

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»  
Многопрофильный колледж



УТВЕРЖДАЮ  
Директор  
С.А. Махновский  
«23» марта 2017 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ  
ПО ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ МОДУЛЮ  
ПМ.01 КОНТРОЛЬ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СРЕДСТВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ  
МДК.01.03 Теоретические основы контроля и анализа  
функционирования систем автоматического управления  
программы подготовки специалистов среднего звена  
по специальности СПО  
15.02.07 Автоматизация технологических процессов и производств  
(по отраслям)  
базовой подготовки**

Магнитогорск, 2017

## **ОДОБРЕНО**

Предметно-цикловой комиссией  
Автоматизации технологических  
процессов

Председатель: Е.В. Менщикова  
Протокол №7 от 14 марта 2017 г.

Методической комиссией

Протокол №4 от 23 марта 2017 г.

## **Разработчик:**

преподаватель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» Многопрофильный  
колледж Евгения Владимировна Менщикова

Методические указания разработаны на основе рабочей программы профессионального модуля ПМ.01 Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Методические указания	6
Лабораторная работа 1	6
Практическое занятие 1	8
Практическое занятие 2	17
Практическое занятие 3	20
Практическое занятие 4	21
Практическое занятие 5	24
Практическое занятие 6	35
Практическое занятие 7	38
Практическое занятие 8	41
Практическое занятие 9	46
Практическое занятие 10	49

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Важную часть теоретической и профессиональной практической подготовки обучающихся составляют практические и лабораторные занятия.

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) или учебных практических умений (математическое описание устройств, рассчитывать параметры типовых устройств и др.), необходимых в последующей учебной деятельности.

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

В соответствии с рабочей программой ПМ. 01 Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации, МДК.01.03 Теоретические основы контроля и анализа функционирования систем автоматического управления предусмотрено проведение практических и лабораторных работ.

В результате их выполнения, обучающийся должен:

*уметь:*

- пользоваться измерительной техникой, различными приборами и типовыми элементами средств автоматизации;
- снимать характеристики и производить подключение приборов;
- учитывать законы регулирования на объектах, рассчитывать и устанавливать параметры настройки регуляторов;
- проводить необходимые технические расчеты электрических схем включения датчиков и схем предобработки данных несложных мехатронных устройств и систем.

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 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления.

А также формированию **общих компетенций:**

- ОК 2 Организовывать собственную деятельность, определять методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.
- ОК 3 Решать проблемы, оценивать риски и принимать решения в нестандартных ситуациях.
- ОК 4 Осуществлять поиск, анализ и оценку информации, необходимой для постановки и решения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.
- ОК 5 Использовать информационно-коммуникационные технологии для совершенствования профессиональной деятельности.
- ОК 6 Работать в коллективе и команде, обеспечивать её сплочение, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.
- ОК 9 Быть готовым к смене технологий в профессиональной деятельности.

Выполнение студентами *практических работ* по ПМ. 01 Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации, МДК.01.03 Основы контроля и анализа функциональных систем автоматического управления направлено на:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление, развитие и детализацию полученных теоретических знаний по конкретным темам междисциплинарных курсов;
- формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;

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

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

Выполнение студентами *лабораторных работ* по ПМ. 01 Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации, МДК.01.03 Основы контроля и анализа функциональных систем автоматического управления направлено на:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление, развитие и детализацию полученных теоретических знаний по конкретным темам междисциплинарных курсов;

- 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, проективных, конструктивных и др.;

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

Продолжительность выполнения практической, лабораторной работы составляет не менее двух академических часов и проводится после соответствующего занятия, которое обеспечивает наличие знаний, необходимых для ее выполнения.

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

#### Лабораторная работа № 1

Снятие кривой разгона объекта регулирования

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

#### Цель работы:

- 1) научиться снимать статические характеристики объекта при прямом и обратном ходах;
- 2) научиться строить кривую разгона по времени запаздывания  $\tau_z$ , 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 приборов.

#### 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 $\tau_z$	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				
∑				

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

## Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 1

#### Исследование динамических звеньев

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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.

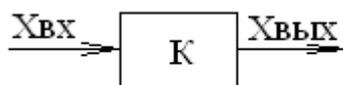
Все звенья изображаются в виде прямоугольников, внутри которых записывается передаточная функция данного звена.

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:

$$X_{\text{ВЫХ}} = X_{\text{ВХ}} \cdot K.$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = kp.$$

Данное звено также называется усилительным.

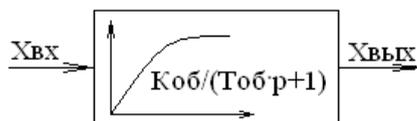
### Инерционное звено I порядка

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  $K_{ОБ}$  – постоянный коэффициент;

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

Зависимость выходной величины от входной имеет следующий вид:

$$X_{\text{ВЫХ}}(\tau) = \frac{K_{\text{ОБ}}}{T_{\text{ОБ}}p + 1} X_{\text{ВХ}}(\tau).$$

Передаточная функция имеет следующий вид:

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

где  $p$  – символ дифференцирования, показывающий скорость изменения параметра во времени;  
 $1/p$  – символ интегрирования.

Инерционное звено I порядка описывается дифференциальным уравнением I порядка:

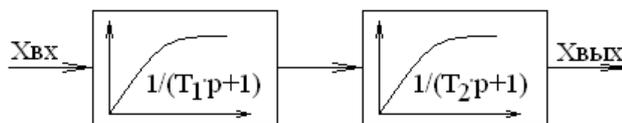
$$T_{\text{ОБ}} \frac{dX_{\text{ВЫХ}}(\tau)}{d\tau} + X_{\text{ВЫХ}}(\tau) = K_{\text{ОБ}} X_{\text{ВХ}}(\tau).$$

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

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

### 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:

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

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  $T_1 = T_2 = T$

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

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  $T_1 \neq T_2$

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

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:

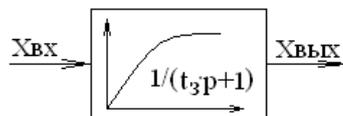
$$W(p) = \frac{1}{T_1 T_2 p^2 + \zeta p(T_1 + T_2) + 1}.$$

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:



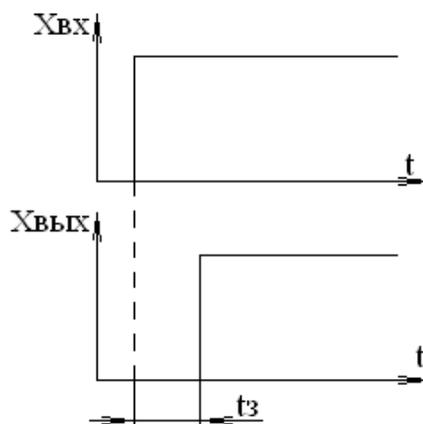
Зависимость выходной величины от входной имеет следующий вид:

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

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:

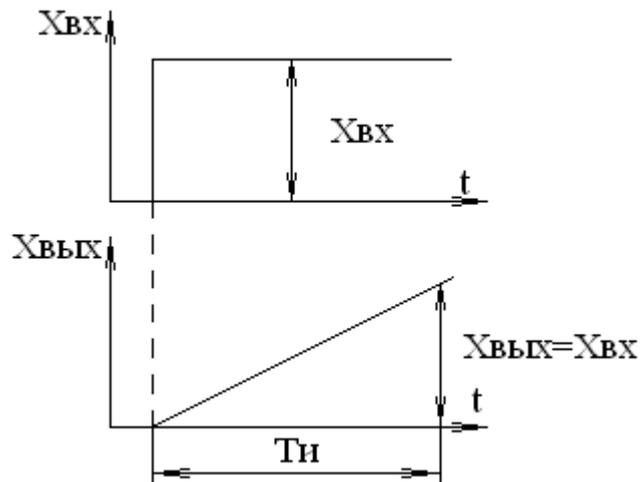
$$X_{ВЫХ}(\tau) = K_{p1} \int_0^{\tau} X_{ВЫХ}(\tau) d\tau,$$

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

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

$$K_{PI} = \frac{1}{T_{II}},$$

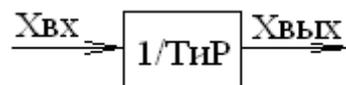
где  $T_{II}$  – время интегрирования, находящееся из следующих графиков:



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

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

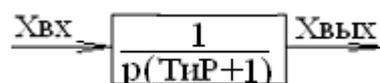
Идеальное интегрирующее звено имеет следующий вид:



Передаточная функция этого звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{T_{II}p}.$$

Реальное интегрирующее звено имеет следующий вид:



Передаточная функция этого звена имеет вид:

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

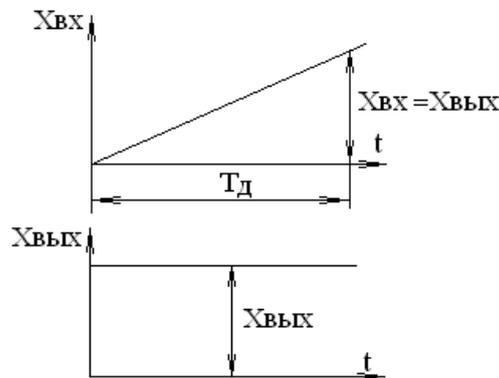
### Дифференцирующее звено

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

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

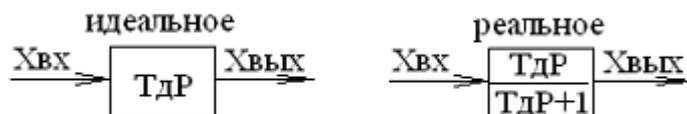
где  $T_D$  – это время дифференцирования, определяющее чувствительность дифференциального звена к изменению входного параметра.

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 предвращения, 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:

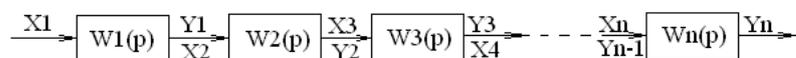
$$W(p) = T_D p \text{ - для идеального звена;}$$

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

### Соединения звеньев

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

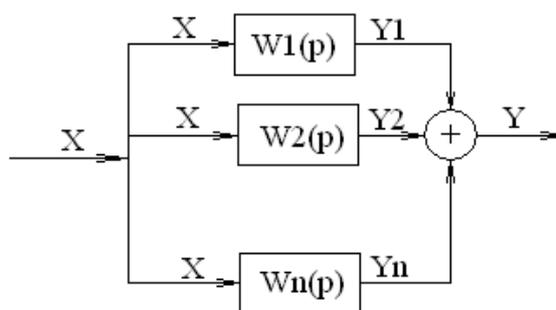
При последовательном соединении звеньев выходная величина каждого предыдущего звена является входной величиной для последующего звена:



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

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

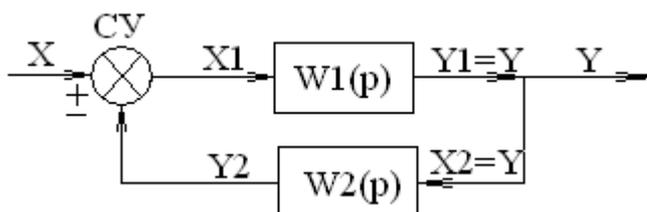
При параллельном соединении звеньев входная величина для всех звеньев является общей, а выходная равна сумме всех выходных величин звеньев:



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):

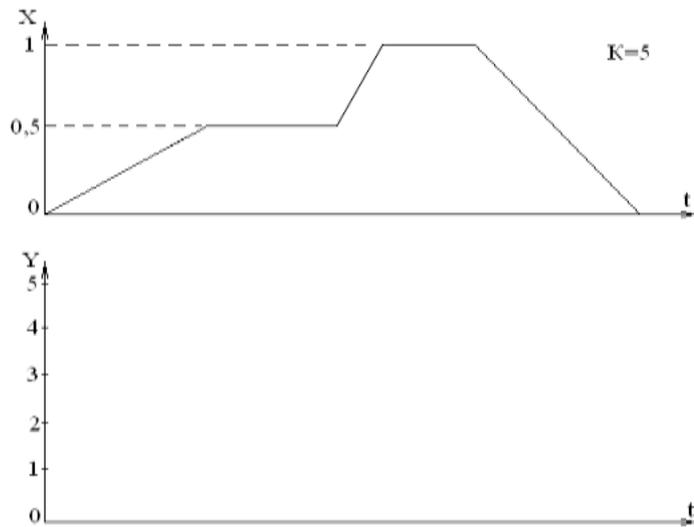


Рисунок 1 – Пропорциональное звено.

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

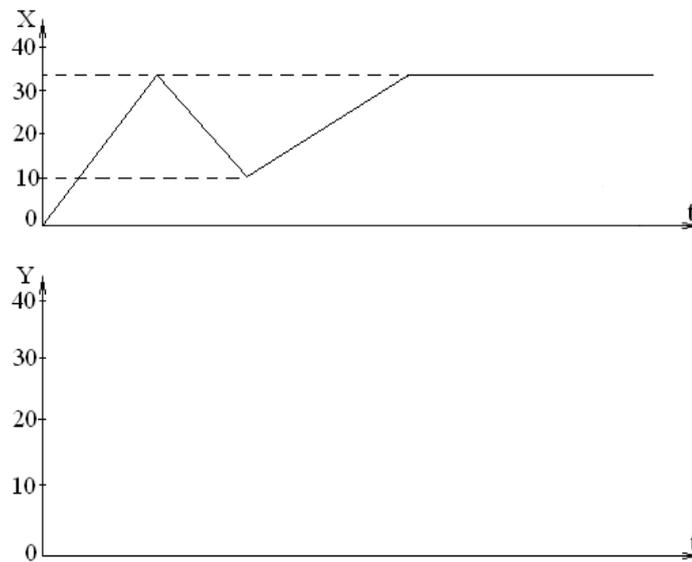


Рисунок 2 – Инерционное звено.

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

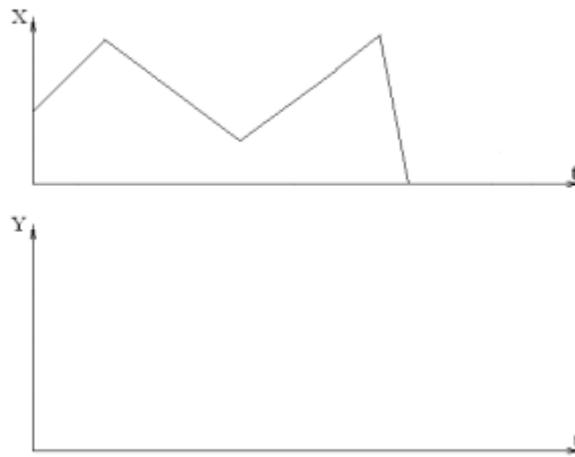


Рисунок 3 – Интегрирующее звено.

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

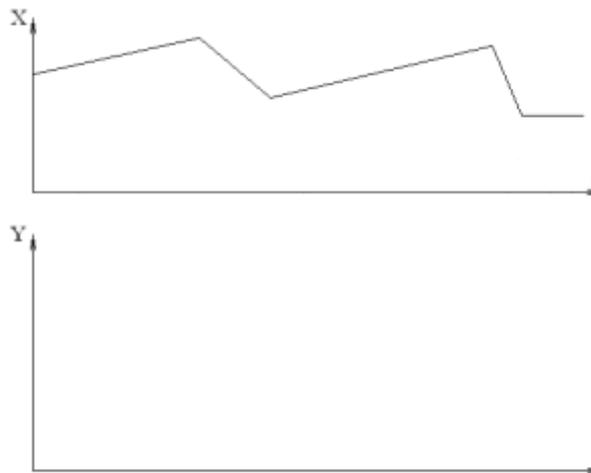


Рисунок 4 – Дифференцирующее звено.

6. Ответить на контрольные вопросы:
- в чем особенность инерционных звеньев?
  - объяснить построение выходного сигнала интегрирующего и дифференцирующего звеньев.

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале

### Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

#### Практическое занятие № 2

Расчет траектории выходного параметра инерционного звена I порядка методом Эйлера

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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:

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

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 термопары, имеющей постоянную времени 2с, при мгновенном погружении ее из среды тающего льда в кипящую воду, т.е.  $t_0 = 0$  °С,  $t_k = 100$  °С.

При  $\tau=0$   $X_{\text{вых}}(\tau)=0$ ,  $X_{\text{вх}}(\tau)=100$  °С

$$\frac{dX_{\text{вых}}(\tau)}{d\tau} \Big|_{(\tau=0)} = \frac{1}{2} [100 - 0] = 50 .$$

$$\text{При } \tau=1 \quad X_{\text{вых}}(\tau) = X_{\text{вых}}(0) + \frac{dX_{\text{вых}}(\tau)}{d\tau} \Big|_{(\tau=0)} = 0 + 50 = 50$$

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

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

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

**При  $\tau=3$**   $X_{\text{бблх}}(\tau) = X_{\text{бблх}}(2) + \frac{dX_{\text{бблх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=2) = 75 + 12,5 = 87,5$

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

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

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

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

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

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

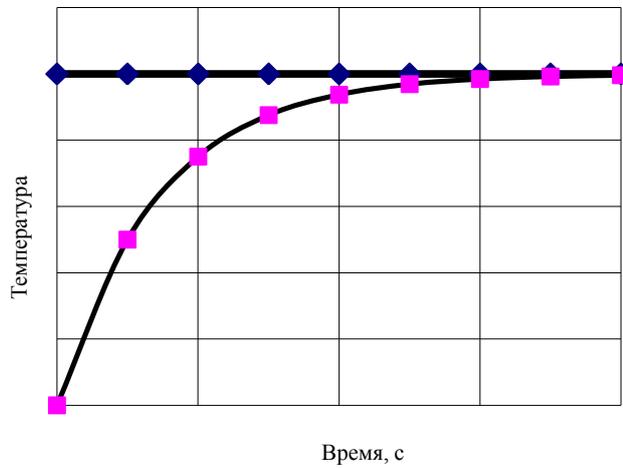
$$\frac{dX_{\text{бблх}}(\tau)}{d\tau} \quad (\tau=6) = \frac{1}{2} [100 - 98,4375] = 0,78125$$

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

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

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

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



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

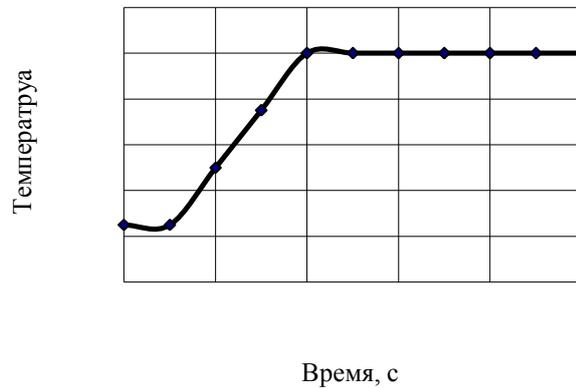


Рисунок 5 – Входной сигнал

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.

### **Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов**

#### **Практическое занятие № 3**

Расчет траектории выходного параметра инерционного звена II порядка методом Эйлера

#### **Формируемая компетенция:**

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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.

### Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

#### Практическое занятие № 4

Расчет передаточных функций систем при наличии обратных связей

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

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

#### Выполнив работу, Вы будете:

*уметь:*

- проводить необходимые технические расчеты электрических схем включения датчиков и схем предобработки 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:

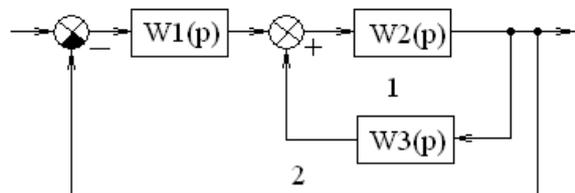
Передаточная функция замкнутой системы рассчитывается по следующей формуле:

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

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).

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

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

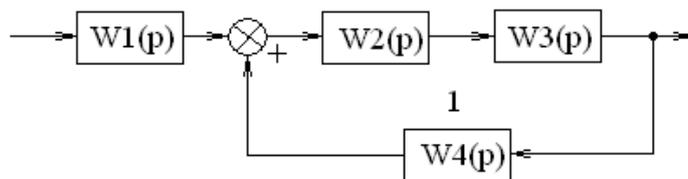
$$W_3^1(p) = \frac{W_2(p)}{W_3(p) - W_2(p)}.$$

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

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

Упростив полученное выражение, получаем:

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

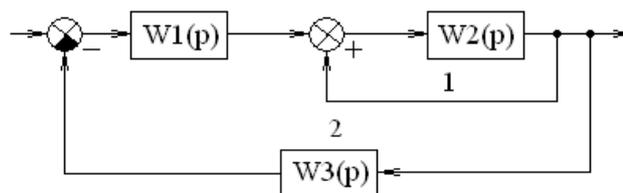


$$W_P^1(p) = W_2(p) \cdot W_3(p),$$

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

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

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



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

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

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

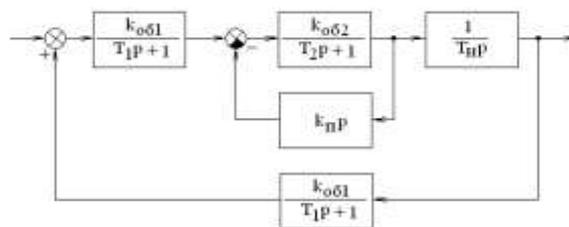
$$W_P^2(p) = W_1(p) \cdot W_3^1(p) = W_1(p) \cdot \frac{W_2(p)}{1 - W_2(p)},$$

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

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

**Порядок выполнения работы:**

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



$$k_{об1} = 1 \quad T_1 = 5c$$

$$k_{об2} = 2 \quad T_2 = 7c$$

$$T_и = 3c \quad k_п = 4$$

Рисунок 1.

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания в раздаточном материале.

## Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 5 Типовые законы регулирования

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

#### 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 регулирующий 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:

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

или

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

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  $k_{PI}$ , численно равный величине скорости перемещения вала исполнительного механизма, приходящейся на единицу отклонения регулируемой величины от задания, т.е.

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

При  $\Delta \xi = 1$   $k_{PI} = \Delta Y(\tau)/\Delta \tau$ , т.е. при  $\Delta \tau = 1$ с  $k_{PI}$  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  $T_I$ .

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

$$K_{OB} = \Delta \xi / \Delta Y \rightarrow \Delta Y_{\Theta} = \Delta \xi / K_{OB},$$

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

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

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

Передаточная функция И – регулятора имеет следующий вид:

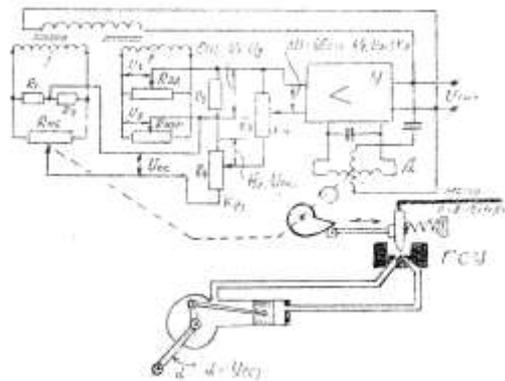
$$W(p)_И = \frac{1}{T_И \cdot p}.$$

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  $R_{oc}$ , движок которого механически связан с валом двигателя Д. На выходе моста формируется напряжение обратной связи  $U_{oc}$ , часть которого  $k_{p1} \cdot U_{oc}$  сравнивается с напряжением рассогласования  $\xi(\tau)$ . При среднем положении движка  $R_{oc}$  значение  $U_{oc}$  равно 0.

На вход электронного усилителя подается сигнал  $\Delta U = k_y(\xi(\tau) - k_{p1} \cdot U_{oc})$ . 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  $k_{p1} \cdot U_{oc}$  компенсировал сигнал рассогласования  $\xi(\tau)$  и в момент равенства сигнала  $\Delta U$  нулю на входе усилителя двигатель останавливается, т.е. обеспечивается условие  $\xi(\tau) = k_{p1} \cdot U_{oc}$ .

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.

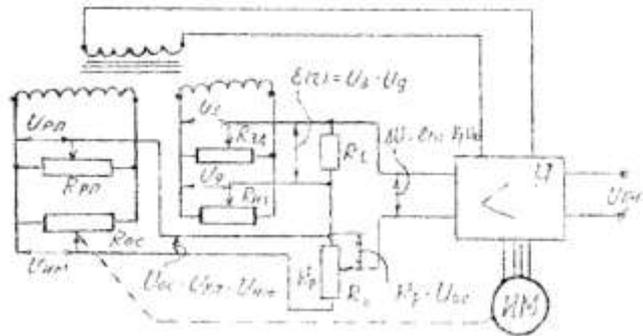
Передаточная функция П – регулятора имеет следующий вид:

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

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, контролирующий 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  $R_{РП}$  и  $R_{ОС}$ . Сигнал  $U_{ОС}$  представляет собой разность напряжений  $U_{РП}$  и  $U_{ОС}$ :

$$U_{ОС} = U_{РП} - U_{ОС}.$$

Сопротивление  $R_{РП}$  – 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 П – 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  $U_d$  остается прежним. И на вход усилителя поступает сигнал  $\xi(\tau)$ , равный  $\xi(\tau) = U_3(\tau) - U_d(\tau)$ , т.к.  $U_{OC} = 0$ .

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

$$T_{ИЗ} = \frac{k_P}{k_{P1}} = \frac{\frac{\Delta Y(\tau)}{\xi(\tau)}}{\frac{\Delta Y(\tau)}{\Delta \tau} \cdot \xi(\tau)} = \Delta \tau$$

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 ( $\Delta Y_2 = \Delta Y_1$ ).

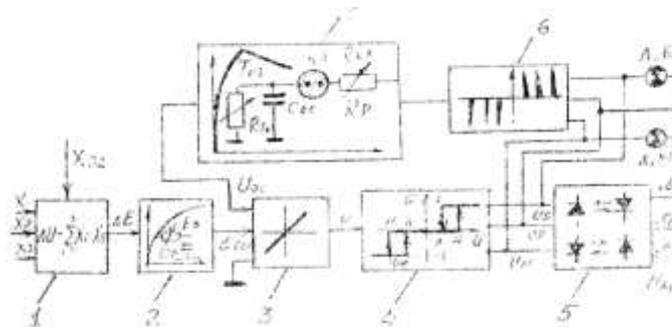
Поэтому время изодрома также называют временем удвоения.

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  $(1 + T_{ИЗ} p)$  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  $U = \xi(\tau) - U_{oc}$ , где  $U_{oc}$  – 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  $C_{oc} - R_{инт}$  соответственно интегральной части регулятора.

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

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

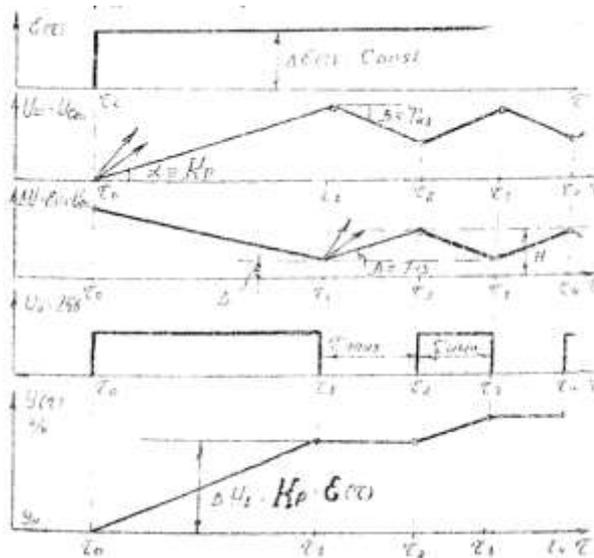
Допустим, что при  $\tau \ll 0$  в контуре регулирования  $\sum X_i = X_{зд}$ , т.е. сигнал рассогласования был равен 0  $\xi(\tau) = 0$ . Это значит, что  $U_{oc} = U_{Coc} = 0$ ,  $\Delta U = 0$ ,  $U_B = U_M = 0$  и исполнительный механизм был в положении  $Y_H$  (начальном).

В момент времени  $\tau = 0$  скачкообразно было увеличено значение  $X_{зд}$ , а все измерительные приборы, формирующие  $X_i$ , отключены, т.е.  $X_i = \text{const}$ . 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 увеличения 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  $U_{Coc}$  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  $\Delta U$ .

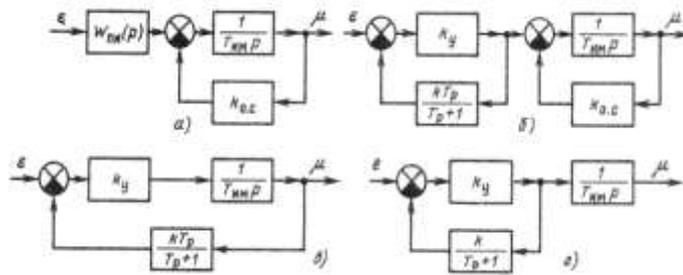
В момент времени  $\tau = \tau_4$  значение  $\Delta U = H$ , реле вновь сработает и т.д.

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 зарядного 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 ПИД – 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 придется на единицу изменения скорости отклонения регулируемой величины от задания (сигнала рассогласования), т.е.

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

$T_{II}$  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  $T_{I3} \rightarrow \infty$ , тогда ПИД-регулятор пре-

вращается в ПД – регулятор, т.к.  $\frac{1}{T_{I3}} \rightarrow 0$ .

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:

$$W(p)_{ПИ} = \frac{k_P \cdot (1 + T_{I3}p) \cdot (1 + T_{II}p)}{T_{I3}p}$$

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.

## Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 6

Определение показателей качества процесса регулирования

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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.

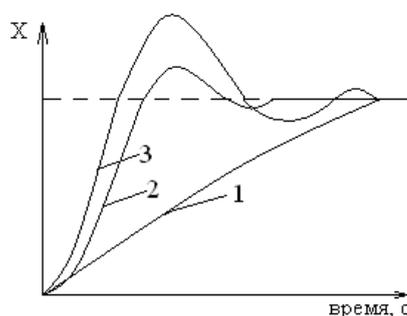
Существует три вида переходных процессов:

Проведя анализ данных переходных процессов, можно сделать определенные выводы:

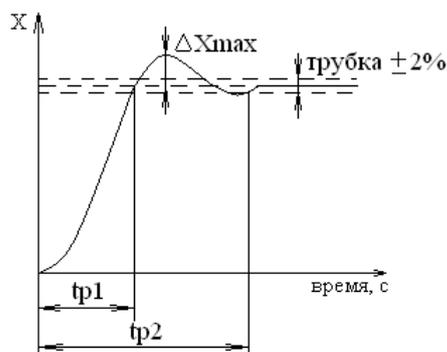
1 – переходной процесс слишком затянут, поэтому достижение нового установившегося состояния будет длиться долго.

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  $\Delta X_{\text{MAX}}$ .



$\tau_{p1}$  – 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  $K_{OB}$ ,  $\tau_3$ ,  $T_{OB}$ ,  $\psi$ ,  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\tau_{p1}$ ,  $\tau_{p2}$ ,  $\Delta X_{MAX}$ :

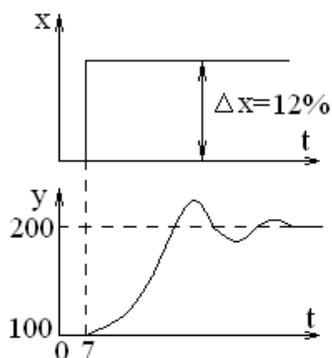


Рисунок 1 – Переходной процесс

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.

## Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 7

Построение годографа АФЧХ объекта по кривой разгона

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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  $\tau_z$ ,  $T_{OB}$  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:

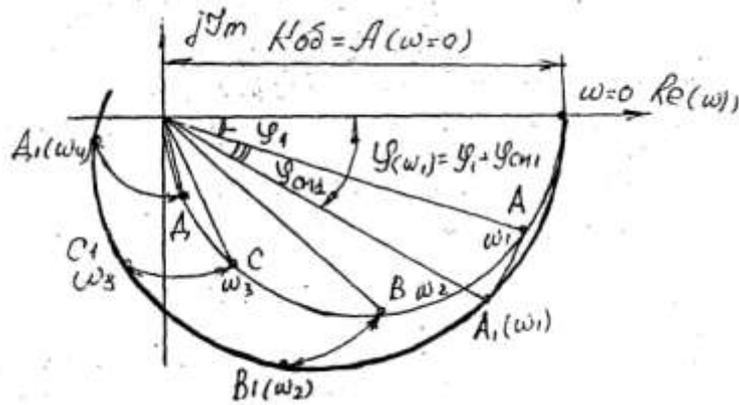
$$W(j\omega)_1 \cdot W(j\omega)_z = W(j\omega)_{OB},$$

где  $W(j\omega)_1$  – АФЧХ инерционного звена первого порядка;

$W(j\omega)_z$  – 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  $R = 0,5K_{Об}$ . Получаем  $W(j\omega)_1$ .
- 2) определяем частоты отдельных точек АФЧХ инерционного звена первого порядка. Поскольку нам известна величина  $T_{Об}$ , 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:

$$\omega_i = \frac{\text{tg} \varphi_i}{T_{Об}}$$

- 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:

$$\varphi_{см} = 57^\circ \cdot \omega_i \cdot \tau_3$$

где  $57^\circ$  – количество угловых градусов в одном радиане ( $360^\circ/2\pi$ );

радиан – это угол, соответствующий длине дуги, равной радиусу -  $2\pi R/R = 2\pi$  радиан =  $360^\circ$ ;

или

$$\varphi_{см} = \frac{57^\circ \text{tg} \varphi_i \tau_3}{T_{Об}}$$

В результате поворота каждого вектора  $W(j\omega)_1$  на угол  $\varphi_{см}$  получим искомый годограф АФЧХ объекта -  $W(j\omega)_{Об}$ .

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.

№	$\varphi_i, ^\circ$	$\operatorname{tg}\varphi_i$	$\omega_i$	$A(\omega_i)$	$\varphi_{CM}$

4. Построить годограф АФЧХ в комплексной плоскости

**Форма представления результата:**

Выполнение индивидуального задания.

## Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 8

Расчет устойчивости замкнутой системы АУ

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

#### 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  $N$  определителей, составленных из  $n$  строк и  $n$  столбцов, были положительны. В результате должно быть:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= a_1 > 0; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \\ \Delta_3 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0 \end{aligned}$$

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:

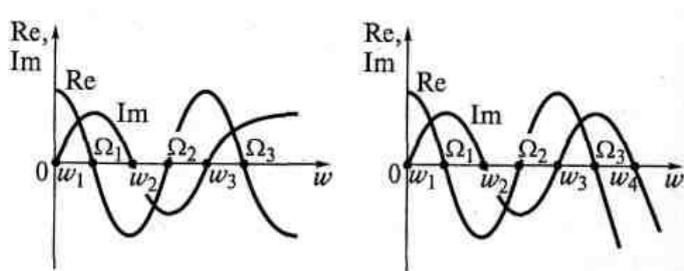
$$D(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + a_2 (j\omega)^{n-2} + \dots + a_n = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega),$$

где  $\text{Re}(\omega) = a_0 \omega^n - a_2 \omega^{n-2} + a_4 \omega^{n-4} - \dots + \omega^{2n} a_{n2}$ ;  
 $\text{Im}(\omega) = a_1 \omega^{n-1} - a_3 \omega^{n-3} + a_5 \omega^{n-5} - \dots + \omega^{2n-1} a_{n2-1}$ .

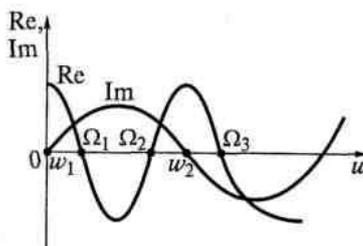
Задавая различные значения  $\omega$  и откладывая  $\text{Re}(\omega)$  по горизонтальной, а  $\text{Im}(\omega)$  по вертикальной осям системы координат, можно построить кривую, называемую **годографом характеристического вектора** или **кривой Михайлова**.

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:

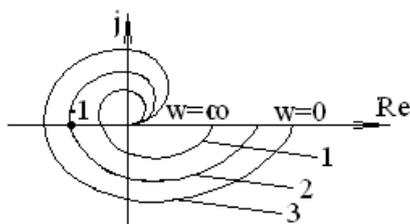


**Формулировка критерия Михайлова:** для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы характеристический вектор при изменении частоты от 0 до  $\infty$  повернулся в положительном направлении (начиная с положительной вещественной оси) на число квадрантов, равное порядку исходного уравнения.

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.

## Тема 3.1 Выбор законов регулирования на объектах, расчет и установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 9

#### Выбор закона регулирования и расчет оптимальных настроек регулятора

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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

$$W_p(p) = k_n \left( 1 + \frac{1}{T_{ин} p} + T_d p \right),$$

где  $k_n$ ,  $k_i$  – коэффициенты соответственно пропорциональной и интегральной частей;  
 $T_{ин}$  и  $T_{из}$  – постоянные времени интегрирования и изодрома.

Для упрощенной типовой модели с запаздыванием настроечные параметры регулятора принимают вид:

$$K_p = 0,95 / (k_{об} \tau_3 / T_{об}); \quad T_{ин} = 2,4 \tau_3; \quad T_d = 0,4 \tau_3.$$

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:

$$\text{АФЧХ: } W_p(j\omega) = K_p \sqrt{1/\omega^2 T_{ин}^2 + 1} * e^{j(\arctg \omega T_{ин} - \pi/2)};$$

$$\text{АЧХ: } A_p(\omega) = K_p / \sqrt{1/\omega^2 T_{ин}^2 + 1};$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi_p(\omega) = \arctg \omega T_{ин} - \pi/2.$$

3) для пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора:

$$\text{АФЧХ: } W_p(j\omega) = K_p \frac{\sqrt{(1 - TuT\partial\omega)^2 + Tu^2\omega^2}}{T_u\omega} * e^{j(\arctg \frac{T_u\omega}{1 - TuT\partial\omega^2} - \pi/2)};$$

$$\text{АЧХ: } A_p(\omega) = K_p \frac{\sqrt{(1 - TuT\partial\omega)^2 + Tu^2\omega^2}}{T_u\omega};$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi_p(\omega) = \arctg \frac{T_u\omega}{1 - TuT\partial\omega^2} - \pi/2.$$

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.

$\omega$	$W_p(j\omega)$	
	$A_p(\omega)$	$\varphi_p(\omega)$

Затем производится сравнение запасов устойчивости по фазе  $\gamma$  и по модулю а 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.

## установка параметров настройки регуляторов

### Практическое занятие № 10

#### Расчет запаса устойчивости

#### Формируемая компетенция:

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления

**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:

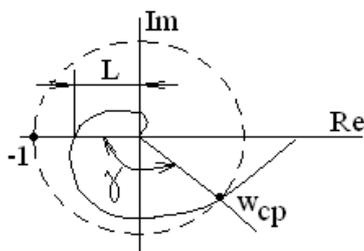
При определении устойчивости системы нет гарантий, что реальной системе будет соответствовать точно та точка области устойчивости, которая была найдена расчетным путем. Так, если расчетное состояние было слишком близко к границе устойчивости, то по указанным причинам реальная система может оказаться 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.

