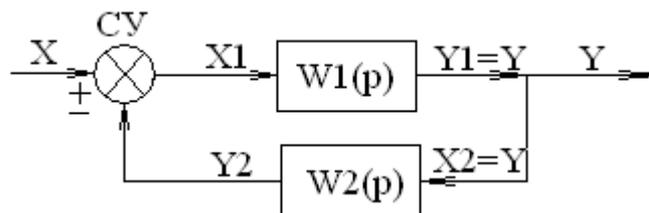
соединении звеньев входная величина для всех звеньев является общей, а выходная равна сумме всех выходных величин звеньев:



Передаточная функция звеньев при параллельном соединении равна сумме всех передаточных функций самих звеньев:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p) + \dots + W_n(p).$$

Встречно-параллельное соединение – это соединение, в которое входят положительная и отрицательная обратная связь:



Передаточная функция такого соединения имеет вид:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p)W_2(p)},$$

где знак «-» соответствует положительной обратной связи;  
знак «+» соответствует отрицательной обратной связи.

#### Порядок выполнения работы:

1. Изучить реакции пропорционального, инерционного, интегрирующего и дифференцирующего звеньев.
2. Определить выходной сигнал у пропорционального звена (рисунок 1):

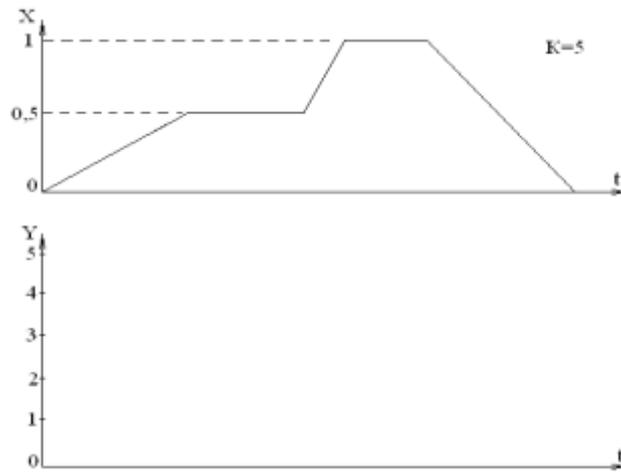


Рисунок 1 – Пропорциональное звено.

3. Определить выходной сигнал у пропорционального звена (рисунок 2):

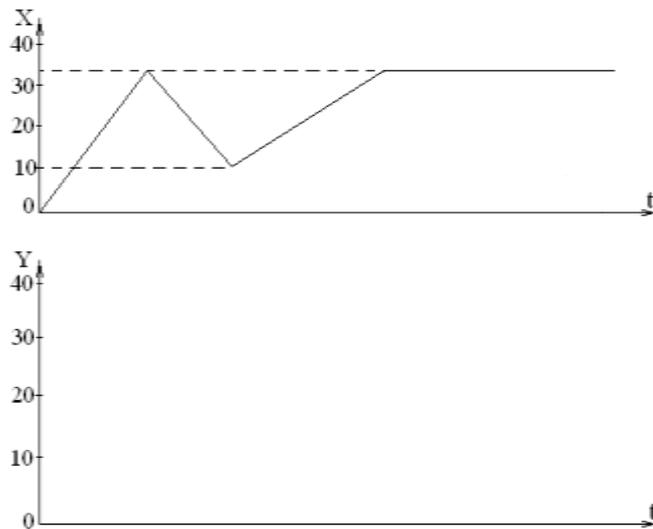


Рисунок 2 – Инерционное звено.

4. Определить выходной сигнал у интегрирующего звена (рисунок 3):

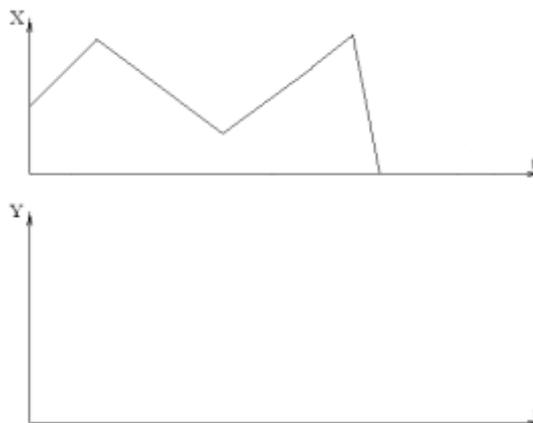


Рисунок 3 – Интегрирующее звено.

5. Определить выходной сигнал у дифференцирующего звена (рисунок 4):

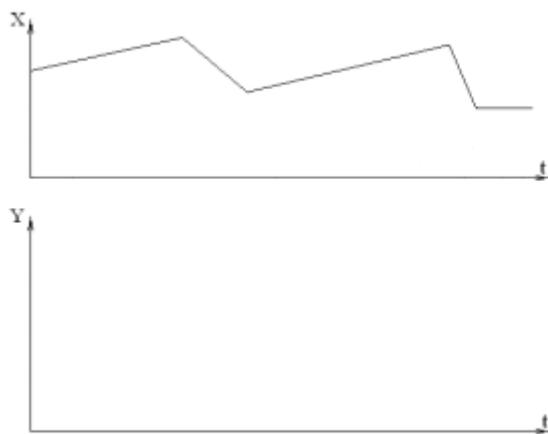


Рисунок 4 – Дифференцирующее звено.

6. Ответить на контрольные вопросы:

а) в чем особенность инерционных звеньев?

б) объяснить построение выходного сигнала интегрирующего и дифференцирующего звеньев.

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале

**Практическое занятие № 2**

***Расчет траектории выходного параметра инерционного звена I порядка методом Эйлера***

**Цель работы:** научиться строить выходной сигнал инерционного звена I порядка при любом входном сигнале

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов

**Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по определению выходного сигнала инерционного звена

**Задание:**

- 1 Изучить метод Эйлера
- 2 Ответить на контрольные вопросы

**Краткие теоретические сведения:**

Данный метод позволяет рассчитать траекторию изменения выходного параметра у инерционного звена при любой форме входного возмущающего воздействия. В основу метода положено следующее выражение:

$$\frac{dX_{\text{вых}}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_{\text{об}}} [X_{\text{вх}}(\tau) - X_{\text{вых}}(\tau)].$$

Данное уравнение – уравнение скорости изменения выходного параметра.

Таким образом, скорость выходного параметра прямо пропорциональна разности между текущими значениями входного и выходного параметров и обратно пропорциональна постоянной времени инерционного звена.

В качестве примера рассмотрим траекторию изменения выходного сигнала терморпары, имеющей постоянную времени 2с, при мгновенном погружении ее из среды тающего льда в кипящую воду, т.е.  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_k = 100^{\circ}\text{C}$ .

При  $\tau=0$   $X_{\text{вых}}(\tau)=0$ ,  $X_{\text{вх}}(\tau)=100^{\circ}\text{C}$

$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=0) = \frac{1}{2} [100 - 0] = 50 .$$

$$\text{При } \tau=1 \quad X_{\text{блх}}(\tau) = X_{\text{блх}}(0) + \frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=0) = 0 + 50 = 50$$

$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=1) = \frac{1}{2} [100 - 50] = 25$$

$$\text{При } \tau=2 \quad X_{\text{блх}}(\tau) = X_{\text{блх}}(1) + \frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=1) = 50 + 25 = 75$$

$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=2) = \frac{1}{2} [100 - 75] = 12,5$$

При  $\tau=3$

$$X_{\text{блх}}(\tau) = X_{\text{блх}}(2) + \frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=2) = 75 + 12,5 = 87,5$$

$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=3) = \frac{1}{2} [100 - 87,5] = 6,25$$

$$\text{При } \tau=4 \quad X_{\text{блх}}(\tau) = X_{\text{блх}}(3) + \frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=3) = 87,5 + 6,25 = 93,75$$

$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=4) = \frac{1}{2} [100 - 93,75] = 3,125$$

$$\text{При } \tau=5 \quad X_{\text{блх}}(\tau) = X_{\text{блх}}(4) + \frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=4) = 93,75 + 3,125 = 96,875$$

$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=5) = \frac{1}{2} [100 - 96,875] = 1,5625$$

$$\text{При } \tau=6 \quad X_{\text{блх}}(\tau) = X_{\text{блх}}(5) + \frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=5) = 96,875 + 1,5625 = 98,4375$$

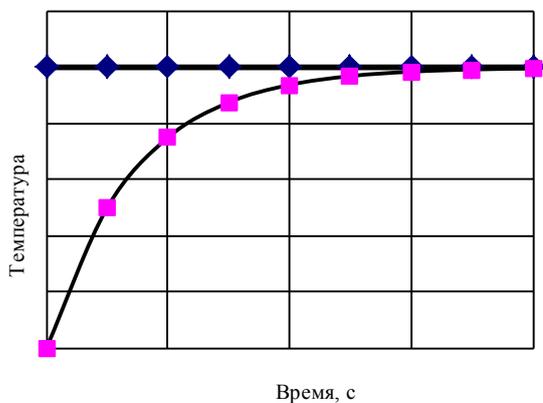
$$\frac{dX_{\text{блх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=6) = \frac{1}{2} [100 - 98,4375] = 0,78125$$

$$\text{При } \tau=7 \quad X_{\text{облх}}(\tau) = X_{\text{облх}}(6) + \frac{dX_{\text{облх}}(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=6} = 98,4375 + 0,78125 = 99,21875$$

$$\frac{dX_{\text{облх}}(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=7} = \frac{1}{2} [100 - 99,21875] = 0,390625$$

$$\text{При } \tau=8 \quad X_{\text{облх}}(\tau) = X_{\text{облх}}(7) + \frac{dX_{\text{облх}}(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=7} = 99,21875 + 0,390625 = 99,609375$$

$$\frac{dX_{\text{облх}}(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=8} = \frac{1}{2} [100 - 99,609375] = 0,1953125$$



**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить метод Эйлера, его назначение.
2. Определить выходной сигнал инерционного звена I порядка при любом входном сигнале (рисунок 5).

Температура

Время, с

Рисунок 5 – Входной сигнал

3. Ответить на контрольные вопросы:

- а) что позволяет сделать метод Эйлера?
- б) какое выражение положено в основу данного метода?

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале.

**Практическое занятие № 3**  
***Расчет траектории выходного параметра инерционного звена II порядка методом Эйлера***

**Цель работы:** научиться строить выходной сигнал инерционного звена II порядка при любом входном сигнале

**Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов

**Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по определению выходного сигнала инерционного звена II порядка

**Задание:**

- 1 Изучить метод Эйлера
- 2 Ответить на контрольные вопросы.

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить метод Эйлера, его назначение.
2. Для получения выходного сигнала инерционного звена II порядка методом Эйлера в качестве входного необходимо взять сигнал, рассчитанный для инерционного звена I порядка (практическая работа №2).
3. Ответить на контрольные вопросы:
  - а) что позволяет сделать метод Эйлера?
  - б) какое выражение положено в основу данного метода?

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

**Практическое занятие № 4**  
***Расчет передаточных функций систем при наличии обратных связей***

**Цель работы:** научиться определять передаточную функцию сложных замкнутых систем

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- проводить необходимые технические расчеты электрических схем включения датчиков и схем преобработки данных несложных мехатронных устройств и систем.

**Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по определению передаточной функции замкнутых систем

**Задание:**

1. Изучить методику расчета замкнутых сложных систем при наличии обратной связи.

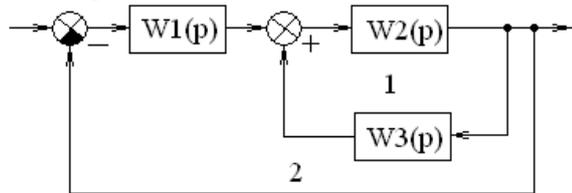
**Краткие теоретические сведения:**

Передаточная функция замкнутой системы рассчитывается по следующей формуле:

$$W_3(p) = \frac{W_P(p)}{W_{OC}(p) \pm W_P(p)},$$

где  $W_P(p)$  – передаточная функция разомкнутой системы;  
 $W_{OC}(p)$  – передаточная функция обратной связи.

Рассмотрим некоторые примеры расчета передаточных функций систем с отрицательной и положительной обратными связями:



Сначала рассматриваются внутренние обратные связи (1), затем внешняя (2).

$$W_P^1(p) = W_2(p),$$

$$W_{OC}^1(p) = W_3(p),$$

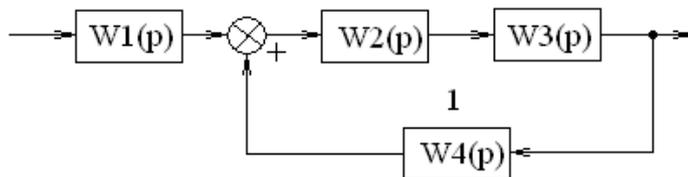
$$W_3^1(p) = \frac{W_2(p)}{W_3(p) - W_2(p)}.$$

$$W_P^2(p) = W_1(p) \cdot W_3^1(p) = W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{W_3(p) - W_2(p)},$$

$$W_3(p) = W_3^2 = \frac{W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{W_3(p) - W_2(p)}}{1 + W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{W_3(p) - W_2(p)}}.$$

Упростив полученное выражение, получаем:

$$W_3(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p)}{W_2(p) + W_3(p) + W_1(p) \cdot W_2(p)}.$$

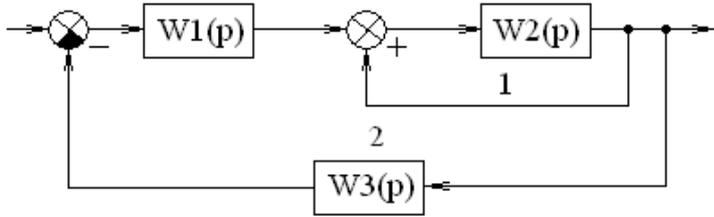


$$W_P^1(p) = W_2(p) \cdot W_3(p),$$

$$W_{OC}^1(p) = W_4(p),$$

$$W_3^1(p) = \frac{W_2(p) \cdot W_3(p)}{W_4(p) - W_2(p) \cdot W_3(p)}.$$

$$W_3(p) = W_P^2(p) = W_1(p) \cdot W_3^1(p) = W_1(p) \cdot \frac{W_2(p) \cdot W_3(p)}{W_4(p) - W_2(p) \cdot W_3(p)}.$$



$$W_P^1(p) = W_2(p),$$

$$W_{OC}^1(p) = 1,$$

$$W_3^1(p) = \frac{W_2(p)}{1 - W_2(p)}.$$

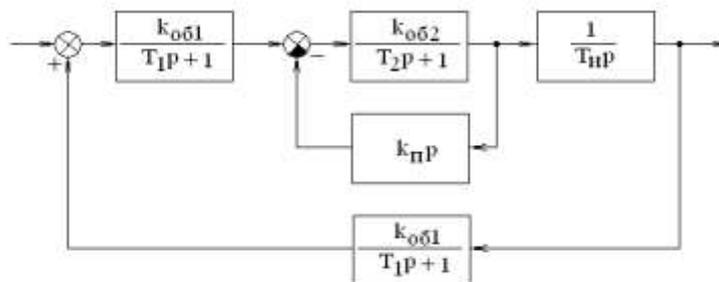
$$W_P^2(p) = W_1(p) \cdot W_3^1(p) = W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{1 - W_2(p)},$$

$$W_{OC}^2(p) = W_3(p),$$

$$W_3(p) = W_3^2 = \frac{W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{1 - W_2(p)}}{W_3(p) + W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{1 - W_2(p)}}.$$

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучить расчет передаточных функций замкнутых систем.
2. Рассчитать передаточную функцию следующей системы (рисунок 1):



$$k_{OB1} = 1 \quad T_1 = 5c$$

$$k_{OB2} = 2 \quad T_2 = 7c$$

$T_{II} = 3c \quad k_{II} = 4$

Рисунок 1.

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале.

**Практическое занятие № 5**  
**Типовые законы регулирования**

**Цель работы: изучить типовые законы регулирования**

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

**Материальное обеспечение:**

Методические указания по выполнению работы, индивидуальное задание

**Задание:**

- 1 Изучить типовые законы регулирования и их реализацию в устройствах
- 2 Ответить на контрольные вопросы.

**Краткие теоретические сведения:**

Используемые в настоящее время в промышленности автоматические непрерывные регуляторы относятся к устройствам функционального непрерывного действия. Т.е. между входными и выходными параметрами регулятора существует функциональная непрерывная связь.

Входными параметрами регулятора являются сигналы, пропорциональные текущим заданному и действительному значениям регулируемой величины.

В измерительной (входной) схеме регулятора формируется сигнал рассогласования (ошибка регулирования) в соответствии с условием:

$$\xi(\tau) = X_{\text{Зад}}(\tau) - X_{\text{Дейст}}(\tau),$$

где  $\xi(\tau)$  – сигнал рассогласования;

$\tau$  – время;

$X_{\text{Зад}}(\tau)$  и  $X_{\text{Дейст}}(\tau)$  – заданное и действительное текущие значения регулируемой величины.

Выходной величиной регулятора являются командные импульсы, управляющие работой исполнительного механизма, перемещающего регулирующей орган. Поэтому наиболее удобно выходной параметр регулятора оценивать в % хода вала исполнительного механизма (ИМ) в пределах допустимого перемещения, ограниченного концевыми выключателями ИМ.

Между входной и выходной величинами регулятора существует определенная функциональная связь, называемая **законом регулирования**.

Закон регулирования формируется непосредственно в контуре управления путем использования различных типов обратной связи.

Эффективность работы регулирующего органа при выбранном законе регулирования зависит от значений параметров динамической настройки регулятора, входящих в виде постоянных коэффициентов в уравнения, определяющих закон регулирования.

Величины динамических параметров настройки регулятора должны соответствовать динамическим параметрам объекта управления.

Правильный выбор коэффициентов настройки регулятора является главной задачей технологической наладки контура управления на реальном производственном объекте.

Существующие реально в производственных условиях регуляторы подразделяются на 5 типов: интегральный (И – регулятор), пропорциональный (П – регулятор), пропорционально-интегральный (ПИ – регулятор), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД – регулятор) и пропорционально - дифференциальный (ПД – регулятор).

### **Интегральный регулятор**

Данный регулятор не имеет обратной связи и реализует интегральный закон регулирования. Интегральный регулятор также называют астатическим. В основе его лежит интегрирующее звено.

Зависимость между входной и выходной величинами И – регулятора определяется выражением:

$$Y(\tau) = k_{P1} \int_0^{\tau} \xi(\tau) d\tau$$

или

$$\frac{dY(\tau)}{d\tau} = k_{P1} \xi(\tau),$$

где  $\xi(\tau)$  – сигнал рассогласования,  
 $Y(\tau)$  – угол поворота вала ИМ.

Отличительной особенностью И – регулятора является то, что скорость перемещения вала исполнительного механизма пропорциональна величине отклонения регулируемой величины от задания (сигнал рассогласования).

Динамическим параметром настройки И – регулятора является коэффициент передачи  $k_{P1}$ , численно равный величине скорости перемещения вала исполнительного механизма, приходящейся на единицу отклонения регулируемой величины от задания, т.е.

$$k_{P1} = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta \tau}}{\xi(\tau)}.$$

При  $\Delta \xi = 1$   $k_{P1} = \Delta Y(\tau)/\Delta \tau$ , т.е. при  $\Delta \tau = 1$ с  $k_{P1}$  численно равен приращению  $\Delta Y(\tau)$  угла поворота вала ИМ в единицу времени (скорости исполнительного механизма).

Но для характеристики интегрирующего звена обычно используется постоянная времени интегрирования или время интегрирования  $T_{И}$ .

Для перевода входного параметра И – регулятора  $\Delta \xi$  в физические величины выходного параметра  $\Delta Y$  используется выражение:

$$K_{ОБ} = \Delta \xi / \Delta Y \rightarrow \Delta Y_{Э} = \Delta \xi / K_{ОБ},$$

где  $\Delta Y_{Э}$  – эквивалентный  $\Delta \xi$  угол поворота вала исполнительного механизма.

Таким образом, постоянная времени интегрирования  $T_{И}$  также является характеристикой скорости исполнительного механизма.  $T_{И}$  – время, за которое угол поворота вала исполнительного механизма  $\Delta Y(\tau)$  станет равным эквивалентному углу поворота вала  $\Delta Y_{Э}$ .

Соотношение между  $k_{P1}$  и  $T_{И}$  имеет вид  $k_{P1} = 1/T_{И}$  т.е. чем больше  $T_{И}$ , тем меньше  $k_{P1}$ .

Передаточная функция И – регулятора имеет следующий вид:

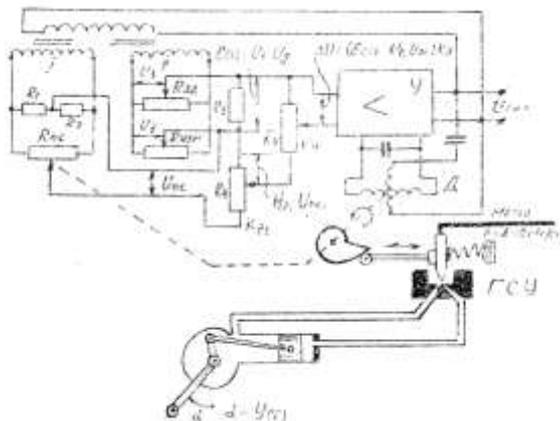
$$W(p)_{И} = \frac{1}{T_{И} \cdot p}.$$

Интегральный регулятор работает практически без остаточного отклонения (с учетом зоны нечувствительности используемых технических средств), но достаточно медленно. Увеличение быстродействия за счет увеличения  $k_{P1}$  (уменьшение  $T_{И}$ ) приводит к возникновению колебательного режима работы.

В качестве примера технической реализации И – закона регулирования рассмотрим работу электрогидравлического регулятора.

В данном регуляторе для формирования сигналов о текущих заданном и действительном значениях регулируемой величины и для формирования закона регулирования используется электрическая энергия, а для перемещения исполнительного механизма – гидравлическая энергия давления масла.

Принципиальная схема электрогидравлического регулятора имеет следующий вид:



Входная электрическая схема регулятора содержит два моста: измерительный (II) и мост обратной связи (I). Мосты питаются напряжением переменного тока.

С потенциометра  $R_{зд}$  снимается сигнал  $U_3$ , пропорциональный заданному текущему значению регулируемого параметра.

С потенциометра  $R_{изм}$ , встроенного в прибор и измеряющего текущее значение регулируемого параметра, снимается сигнал  $U_д$ , пропорциональный действительному текущему значению регулируемого параметра.

На сопротивлении  $R_3$  формируется сигнал рассогласования  $\xi(\tau)$ , равный разности сигналов  $U_3$  и  $U_д$ , т.е.  $\xi(\tau) = U_3(\tau) - U_д(\tau)$ .

Мост обратной связи содержит два равных сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  (для формирования средней точки напряжения питания моста) и сопротивление  $R_{ос}$ , движок которого механически связан с валом двигателя  $Д$ . На выходе моста формируется напряжение обратной связи  $U_{ос}$ , часть которого  $k_{р1} \cdot U_{ос}$  сравнивается с напряжением рассогласования  $\xi(\tau)$ . При среднем положении движка  $R_{ос}$  значение  $U_{ос}$  равно 0.

На вход электронного усилителя подается сигнал  $\Delta U = k_y(\xi(\tau) - k_{р1} \cdot U_{ос})$ . Сопротивление  $R_y$  определяет значение масштабного коэффициента  $k_y$ , задающего чувствительность регулятора.

При наличии сигнала  $\Delta U$  он усиливается до величины, достаточной для перемещения конденсаторного двигателя  $Д$ , включенного на выходе усилителя  $У$ . Двигатель  $Д$  при вращении поворачивает профилированное лекало, воздействующее на перемещение струйной трубки гидравлического усилителя  $ГСУ$ , и перемещает в соответствующем направлении движок реостата обратной связи.

Направление вращения двигателя выбрано таким, чтобы сигнал  $k_{р1} \cdot U_{ос}$  компенсировал сигнал рассогласования  $\xi(\tau)$  и в момент равенства сигнала  $\Delta U$  нулю на входе усилителя двигатель останавливается, т.е. обеспечивается условие  $\xi(\tau) = k_{р1} \cdot U_{ос}$ .

Одновременно лекало, поворачиваясь, отклоняет струйную трубку  $ГСУ$  от среднего положения на величину, пропорциональную рассогласованию  $\xi(\tau)$ .

При отклонении струйной трубки  $ГСУ$  от среднего положения гидравлический поршневой кривошипный ИМ начинает перемещаться со скоростью, пропорциональной отклонению струйной трубки, а значит и величине  $\xi(\tau)$ .

При отклонении струйной трубки от среднего положения образуется разность давлений в сопловых отверстиях  $ГСУ$  и линиях к исполнительному механизму.

ИМ начинает перемещаться со скоростью, пропорциональной величине разности давлений, т.е. отклонению трубки от среднего положения.

По мере движения исполнительного механизма величина  $\xi(\tau)$  начинает уменьшаться, т.е. значение  $\Delta U$  меняет свой знак. Изменение фазы сигнала  $\Delta U$  на входе усилителя заставит двигатель Д перемещаться в обратном направлении. И по мере достижения величиной  $U_d$  значения  $U_3$  струйная трубка и движок реостата  $R_{oc}$  снова вернуться в исходное среднее положение. Двигатель останавливается, процесс регулирования закончен.

Недостатком И – регулятора является необходимость точного согласования скорости исполнительного механизма и инерционных свойств объекта. Поэтому эти регуляторы не обеспечивают необходимой оперативности (быстроты) управления. Стремление увеличить скорость исполнительного механизма для повышения оперативности приводит к возникновению существенных колебаний регулируемой величины. Поэтому чисто интегральные регуляторы в настоящее время используются достаточно редко.

### Пропорциональные регуляторы

П – регуляторы реализуют пропорциональный закон регулирования в соответствии с условием:

$$Y = k_p \cdot \xi(\tau).$$

Отличительной особенностью П – регулятора является то, что угол поворота вала исполнительного механизма пропорционален величине отклонения регулируемой величины от задания.

Пропорциональный закон регулирования реализуется путем использования «жесткой» обратной связи по положению вала исполнительного механизма.

На вход П – регулятора дополнительно подается сигнал с датчика положения вала исполнительного механизма.

Пропорциональный регулятор имеет один параметр динамической настройки – коэффициент передачи  $k_p$ .

$k_p$  численно равен углу поворота вала исполнительного механизма, приходящегося на единицу отклонения регулируемой величины от задания, т.е. имеет размерность.

$$k_p = \frac{\Delta Y}{\Delta \xi(\tau)}.$$

Поскольку скорость реальных промышленных исполнительных механизмов постоянна и ограничена, то переходные характеристики идеального и реального П - регулятора в начальный момент времени отличаются.

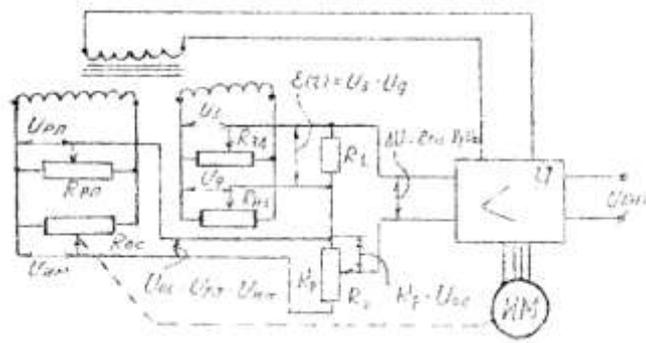
Передаточная функция П – регулятора имеет следующий вид:

$$W(p)_P = k_p.$$

П – регулятор обеспечивает быстрое, но не точное регулирование. Причиной этого является наличие статической (установившейся) погрешности.

В качестве технической реализации П – закона регулирования рассмотрим работу регулятора БР-11.

Принципиальная схема бесконтактного регулятора БР-11 имеет следующий вид:



Измерительная схема регулятора содержит две мостовые схемы. Сигнал рассогласования формируется как разность напряжений, снимаемых с потенциометра задатчика  $R_{ЗД}$  и потенциометра  $R_{ИЗ}$ , встроенного в измерительный прибор, контролирующей текущее значение регулируемого параметра:

$$\xi(\tau) = U_3 - U_Д,$$

где  $U_3$  – сигнал, пропорциональный заданному значению регулируемого параметра (определяется углом поворота движка сопротивления задатчика  $R_{ЗД}$ );

$U_Д$  – сигнал, пропорциональный действительному значению регулируемого параметра (формируется реостатом датчика  $R_{ИЗ}$ , встроенным в измерительный прибор).

Сигнал обратной связи  $U_{ОС}$  по положению вала исполнительного механизма формируется мостовой схемой, образованной сопротивлениями  $R_{П}$  и  $R_{ОС}$ . Сигнал  $U_{ОС}$  представляет собой разность напряжений  $U_{П}$  и  $U_{ОС}$ :

$$U_{ОС} = U_{П} - U_{ОС}.$$

Сопротивление  $R_{П}$  – реостат ручной перестановки, определяет начальное положение исполнительного механизма при сигнале рассогласования  $\xi(\tau) = 0$ .

Реостатный датчик  $R_{ОС}$  встроен в исполнительный механизм, и движок реостата механически связан с выходным валом исполнительного механизма. Сигнал  $U_{ИМ}$  пропорционален углу поворота вала исполнительного механизма.

Сигнал обратной связи  $U_{ОС}$  подается на сопротивление  $R_2$ , и часть этого сигнала  $k_P \cdot U_{ОС}$ , определяемая установленным значением  $k_P$ , сравнивается с сигналом рассогласования  $\xi(\tau)$ .

На вход усилителя регулятора поступает сигнал  $\Delta U = \xi(\tau) - k_P \cdot U_{ОС}(\tau)$ . Этот сигнал усиливается до величины, достаточной для включения исполнительного механизма. Направление движения исполнительного механизма выбирается таким, чтобы сигнал  $U_{ОС}$  компенсировал сигнал рассогласования  $\xi(\tau)$ . При  $\Delta U = 0$ , т.е. когда  $\xi(\tau) = k_P \cdot U_{ОС}$ , двигатель останавливается.

Сущность появления статической ошибки  $\Pi$  – регулятора объясняется на следующем примере.

Пусть входная схема до момента времени  $\tau = 0$  была сбалансирована, т.е.  $U_{ОС} = 0$  и  $\xi(\tau) = 0$ . Затем в момент времени  $\tau = 0$  скачкообразно изменяется заданное значение регулируемой величины  $U_3$ .

В начальный момент времени из-за наличия инерционности объекта и контура регулирования сигнал  $U_Д$  остается прежним. И на вход усилителя поступает сигнал  $\xi(\tau)$ , равный  $\xi(\tau) = U_3(\tau) - U_Д(\tau)$ , т.к.  $U_{ОС} = 0$ .

Исполнительный механизм включается и формирует сигнал  $U_{ОС}$ , который компенсирует сигнал рассогласования  $\xi(\tau)$ . Это производится точно и быстро. При соблюдении условия  $\xi(\tau) = k_P \cdot U_{ОС}$  исполнительный механизм останавливается.

Но одновременно с компенсацией сигнала рассогласования на входе регулятора исполнительный механизм, воздействуя через регулирующий орган на объект управления, обеспечивает изменение регулируемого параметра в направлении уменьшения величины рассогласования  $\xi(\tau)$ .

По мере приближения действительного значения регулируемого параметра к заданию сигнал  $\xi(\tau)$  начинает уменьшаться (разность  $U_3 - U_D$ ).

Это значит, что сигнал  $k_P \cdot U_{OC}$  станет больше, чем  $\xi(\tau)$ , т.е. сигнал  $\Delta U$  изменит свой знак (фазу переменного тока). Регулятор вынужден для сохранения условия  $\Delta U = 0$  начать перемещение исполнительного механизма в обратном направлении, даже если регулируемая величина еще не достигла заданного значения.

Перемещение исполнительного механизма в обратном направлении приведет к замедлению изменения действительного значения регулируемой величины. И в конечном итоге, в системе установится некоторый баланс напряжений  $\xi(\tau)$  и  $k_P \cdot U_{OC}$ , т.е. П – регулятор не обеспечит точное регулирование.

Для уменьшения статической ошибки при новом заданном значении регулируемого параметра необходимо переместить движок реостата ручной перестановки  $R_{PI}$  в соответствующем направлении (в направлении изменения задания) на величину, пропорциональную изменению задания. Реально это сделать достаточно сложно и поэтому П – регуляторы применяются редко.

### Пропорционально-интегральные регуляторы

ПИ – регуляторы также называют изодромными или регуляторами с «гибкой» обратной связью. Гибкая обратная связь действует только в период переходного режима и является внутренней обратной связью регулятора. Это самый распространенный регулятор в производственных условиях.

ПИ – регулятор сочетает свойства П – и И – регуляторов и структурно представляет собой параллельное соединение этих двух регуляторов.

Зависимость между входной и выходной величинами ПИ – регулятора определяется выражением:

$$Y(\tau) = k_P \xi(\tau) + k_{PI} \int_0^{\tau} \xi(\tau) d\tau$$

или

$$Y(\tau) = k_P \left[ \xi(\tau) + \frac{1}{T_{ИЗ}} \int_0^{\tau} \xi(\tau) d\tau \right],$$

где  $T_{ИЗ}$  – время изодрома.

$$T_{ИЗ} = \frac{k_P}{k_{PI}} = \frac{\frac{\Delta Y(\tau)}{\xi(\tau)}}{\frac{\Delta Y(\tau)}{\Delta \tau} \cdot \xi(\tau)} = \Delta \tau$$

Данный регулятор имеет два параметра динамической настройки –  $k_P$  и  $T_{ИЗ}$ : для настройки пропорциональной части -  $k_P$ , для настройки интегральной части -  $T_{ИЗ}$ .

$T_{ИЗ}$  характеризует среднюю скорость исполнительного механизма под действием интегральной части ( $T_{ИЗ} = T_{И} \cdot k_P$ ).

Из переходного процесса ПИ – регулятора следует, что время изодрома  $T_{ИЗ}$  – время, за которое угол поворота вала исполнительного механизма под действием пропорциональной части ( $\Delta Y = k_P \xi(\tau)$ ) удваивается интегральной частью ( $\Delta Y_2 = \Delta Y_1$ ).

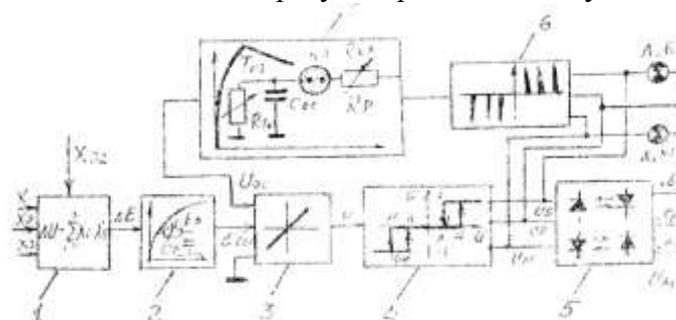
Поэтому время изодрома также называют временем удвоения.

Передаточная функция ПИ – регулятора имеет следующий вид:

$$W(p)_{ПИ} = k_P \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{ИЗ} p} \right) = \frac{k_P \cdot (1 + T_{ИЗ} p)}{T_{ИЗ} p}$$

Т.е. ПИ – регулятор имеет предваряющую (дифференцирующую) часть  $(1 + T_{изр})$  в числителе передаточной функции, что делает его эффективным для использования на инерционных объектах.

Структурная схема аналогового ПИ – регулятора имеет следующий вид:



- 1 – измерительный блок;
- 2 – демпфирующее звено (сглаживающий фильтр);
- 3 – балансный усилитель;
- 4 – электронное бесконтактное трехпозиционное реле;
- 5 – усилитель мощности;
- 6 – блок формирования сигнала отрицательной обратной связи;
- 7 – узел обратной связи.

Измерительный блок 1 обеспечивает алгебраическое суммирование с весовыми коэффициентами от одного до трех сигналов с датчиков текущих значений параметров процесса, характеризующих значение регулируемой величины.

Например, при регулировании уровня воды в барабане парового котла учитываются три параметра: 1 – величина уровня воды в барабане; 2 – расход питательной воды в барабане; 3 – расход пара из котла.

Наличие трех сигналов позволяет учитывать при формировании управляющего воздействия не только само измерение уровня, но и факторы, способствующие его изменению. Увеличение расхода воды приведет к повышению уровня, снижение расхода пара из котла – к такому же эффекту, поэтому эти два параметра берутся с равными знаками и различными весовыми коэффициентами.

На выходе измерительного блока формируется сигнал разбаланса:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^3 X_i - X_{зд},$$

где  $X_{зд}$  – сигнал, пропорциональный заданному значению регулируемой величины.

Демпфирующее звено (сглаживающий фильтр) 2 обеспечивает сглаживание сигнала разбаланса  $\Delta U$  и получение сглаженного сигнала рассогласования  $\xi(\tau)$ . Постоянная времени (постоянная времени демпфирования)  $T_\phi = R_\phi C_\phi$  определяется величиной сопротивления  $R_\phi$  при  $C_\phi = \text{const}$ .

На входе балансного усилителя 3 формируется сигнал управления  $U = \xi(\tau) - U_{ос}$ , где  $U_{ос}$  – сигнал внутренней обратной связи, формируемый узлом обратной связи 7. Сигнал  $U$  усиливается до величины, достаточной для срабатывания трехпозиционного реле 4 с гистерезисом и зоной нечувствительности.

Выходной сигнал трехпозиционного реле подается одновременно на вход усилителя мощности 5 и на вход блока формирования сигнала отрицательной обратной связи 6.

На выходе усилителя мощности включены пусковые устройства исполнительного механизма, обеспечивающие его перемещение в направлении «Б» - больше или «М» - меньше (в качестве пусковых устройств обычно используют электромагнитные пускатели или бесконтактные реверсивные пускатели типа ПБР – 2М).

Формирователь сигналов обратной связи 6 вырабатывает последовательность импульсов, полярность которых определяется знаком отклонения регулируемой величины от задания  $\xi(\tau)$  или направлением управляющих команд по каналам «Б» или «М».

Последовательность импульсов частотой 50 Гц (сети) подается на вход узла обратной связи 7.

Узел обратной связи представляет собой взаимно развязанные зарядную и разрядную RC – цепи. В данном случае элементом развязки цепей заряда и разряда является неоновая лампа НЛ. Напряжение обратной связи  $U_{OC}$  является напряжением заряда конденсатора обратной связи  $C_{OC}$ . Зарядная цепь  $C_{OC} - R_{кр}$  определяет воздействие пропорциональной части регулятора, а разрядная цепь  $C_{OC} - R_{Тиз}$  соответственно интегральной части регулятора.

Рассмотрим работу ПИ – регулятора и механизм воздействия гибкой отрицательной обратной связи, обеспечивающей реализацию заданных значений  $k_p$  и  $T_{из}$ .

Временная диаграмма изменения сигналов при формировании ПИ – закона регулирования имеет следующий вид:

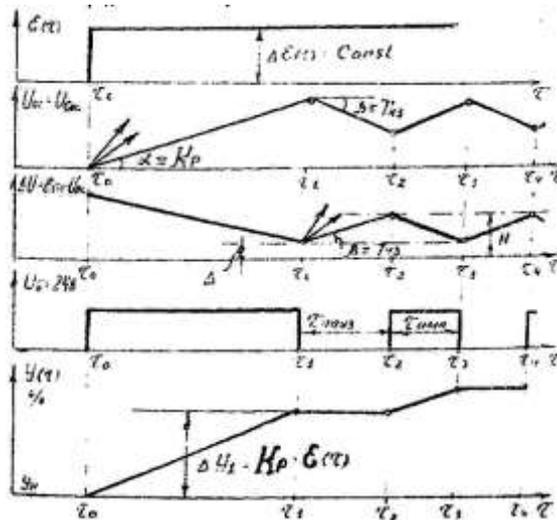
Допустим, что при  $\tau \ll 0$  в контуре регулирования  $\sum X_i = X_{зд}$ , т.е. сигнал рассогласования был равен 0  $\xi(\tau) = 0$ . Это значит, что  $U_{OC} = U_{C_{OC}} = 0$ ,  $\Delta U = 0$ ,  $U_B = U_M = 0$  и исполнительный механизм был в положении  $Y_H$  (начальном).

В момент времени  $\tau = 0$  скачкообразно было увеличено значение  $X_{зд}$ , а все измерительные приборы, формирующие  $X_i$ , отключены, т.е.  $X_i = const$ . Зафиксированы все значения предыдущих величин  $X_i$ .

Сигнал  $\xi(\tau)$  скачкообразно увеличится и останется постоянным, т.е. речь идет о получении кривой разгона ПИ – регулятора.

Поскольку при  $\tau = 0$   $U_{OC} = 0$ , то сигнал  $\Delta U$  тоже скачком увеличится на величину  $\xi(\tau)$ . Этот сигнал усилится, и трехпозиционное реле сработает и появится управляющее напряжение в канале  $U_B$  (предположим, увеличение задания).

Исполнительный механизм начнет перемещение в направлении увеличении угла поворота. Одновременно на выходе формирователя 6 появятся импульсы напряжения, и конденсатор обратной связи  $C_{OC}$  начнет заряжаться (лампа НЛ зажигается) через сопротивление  $R_{кр}$ .



Скорость заряда конденсатора  $C_{OC}$  определяется величиной зарядного сопротивления  $R_{кр}$ . Чем больше  $R_{кр}$ , тем скорость заряда (угол  $\alpha$ ) меньше.

По мере зарядки  $C_{OC}$  величина  $U_{C_{OC}}$  начинает увеличиваться, а значение сигнала  $\Delta U$  уменьшается. Сигнал  $U_B$  сохраняется, и исполнительный механизм непрерывно (с максимальной скоростью) перемещается в направлении увеличения  $Y(\tau)$ .

Но наступает такой момент времени  $\tau_1$ , когда текущее значение сигнала  $\Delta U(\tau)$  становится равным или меньшим, чем зона нечувствительности  $\Delta$  трехпозиционного реле 4. Реле отключается, и при этом  $U_B$  становится равным 0. Исполнительный механизм

останавливается, импульсы обратной связи исчезают (выход блока 6 становится нулевым) и неоновая лампа НЛ гаснет. Цепь заряда отключается.

Конденсатор  $C_{OC}$  получает возможность разряжаться через сопротивление  $R_{Тиз}$ . Чем меньше сопротивление, тем быстрее разряжается  $C_{OC}$  и тем резче уменьшается значение  $U_{OC}$ . Т.е. угол  $\beta$  зависит от величины  $R_{Тиз}$ .

По мере уменьшения величины  $U_{OC} = U_{Coc}$  значение сигнала  $\Delta U = \xi(\tau) - U_{OC}$  снова увеличивается, и в момент времени  $\tau = \tau_2$  значение сигнала  $\Delta U$  становится большим значения зоны возврата  $H$  трехпозиционного реле 4.

При  $\tau_1 < \tau < \tau_2$ , когда  $\Delta \leq \Delta U \leq H$ , реле было отключено  $U_B = 0$ , и исполнительный механизм был отключен.

При  $\tau > \tau_2$  реле сработает и на выходе его получится сигнал  $U_B$ , неоновая лампа вновь зажигается, и конденсатор  $C_{OC}$  снова начинает заряжаться, уменьшая значение  $\Delta U$ .

В момент времени  $\tau = \tau_3$  значение  $\Delta U$  становится равным или чуть меньшим значения зоны нечувствительности реле, и оно отключается.

Исполнительный механизм снова отключается, конденсатор  $C_{OC}$  начинает снова разряжаться, и увеличиваться сигнал  $\Delta U$ .

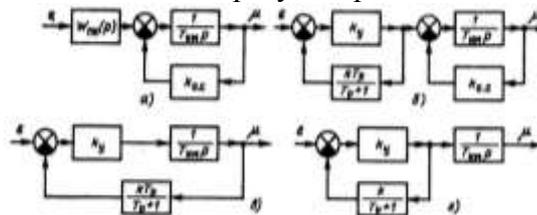
В момент времени  $\tau = \tau_4$  значение  $\Delta U = H$ , реле вновь сработает и т.д.

Далее движение исполнительного механизма будет характеризоваться импульсным режимом, где  $\tau_{ПАУЗ}$  – длительность паузы (определяется значением сопротивления  $R_{Тиз}$ ) и  $\tau_{ИМП}$  – длительность импульса (определяется значением сопротивления  $R_{кр}$ ). Средняя скорость исполнительного механизма будет тем меньше, чем больше  $R_{Тиз}$ .

При  $R_{Тиз} \rightarrow \infty$  (разрыв цепи разрядного сопротивления) ПИ – регулятор превращается в пропорциональный, т.к.  $1/T_{И} \rightarrow 0$  при  $T_{И} \rightarrow \infty$ .

Первое продолжительное включение исполнительного механизма определяет воздействие пропорциональной части и угол поворота  $\Delta Y_1 = k_P \xi(\tau)$ .

Структурные схемы промышленных ПИ-регуляторов имеют следующий вид:



### Пропорционально – интегрально - дифференциальные регуляторы

Регуляторы данного типа называются изодромными с предварением или ПИ – регуляторы с предварением.

Регуляторы этого типа наиболее эффективно используются на объектах, подверженных воздействию монотонных длительных возмущений. Например, на объектах, имеющих пиковые нагрузки, или прокатных станах с неравномерной производительностью. В этих устройствах реализуется ПИД – закон регулирования, когда при формировании управляющего воздействия учитывается не только величина отклонения и интегральная оценка этой величины, но и скорость изменения этого отклонения.

Зависимость между входной и выходной величинами ПИД-регулятора имеет вид:

$$Y(\tau) = k_P \xi(\tau) + k_{P1} \int_0^{\tau} \xi(\tau) d\tau + k_{P2} \frac{d\xi(\tau)}{d\tau},$$

или

$$Y(\tau) = k_P \left[ \xi(\tau) + \frac{1}{T_{ИЗ}} \int_0^{\tau} \xi(\tau) d\tau + T_{II} \frac{d\xi(\tau)}{d\tau} \right],$$

где  $T_{II}$  – время предварения:

$$T_{II} = \frac{k_{P2}}{k_P},$$

где  $k_{P2}$  – коэффициент передачи регулятора, определяющий, какой угол поворота вала исполнительного механизма приходится на единицу изменения скорости отклонения регулируемой величины от задания (сигнала рассогласования), т.е.

$$\Delta Y = k_{P2} \frac{\Delta \xi(\tau)}{\Delta \tau}, \Rightarrow k_{P2} = \frac{\Delta Y}{\frac{\Delta \xi(\tau)}{\Delta \tau}} \Rightarrow T_{II} = \frac{\frac{\Delta Y \Delta \tau}{\Delta \xi(\tau)}}{\frac{\Delta Y}{\Delta \xi(\tau)}} = \Delta \tau.$$

$T_{II}$  количественно характеризует долю участия дифференцирующей части регулятора в формировании управляющего воздействия ПИД-регулятора.

Данный регулятор имеет три параметра динамической настройки –  $k_P$ ,  $T_{ИЗ}$  и  $T_{II}$ : для настройки пропорциональной части –  $k_P$ , для настройки интегральной части –  $T_{ИЗ}$ , для настройки дифференциальной части –  $T_{II}$ .

Физический смысл значения время предварения  $T_{II}$  можно выяснить из траектории переходной характеристики. Допустим, что в ПИД-регуляторе  $T_{ИЗ} \rightarrow \infty$ , тогда ПИД-

регулятор превращается в ПД – регулятор, т.к.  $\frac{1}{T_{ИЗ}} \rightarrow 0$ .

Подадим на вход этого ПД – регулятора возмущающее воздействие  $\xi(\tau)$ , изменяющееся

с постоянной скоростью  $\frac{d\xi(\tau)}{d\tau} = const.$

Таким образом, время предварения  $T_{II}$  – это время, за которое угол поворота вала исполнительного механизма под действием дифференцирующей части ( $\Delta Y_1$ ) удваивается пропорциональной ( $\Delta Y_2$ ), т.е.  $\Delta Y_1 = \Delta Y_2$ .

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$W(p)_{ПИ} = \frac{k_P \cdot (1 + T_{ИЗ}p) \cdot (1 + T_{II}p)}{T_{ИЗ}p}.$$

В производственных условиях ПИД - закон регулирования получают при использовании ПИ – регулятора и подачи на его вход дополнительного сигнала с дифференцирующего устройства.

#### Порядок выполнения работы:

- 1 Изучить принципиальную схему бесконтактного регулятора БР-11
2. Объяснить принцип действия регулятора БР-11.
3. Изучить принципиальную схему электрогидравлического регулятора
4. Объяснить принцип действия регулятора.
5. Изучить структурную схему аналогового ПИ – регулятора
6. Объяснить принцип действия ПИ - регулятора.
7. Ответить на контрольные вопросы:
  - а) в чем недостаток пропорционального регулятора?
  - б) в чем недостаток интегрального регулятора?
  - в) в чем достоинство ПИ – регулятора?

#### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале.

## Практическое занятие № 6

### Определение показателей качества процесса регулирования

**Цель работы:** изучить показатели качества (первое и второе время регулирования, величина перерегулирования)

**Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

**Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по определению показателей качества

**Задание:**

1. Изучить параметры, по которым определяется качество переходных процессов
2. Ответить на контрольные вопросы.

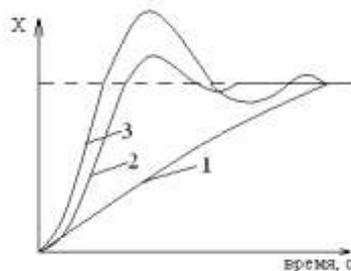
**Краткие теоретические сведения:**

Для того чтобы получить качественный процесс регулирования (переходной процесс), необходимо правильно построить и настроить систему автоматического регулирования.

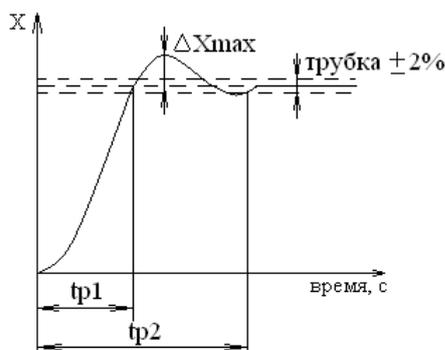
Существует три вида переходных процессов:

Проведя анализ данных переходных процессов, можно сделать определенные выводы:

- 1 – переходной процесс слишком затянут, поэтому достижение нового установившегося состояния будет длиться долго.
- 2 – является оптимальным, т.к. имеется небольшое перерегулирование, что позволяет системе достаточно быстро войти в устойчивое положение.
- 3 – данный переходной процесс имеет сильно большое перерегулирование, т.е. необходимо много времени для того, чтобы система приобрела стабильное состояние.



Качество переходного процесса определяется тремя величинами  $\tau_{p1}$ ,  $\tau_{p2}$  и  $\Delta X_{\max}$ .



$\tau_{p1}$  – первое время регулирования – это время от начала подачи воздействия до момента времени, когда выходная величина в первый раз достигнет установившегося значения.

$\tau_{P2}$  - второе время регулирования – это время от начала подачи воздействия до момента времени, когда выходная величина войдет в «трубку»  $\pm 2\%$  от установившегося значения.

$\Delta X_{MAX}$  – величина перерегулирования – это максимальное первое отклонение выходной величины от установившегося значения.

Оптимальный переходной процесс имеет:

$$\tau_{P1} = 4,7\tau$$

$$\tau_{P2} = 8,4\tau$$

$$\Delta X_{MAX} = 4,3\%.$$

### Порядок выполнения работы:

1. Изучить, как определяются основные показатели качества переходного процесса.
2. Повторить, как определяются время запаздывания  $\tau_3$ , время инерционности  $T_{OB}$ , коэффициент передачи объекта  $K_{OB}$ , коэффициент затухания  $\psi$ , скорость разгона  $\xi$ , коэффициент самовыравнивания  $\rho$ .
3. По графику (рисунок 1) определить  $K_{OB}$ ,  $\tau_3$ ,  $T_{OB}$ ,  $\psi$ ,  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\tau_{P1}$ ,  $\tau_{P2}$ ,  $\Delta X_{MAX}$ :

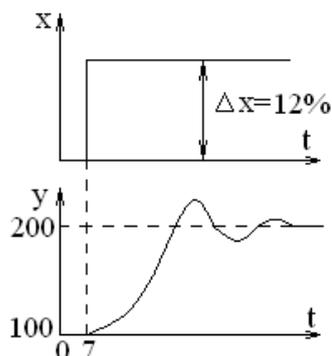


Рисунок 1 – Переходной процесс

4. Ответить на контрольные вопросы:
  - а) определение кривой разгона;
  - б) определение времени запаздывания  $\tau_3$ ;
  - в) определение постоянной времени объекта  $T_{OB}$ ;
  - г) определение коэффициента передачи объекта  $K_{OB}$ ;
  - д) определение скорости разгона объекта  $\xi$ ;
  - е) определение коэффициента самовыравнивания  $\rho$ ;
  - ж) определение первого времени регулирования  $\tau_{P1}$ ;
  - з) определение второго времени регулирования  $\tau_{P2}$ ;
  - и) определение величины перерегулирования  $\Delta X_{MAX}$ ;
  - к) определение коэффициента затухания  $\psi$ .

### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале.

## Практическое занятие № 7

### Построение годографа АФЧХ объекта по кривой разгона

**Цель работы:** научиться рассчитывать годограф АФЧХ по данным, полученным из кривой разгона объекта регулирования

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

**Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по построению годографа АФЧХ по реальной кривой разгона

**Задание:**

1. Изучить алгоритм построения годографа АФЧХ.

**Краткие теоретические сведения:**

Кривая разгона и частотная характеристика объекта определяют динамические свойства объекта и различаются только типом входного возмущающего воздействия.

Если динамические свойства реального объекта можно аппроксимировать звеном запаздывания и инерционным звеном первого порядка, то по значениям динамических параметров  $\tau_3$ ,  $T_{OB}$  и  $K_{OB}$  аппроксимированной кривой разгона можно построить годограф АФЧХ.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика аппроксимированного объекта  $W(j\omega)_{OB}$  представляет собой произведение АФЧХ обоих звеньев:

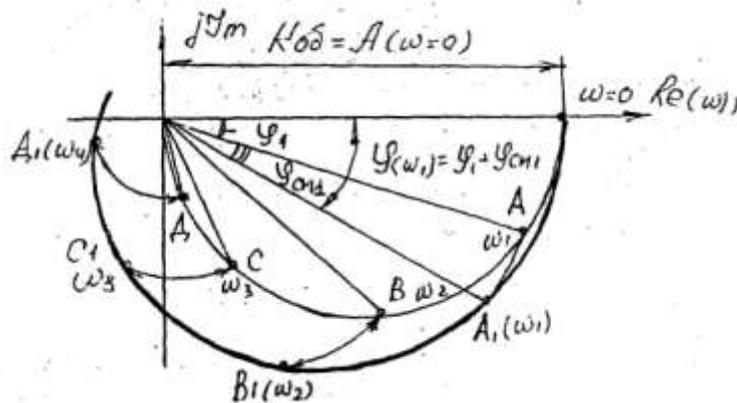
$$W(j\omega)_1 \cdot W(j\omega)_3 = W(j\omega)_{OB},$$

где  $W(j\omega)_1$  – АФЧХ инерционного звена первого порядка;

$W(j\omega)_3$  - АФЧХ звена запаздывания.

Коэффициент передачи звена первого порядка равен коэффициенту передачи объекта  $K_{OB}$ .

Годограф АФЧХ звена первого порядка представляет собой полуокружность в первом квадранте комплексной плоскости диаметром  $A(\omega=0) = K_{OB}$ .



Построение ведется следующим образом:

1) на вещественной полуоси проводится окружность радиусом  $R = 0,5K_{OB}$ . Получаем  $W(j\omega)_1$ .

2) определяем частоты отдельных точек АФЧХ инерционного звена первого порядка.

Поскольку нам известна величина  $T_{OB}$ , то частоты отдельных точек определяются так:

- а) на  $W(j\omega)_1$  выбираются точки А, В, С, D и т.д.;
- б) из точки О проводятся прямые ОА, ОВ, ОС, ОD и т.д.;
- в) измеряются полученные углы  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ;
- г) вычисляются соответственно  $\text{tg}\varphi_1, \text{tg}\varphi_2, \dots, \text{tg}\varphi_n$ ;
- д) частоты вычисляются по формуле:

$$\omega_i = \frac{\text{tg} \varphi_i}{T_{OB}}.$$

3) звено запаздывания, не изменяя амплитуду колебаний, вводит только сдвиг фазы этих колебаний в зависимости от величины  $\tau_3$ , т.е.

$$W(j\omega)_3 = e^{-c}$$

где  $c = j\omega\tau_3$ .

Поэтому годограф АФЧХ объекта может быть получен из годографа АФЧХ инерционного звена первого порядка, если сместить каждый вектор АФЧХ инерционного звена первого порядка на угол:

$$\varphi_{CM} = 57^0 \cdot \omega_i \cdot \tau_3$$

где  $57^0$  – количество угловых градусов в одном радиане ( $360^0/2\pi$ );

радиан – это угол, соответствующий длине дуги, равной радиусу -  $2\pi R/R = 2\pi$  радиан =  $360^0$ ;

или

$$\varphi_{CM} = \frac{57^0 \operatorname{tg} \varphi_i \tau_3}{T_{OB}}$$

В результате поворота каждого вектора  $W(j\omega)_1$  на угол  $\varphi_{CM}$  получим искомый годограф АФЧХ объекта -  $W(j\omega)_{OB}$ .

Для ориентировочного выбора частот построения можно использовать значения  $\tau_3$  и  $T_{OB}$ , определенные по экспериментальной кривой разгона. Можно считать, что  $\omega_1 = \pi/3T_{OB}$  и  $\omega_n = \pi/\tau_3$ .

Для построения годографа достаточно иметь 5 – 8 точек в диапазоне от  $\pi/3T_{OB}$  до  $\pi/\tau_3$ .

#### Порядок выполнения работы:

1. Изучить методику построения годографа АФЧХ объекта.
2. Данные, необходимые для расчета (коэффициент передачи объекта  $K_{OB}$ , постоянная времени  $T_{OB}$  и время запаздывания  $\tau_3$ ) необходимо взять из курсового проекта.
3. Необходимо заполнить таблицу 5.

Таблица 5.

№	$\varphi_i, ^0$	$\operatorname{tg}\varphi_i$	$\omega_i$	$A(\omega_i)$	$\varphi_{CM}$

4. Построить годограф АФЧХ в комплексной плоскости

#### Форма представления результата:

Выполнение индивидуального задания.

### Практическое занятие № 8

#### Расчет устойчивости замкнутой системы АУ

#### Цель работы:

- 1) научиться рассчитывать годограф АФЧХ алгебраическим методом;
- 2) научиться рассчитывать годограф АФЧХ частотным методом

#### Выполнив работу, Вы будете уметь:

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

### Материальное обеспечение:

Индивидуальный раздаточный материал по расчету устойчивости методом Рауса-Гурвица и критерием Найквиста

### Задание:

1. Изучить критерий Рауса-Гурвица
2. Изучить критерий Найквиста
3. Ответить на контрольные вопросы.

### Краткие теоретические сведения:

Устойчивость систем является важнейшим показателем процесса регулирования. Для того чтобы определить, устойчива ли система, необходимо изучить ее поведение при малых отклонениях от положения равновесия.

Устойчивость в «малом» называют устойчивостью системы при бесконечно малых отклонениях. Если линейная система устойчива в «малом», то она обязательно устойчива в «большом». Русский ученый А.М.Ляпунов дал математическое определение и ввел понятие об устойчивости системы в «малом».

Система называется устойчивой в «малом», если она возвращается в состояние равновесия при ограниченных значениях возмущающих воздействий.

Система называется устойчивой в «большом», если она возвращается в состояние равновесия при любых значениях возмущающих воздействий.

Для определения устойчивости системы разработаны специальные правила, называемые критериями устойчивости.

С помощью критериев устойчивости не только устанавливается факт устойчивости или неустойчивости системы, но и оценивается влияние тех или иных параметров и структурных изменений в системе на ее устойчивость.

Наиболее распространенными методами расчета устойчивости системы являются алгебраический и частотный.

### Алгебраический метод

Первоначально метод анализа устойчивости системы был предложен А.М. Ляпуновым. Метод заключался в нахождении некоторой функции (**функции Ляпунова**) исследуемой системы и оценки по ней колебательного процесса. Однако, применение этого метода ограничивалось тем, что не существует общего правила нахождения этой функции.

Многочисленные последующие исследования показали, что системы, описываемые простыми дифференциальными уравнениями, будут устойчивыми, если все корни этих дифференциальных уравнений имеют отрицательные действительные части. Но и этот метод не получил широкого распространения, т.к. задача точного определения корней дифференциального уравнения, начиная с четвертой степени и выше, трудноразрешима.

При исследовании устойчивости систем автоматического регулирования, описываемых дифференциальными уравнениями до IV порядка, пользуются **критерием Рауса-Гурвица**. Этот критерий позволяет определить устойчивость систем путем сопоставления коэффициентов уравнений с коэффициентами или определителями Гурвица.

По критерию Рауса-Гурвица необходимо составить матрицу из коэффициентов исследуемого уравнения:

$$\begin{array}{cccccc} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{array}$$

Для составления этой матрицы коэффициентов необходимо:

- 1) выписать по диагонали матрицы все коэффициенты уравнения;
- 2) заполнить строки коэффициентами так, чтобы их номера возрастали слева направо.

Для того чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы при  $a_n > 0$  все  $\Delta$  определителей, составленных из  $n$  строк и  $n$  столбцов, были положительны. В результате должно быть:

$$\Delta_1 = a_1 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0$$

Достоинства критерия Рауса-Гурвица:

- 1) простота использования для уравнений не выше шестого порядка;
- 2) наличие аналитической связи между параметрами системы и условиями устойчивости.

Недостатки критерия Рауса-Гурвица:

- 1) для анализа системы необходимо знать уравнения всех входящих в систему звеньев, а это не всегда возможно;
- 2) по коэффициентам дифференциальных уравнений системы достаточно сложно установить звено, определяющее неустойчивость системы в целом;
- 3) применяется только для линейных систем без запаздывания.

Вследствие этих причин критерий Рауса-Гурвица применяется для определения устойчивости сравнительно несложных систем.

### Частотные методы

Основное преимущество частотных методов заключается в их большой наглядности, обусловленной тем, что задача исследования сводится к изучению плоской кривой, которая может быть получена либо аналитически, либо экспериментально.

Экспериментальный метод получения частотных характеристик системы или ее отдельных элементов позволяет провести исследование системы, у которой неизвестны дифференциальные уравнения.

Частотные критерии устойчивости можно разделить на две группы. Первая группа характеризует устойчивость замкнутой системы. Вторая группа характеризует устойчивость разомкнутой системы. Частотные критерии являются графоаналитическими и обеспечивают наглядность инженерных расчетов. Они позволяют определить устойчивость замкнутой системы при отсутствии характеристического уравнения и передаточных функций системы, используя экспериментально полученные частотные характеристики звеньев и разомкнутой системы в целом.

Пусть дано характеристическое или дифференциальное уравнение системы:

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

Сделаем замену в уравнении системы  $p = j\omega$  и получим:

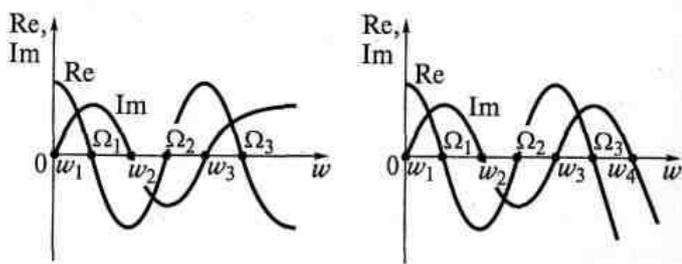
$$D(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + a_2(j\omega)^{n-2} + \dots + a_n = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega),$$

где  $\text{Re}(\omega) = a_0\omega - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 - \dots + \omega^{2n} a_{n2}$ ;  
 $\text{Im}(\omega) = a_1\omega - a_3\omega^3 + a_5\omega^5 - \dots + \omega^{2n-1} a_{n2-1}$ .

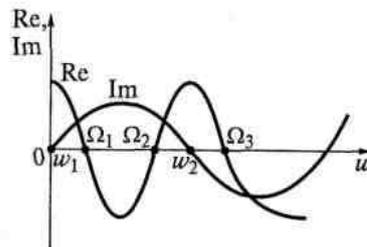
Задавая различные значения  $\omega$  и откладывая  $\text{Re}(\omega)$  по горизонтальной, а  $\text{Im}(\omega)$  по вертикальной осям системы координат, можно построить кривую, называемую **годографом характеристического вектора** или **кривой Михайлова**.

Поскольку в состав  $\text{Re}$  входят лишь четные степени  $\omega$ , то кривая симметрична относительно оси  $\text{Re}$ . Чтобы составить представление о других свойствах кривой Михайлова, необходимо определить точки пересечения ее с осями, возможные максимумы и минимумы, предельные значения при  $\omega > 0$ .

Если система устойчива, то кривые  $\text{Re}(\omega)$  и  $\text{Im}(\omega)$  будут иметь следующий вид:



Если система неустойчива, то кривые  $\text{Re}(\omega)$  и  $\text{Im}(\omega)$  будут иметь следующий вид:

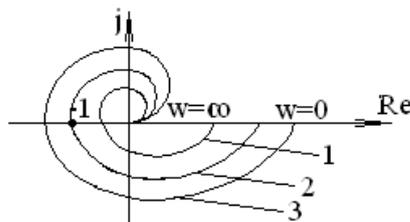


**Формулировка критерия Михайлова:** для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы характеристический вектор при изменении частоты от 0 до  $\infty$  повернулся в положительном направлении (начиная с положительной вещественной оси) на число квадрантов, равное порядку исходного уравнения.

Критерий Михайлова целесообразно использовать при исследовании сложных многоконтурных систем управления.

Наибольшее применение для определения устойчивости системы получил критерий Найквиста, применяемый для замкнутых систем, у которых известна амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы.

Формулировка критерия Найквиста следующая: если амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы не охватывает критическую точку  $(-1; j0)$ , то система устойчива в замкнутом состоянии; если пересекает эту точку, то система находится на границе устойчивости; если охватывает, то система не устойчива в замкнутом состоянии.



1 – система устойчива;

2 – система находится на границе устойчивости;

3 – система неустойчива.

Критерий Найквиста целесообразно применять при исследовании сложных систем управления, где объекты имеют существенное запаздывание. Он позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по виду амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

Этот критерий применим только тогда, когда часть (или все) характеристики отдельных элементов системы заданы экспериментально. Он применим при анализе систем, описываемых аналитическими передаточными функциями. Он графически нагляден и позволяет оценить запасы устойчивости.

Критерий позволяет легко оценивать влияние параметров отдельных звеньев на устойчивость системы. Особенно это относится к системам одноконтурным, т. е. к таким, в которых все звенья соединены последовательно, образуя единую замкнутую цепь. Общий передаточный коэффициент такой системы в разомкнутом состоянии равен простому произведению передаточных коэффициентов ее отдельных звеньев. При этом модуль общего передаточного коэффициента равен произведению модулей передаточных звеньев, а фаза равна сумме фаз передаточных коэффициентов звеньев.

Критерий не только отвечает на вопрос об устойчивости системы, но и позволяет оценить характер переходного процесса. С некоторыми изменениями метод может быть применен для анализа устойчивости систем, в которые входят не только линейные, но и нелинейные звенья.

#### **Порядок выполнения работы:**

1. Изучить критерий Рауса-Гурвица.
2. Рассчитать устойчивость с помощью критерия Рауса Гурвица для следующего характеристического уравнения:

$$D(p) = 0,0064p^4 + 0,0272p^3 + 0,32p^2 + p + 5$$

3. Изучить критерия Найквиста.
4. Построить годограф АФЧХ объекта по кривой разгона и определить устойчивость с помощью критерия Найквиста.
5. Ответить на контрольные вопросы:
  - а) в чем достоинства критерия Рауса-Гурвица?
  - б) в чем недостатки критерия Рауса-Гурвица?
  - в) в чем достоинства критерия Найквиста?
  - г) в чем недостатки критерия Найквиста?

#### **Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

### **Практическое занятие № 9**

#### ***Выбор закона регулирования и расчет оптимальных настроек регулятора***

**Цель работы:** научиться рассчитывать годограф АФЧХ ПИ – регулятора и ПИД-регулятора

#### **Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

## Материальное обеспечение:

Индивидуальный раздаточный материал

### Задание:

- 1 Изучить расчет годографа АФЧХ ПИ - регулятора
- 2 Изучить расчет годографа АФЧХ ПИД - регулятора
- 3 Ответить на контрольные вопросы

### Краткие теоретические сведения:

#### Выбор закона регулирования и расчет оптимальных настроек регулятора

Выбирается типовой переходный процесс апериодическим, окончание переходного процесса при вхождении в зону 0,1% от заданного значения.

Показатель колебательности принимается равным 1,3.

#### Расчет ПИ-регулятора

$$W_p(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right),$$

где  $k_p$ ,  $k_i$  – коэффициенты соответственно пропорциональной и интегральной частей;

$T_i$  и  $T_{из}$  – постоянные времени интегрирования и изодрома.

Для упрощенной типовой модели первого порядка с запаздыванием настроечные параметры регулятора принимают вид:

$$K_p = 0,6 / (k_{об} * (\tau_3 / T_{об})) ; T_i = 0,6 T_{об}.$$

По переходному процессу определяются следующие показатели качества:

1) величина перерегулирования  $\sigma$  - это отношение первого максимального отклонения управляемой переменной  $y(t)$  от ее установившегося значения  $y(\infty)$  к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%.$$

2) длительность переходного процесса  $t_n$  – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, когда переходный процесс вошел в зону  $\pm 0,1\%$  от заданного значения.

3) количество колебаний  $n$ ;

4) коэффициент затухания:

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100\%.$$

#### Расчет ПИД-регулятора

$$W_p(p) = k_n \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right),$$

где  $k_p$ ,  $k_i$  – коэффициенты соответственно пропорциональной и интегральной частей;

$T_i$  и  $T_{из}$  – постоянные времени интегрирования и изодрома.

Для упрощенной типовой модели с запаздыванием настроечные параметры регулятора принимают вид:

$$K_p = 0,95 / (k_{об} \tau_3 / T_{об}); T_i = 2,4 \tau_3; T_d = 0,4 \tau_3.$$

По переходному процессу определяются следующие показатели качества:

1) величина перерегулирования  $\sigma$ ;

- 2) длительность переходного процесса  $t_n$ ;
- 3) количество колебаний  $n$ ;
- 4) коэффициент затухания.

Затем производится сравнение данных показателей рассчитанных регуляторов. Регулятор с наилучшими показателями используется при дальнейшем проектировании и исследовании системы.

### Выбор регулятора по частотным показателям качества

Для выбора регулятора по частотным характеристикам строятся годографы АФЧХ и определяются запасы устойчивости по фазе  $\gamma$  и по модулю  $a$  для каждой модели регуляторов.

Расчет частотных характеристик автоматического регулятора выполняется по формулам:

- 1) для интегрального регулятора:

$$\text{АФЧХ: } W_p(j\omega) = K_p / \omega * e^{-\pi/2};$$

$$\text{АЧХ: } A_p(\omega) = K_p / \omega;$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi_p(\omega) = -\pi/2.$$

- 2) для пропорционально- интегрального регулятора:

$$\text{АФЧХ: } W_p(j\omega) = K_p \sqrt{1/\omega^2 T_u^2 + 1} * e^{j(\arctg \omega T_u - \pi/2)};$$

$$\text{АЧХ: } A_p(\omega) = K_p / \sqrt{1/\omega^2 T_u^2 + 1};$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi_p(\omega) = \arctg \omega T_u - \pi/2.$$

- 3) для пропорционально- интегрально- дифференциального регулятора:

$$\text{АФЧХ: } W_p(j\omega) = K_p \frac{\sqrt{(1 - TuT\delta \omega)^2 + Tu^2 \omega^2}}{T_u \omega} * e^{j(\arctg \frac{T_u \omega}{1 - TuT\delta \omega^2} - \pi/2)};$$

$$\text{АЧХ: } A_p(\omega) = K_p \frac{\sqrt{(1 - TuT\delta \omega)^2 + Tu^2 \omega^2}}{T_u \omega};$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi_p(\omega) = \arctg \frac{T_u \omega}{1 - TuT\delta \omega^2} - \pi/2.$$

Частоте  $\omega$  придают значения от 0 до  $\infty$ , для того чтобы найти значения величин  $A_p(\omega)$  и  $\varphi_p(\omega)$ . Полученные расчетом данные заносят в таблицу. По этим данным строят годограф АФЧХ регулятора.

$\omega$	$W_p(j\omega)$	
	А <sub>р</sub> ( $\omega$ )	$\varphi_p(\omega)$

Затем производится сравнение запасов устойчивости по фазе  $\gamma$  и по модулю  $a$  рассчитанных регуляторов. Регулятор с наилучшими показателями используется при дальнейшем проектировании и исследовании системы.

### Порядок выполнения работы:

1. Произвести расчет годографа АФЧХ ПИ – регулятора (частоты выбирать по годографу АФЧХ объекта).
2. Построить годограф АФЧХ ПИ – регулятора
3. Определить запас устойчивости по модулю и по фазе ПИ – регулятора.

4. Произвести расчет годографа АФЧХ ПИД–регулятора (частоты выбирать по годографу АФЧХ объекта).
5. Построить годограф АФЧХ ПИД–регулятора

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

**Практическое занятие № 10**  
**Расчет запаса устойчивости**

**Цель работы:** научиться выбирать регулятор по анализу запасов устойчивости регуляторов

**Выполнив работу, Вы будете уметь:**

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

**Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал

**Задание:**

1 Изучить определение запасов устойчивости по критерию Найквиста

**Краткие теоретические сведения:**

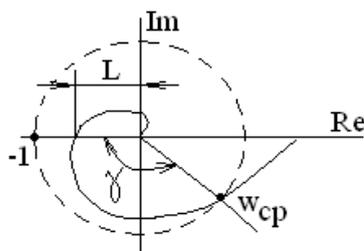
При определении устойчивости системы нет гарантий, что реальной системе будет соответствовать точно та точка области устойчивости, которая была найдена расчетным путем. Так, если расчетное состояние было слишком близко к границе устойчивости, то по указанным причинам реальная система может оказаться неустойчивой.

Запас устойчивости определяется величиной отклонения расчетных параметров системы от значений, соответствующих границе устойчивости.

Этот запас устойчивости обеспечивает работу реальной системы в области устойчивости с заданным качеством переходного процесса.

Формулировка запаса устойчивости системы зависит от того, какой критерий устойчивости применяется. При использовании критерия Найквиста устойчивость определяется относительно критической точки с координатами  $(-1; j0)$ . Очевидно, что запас устойчивости будет тем больше, чем дальше располагается кривая годографа от этой точки. Определяя запас устойчивости, обычно вводят понятия о запасе устойчивости по фазе и по модулю вектора. Оба эти запаса рассматриваются одновременно.

**Запасом устойчивости по модулю вектора  $a$**  называется величина, показывающая, во сколько раз необходимо увеличить или уменьшить передаточный коэффициент системы при неизменных значениях всех остальных ее параметров, чтобы устойчивая система оказалась на границе устойчивости.



$$a = 1/L.$$

$\omega_{ср}$  – это частота среза. При данной частоте амплитуда входного сигнала равна амплитуде выходного сигнала.

**Запас устойчивости по фазе  $\gamma$**  называется величина, показывающая, на сколько нужно уменьшить (увеличить) фазу, не изменяя амплитуды, чтобы устойчивая прежде система оказалась на границе устойчивости.

Для нормально работающей системы запас устойчивости по фазе  $\gamma$  составляет  $30 - 40^\circ$ .

#### **Порядок выполнения работы:**

1. Определить запас устойчивости по модулю и по фазе ПИ – регулятора и ПИД - регулятора.

#### **Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

### **Практическое занятие № 11** **Определение показателей качества**

**Цель работы:** изучить показатели качества (первое и второе время регулирования, величина перерегулирования)

#### **Выполнив работу, Вы будете:**

*уметь:*

- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов.

#### **Материальное обеспечение:**

Индивидуальный раздаточный материал по определению показателей качества

#### **Задание:**

1 Определить установившееся значение ошибки системы, передаточная функция которой  $W(s) = k / [(1 + sT_1)(1 + 2sT_2)]$   
где  $k=10 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_1=0,5 \text{ с}$ ;  $T_2=0,1 \text{ с}$ .

2 По кривой переходного процесса определить основные показатели качества регулирования системы.

#### **Порядок выполнения работы:**

1 Определить установившееся значение ошибки системы, передаточная функция которой  $W(s) = k / [(1 + sT_1)(1 + 2sT_2)]$ ,  
где  $k=10 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_1=0,5 \text{ с}$ ;  $T_2=0,1 \text{ с}$ .

2 По кривой переходного процесса определить основные показатели качества регулирования системы.

#### **Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.