



УКРАИНА  
Коллективное предприятие МИКРОЛ

УТВЕРЖДЕНО  
на заседании  
технического совета  
КП МИКРОЛ

20.03.2004 г.

СОГЛАСОВАНО  
Главный инженер  
КП МИКРОЛ

\_\_\_\_\_ Р. Й. Слободян

18.03.2004 г.

**ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ**  
**МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ**

**Инструкция**

**ПРМК.420000.001 И1**

*<http://www.microl.com.ua>  
e-mail: [support@microl.com.ua](mailto:support@microl.com.ua)*

*TN-010\_Pid\_Tuning  
Rev.1.01, 23.04.2004*

Разработал  
Главный конструктор  
КП МИКРОЛ

\_\_\_\_\_ А. Ю. Симановский

15.03.2004 г.

г. Ивано-Франковск  
2004

Инд. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
Указания мер безопасности .....	5
<b>1 Системы регулирования .....</b>	<b>6</b>
1.1 Структурная схема простейшей системы регулирования .....	6
1.2 Основные термины и определения .....	7
1.3 Классификация систем автоматического регулирования .....	9
1.4 Требования к промышленным САР .....	10
1.5 Классификация объектов управления .....	12
1.6 Классификация приборов и средств автоматизации .....	13
1.7 Первичные преобразователи. Датчики .....	13
1.8 Исполнительные механизмы. Регулирующие органы .....	15
<b>2 Характеристики и свойства систем управления .....</b>	<b>16</b>
2.1 Методы описания свойств систем управления .....	16
2.2 Статические характеристики .....	16
2.3 Динамические характеристики .....	17
2.4 Типовые звенья систем регулирования .....	18
2.4.1 Звено системы регулирования .....	18
2.4.2 Соединения звеньев систем регулирования .....	19
2.5 Передаточная функция .....	19
2.5.1 Преобразование дифференциальных уравнений по Лапласу .....	19
2.5.2 Экспериментальные методы определения динамических характеристик объектов управления .....	20
2.6 Определение параметров переходных характеристик .....	21
2.7 Типовые процессы регулирования .....	23
2.7.1 Аperiodический переходной процесс с минимальным временем регулирования .....	24
2.7.2 Переходной процесс с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода .....	24
2.7.3 Переходной процесс, обеспечивающий минимум интегрального критерия качества .....	24
2.8 Коэффициенты передачи элементов и блоков САР .....	25
2.8.1 Размерные коэффициенты передачи .....	25
2.8.2 Безразмерные коэффициенты передачи .....	25
2.9 Устойчивость систем управления .....	26
2.10 Показатели качества процесса управления .....	26
2.10.1 Установившееся значение выходной величины $Y_{уст}$ .....	27
2.10.2 Степень затухания $\Psi$ .....	27
2.10.3 Время достижения первого максимума $t_{max}$ .....	27
2.10.4 Время регулирования $t_p$ .....	27
2.10.5 Ошибка регулирования $\epsilon_{ст}$ .....	27
2.10.6 Перерегулирование $y$ .....	28
2.10.7 Динамический коэффициент регулирования $R_d$ .....	28
2.10.8 Показатель колебательности $M$ .....	29

Ивл. № докум.				
Подп. и дата				
Взамен ивл. №				
Ивл. № дубл.				
Подп. и дата				

					ПРМК.420000.001 И1			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<b>ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ</b>	Лит.	Лист	Листов
					<b>Инструкция</b>		2	16
Разработал	Симановский				<b>КП МИКРОЛ</b>			
Проверил	Парасюк							
Реценз.								
Н. контр.	Симановский							
Утверд.	Демчина							

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>3</b>	<b>Типы регуляторов. Законы регулирования .....</b>	<b>30</b>
3.1	Двухпозиционные регуляторы .....	30
3.1.1	Назначение. Принцип работы .....	30
3.1.2	Алгоритмы двухпозиционного регулирования .....	31
3.1.3	Зона гистерезиса .....	31
3.1.4	Процессы регулирования с двухпозиционным законом .....	31
3.1.5	Виды и логика работы двухпозиционных регуляторов и систем сигнализации .....	32
3.1.6	Достоинства и недостатки двухпозиционных регуляторов .....	36
3.2	Трёхпозиционные регуляторы .....	37
3.2.1	Назначение. Принцип работы .....	37
3.2.2	Алгоритмы трёхпозиционного регулирования .....	38
3.2.3	Зона гистерезиса .....	39
3.2.4	Процессы регулирования с трёхпозиционным законом .....	39
3.2.5	Параметры настройки трёхпозиционных регуляторов .....	40
3.2.6	Трёхпозиционное импульсное управление .....	41
3.3	Многопозиционные регуляторы .....	42
3.3.1	Назначение. Принцип работы .....	42
3.3.2	Алгоритм многопозиционного регулирования .....	42
3.3.3	Зона гистерезиса .....	43
3.3.4	Процессы регулирования с многопозиционным законом .....	43
3.3.5	Параметры настройки многопозиционных регуляторов .....	43
3.3.6	Проектирование многопозиционных микропроцессорных систем управления .....	43
3.4	П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы .....	44
3.4.1	Типовые регуляторы и регулировочные характеристики .....	44
3.4.2	Структурные схемы непрерывных регуляторов .....	45
3.4.3	Согласование выходных устройств непрерывных регуляторов .....	46
3.4.4	Алгоритмы регулирования .....	*
3.4.5	Процесс регулирования .....	*
3.4.6	Реакция регулятора на единичное ступенчатое воздействие .....	48
3.5	Адаптивные регуляторы .....	50
<b>4</b>	<b>Выбор закона регулирования и типа регулятора .....</b>	<b>51</b>
4.1	Задача выбора закона управления и типа регулятора .....	51
4.2	Определение динамических характеристик объекта регулирования .....	51
4.3	Показатели качества процесса регулирования для непрерывных регуляторов .....	51
4.4	Рекомендации по выбору закона регулирования и типа регулятора .....	51
4.4.1	П-закон регулирования .....	53
4.4.2	ПИ-закон регулирования .....	53
4.4.3	ПИД-закон регулирования .....	53
<b>5</b>	<b>Направление действия регулятора, объекта регулирования и исполнительного механизма .....</b>	<b>54</b>
5.1	Основные положения и определения .....	54
5.1.1	Направление действия объекта регулирования .....	54
5.1.2	Измерительные преобразователи прямого действия .....	54
5.1.3	Исполнительный механизм (клапан) прямого действия .....	54
5.1.4	Направление действия регулятора .....	54
5.2	Согласование направления действия регулятора с объектом регулирования .....	55
5.3	Выбор направления действия регулятора .....	55

\* Содержание данных разделов будет представлено в следующей редакции


## СОДЕРЖАНИЕ

<b>6 Методы настройки регуляторов .....</b>	<b>57</b>
6.1 Определение оптимальных настроек регуляторов .....	57
6.2 Установка параметров регулирования без знания характеристик объекта .....	58
6.3 Ручная установка параметров регулирования по переходной функции .....	59
6.4 Метод Циглера-Никольса разомкнутой системы с самовыравниванием .....	*
6.5 Метод Циглера-Никольса разомкнутой системы без самовыравнивания .....	*
6.6 Метод Циглера-Никольса замкнутой системы .....	*
6.7 Метод макс Ку для замкнутой системы .....	*
6.8 Метод для затухающих колебаний .....	*
6.9 Метод Кохен-Кунса .....	*
6.10 Метод настройки каскадных регуляторов .....	*
6.11 Метод настройки двухсвязанных регуляторов .....	*
6.12 Влияние неоптимальных настроек регуляторов на объект управления .....	*
<b>7 Рекомендации по проектированию и настройке систем регулирования .....</b>	<b>60</b>
7.1 Выбор параметра и канала регулирования .....	60
7.2 Выбор периода квантования .....	60
7.3 Регулирование при наличии шумов .....	60
7.4 Способы увеличения точности регулирования двухпозиционных регуляторов .....	61
<b>Приложение А. Список литературы .....</b>	<b>*</b>
<b>Приложение Б. Перечень иллюстраций .....</b>	<b>*</b>
<b>Приложение В. Перечень таблиц .....</b>	<b>*</b>
<b>Приложение Г. Глосарий .....</b>	<b>*</b>
<b>ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ .....</b>	<b>63</b>

\* Содержание данных разделов будет представлено в следующей редакции

Инов. № докум.	
Подп. и дата	
Взамен инв. №	
Инов. № дубл.	
Подп. и дата	

					ПРМК.420000.001 И1	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

## ВВЕДЕНИЕ

Данная инструкция предназначена для оказания практической помощи пользователям по настройке систем регулирования на базе продукции предприятия МИКРОЛ (регуляторов, индикаторов-регуляторов, программируемых контроллеров и др.).

**Инструкция предназначена для:**

- пусконаладочных организаций и подразделений,
- проектантов средств автоматизации,
- для наладчиков систем автоматизации и управления технологическими процессами,
- персонала по обслуживанию и эксплуатации КИПиА.

Основной задачей при построении систем автоматического регулирования является правильный выбор, установка, наладка и эксплуатация систем регулирования. В настоящее время автоматизируются все более сложные объекты, а также наблюдается тенденция вытеснения аналоговых систем управления цифровыми. Объясняется это широкими возможностями по реализации самых совершенных алгоритмов регулирования, что, в свою очередь, гарантирует получение высокой точности и хорошего быстродействия в замкнутой системе непосредственного цифрового управления.

Поэтому для применения систем управления и регулирования от пользователя требуются определенные знания по теории автоматического управления.

В данной инструкции представлены основные структурные схемы систем регулирования, приведены основные термины и определения теории автоматического управления. Приведена классификация систем автоматического регулирования и объектов управления, логика работы различных типов регуляторов.

Представленные рекомендации по определению динамических свойств объекта, по выбору типа регулятора с соответствующим законом регулирования, а также методы настройки регуляторов окажут практическую помощь пользователям при наладке и эксплуатации различных систем управления.

Используя представленную техническую информацию о системах регулирования и методах их настройки пользователи могут настраивать регуляторы на базе систем управления других производителей.

## УКАЗАНИЯ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

Обслуживающий персонал и наладчики систем управления при производстве работ **обязаны выполнять требования безопасности**, изложенные в инструкции по охране труда и технике безопасности, действующей на предприятии, разработанной с учетом действующих строительных норм и правил, Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей, а также требований инструкций заводов-изготовителей по эксплуатации применяемого оборудования, приспособлений, механизированного инструмента, технологической оснастки и средств защиты, применяемых в процессе работы.

При монтаже и эксплуатации **запрещается** проводить калибровку и перестройку входных и выходных аналоговых каналов, изменять конфигурацию регуляторов и управляющих систем при работающих соответствующих исполнительных механизмах технологической установки.

При вводе в эксплуатацию регуляторов, снятии динамических, статических характеристик объекта, переходных характеристик (кривых разгона) **необходимо:**

- руководствоваться рекомендациями и разрешениями персонала технологической установки для проведения данного вида работ, а также для того, чтобы не нарушить нормальной работы технологического процесса, не повредить оборудование, не поставить под угрозу жизнь персонала технологического объекта.

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

# 1 СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

## 1.1 Структурная схема простейшей системы регулирования

1.1.1 Структурная схема простейшей **замкнутой** системы регулирования приведена на рис.1.1.

Система регулирования находится в режиме автоматического управления.

В процессе работы система автоматического регулирования сравнивает текущее значение измеряемого параметра  $X$  с задающим воздействием (заданием  $SP$ , уставкой) и устраняет рассогласование  $E$  ( $E=SP-PV$ ). Внешние возмущающие воздействия  $Z$  также устраняются регулятором.

Например, при регулировании температуры в печи, задающим воздействием (заданием  $SP$ ) является требуемая температура воздуха, измеряемым и регулируемым параметром  $X$  - текущая температура в печи, рассогласованием  $E$  является их разница, управляющей величиной  $Y$  является напряжение, подаваемое на нагревательный элемент (например, ТЭН).

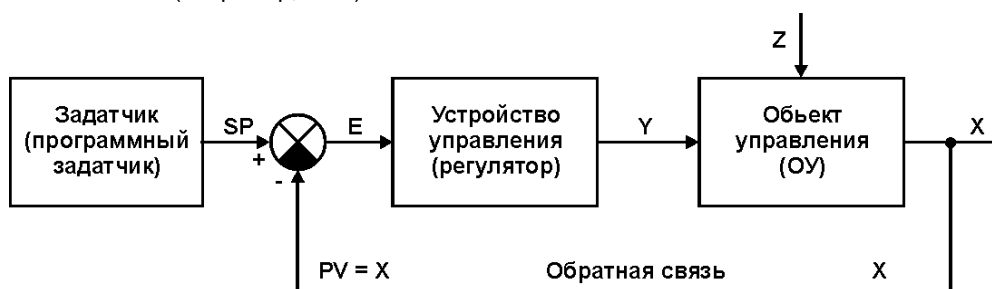


Рисунок 1.1 - Структурная схема замкнутой системы регулирования

где:  $SP$  – задающее воздействие; «задатчик» - ручной или программный задатчик (в частном случае оператор системы управления);  $X$  - контролируемый и регулируемый технологический параметр;  $E=SP-PV$  - рассогласование;  $Y$  - управляющий сигнал;  $Z$  - внешние возмущения; ОУ – объект управления.

1.1.2 Структурная схема простейшей **разомкнутой** системы регулирования приведена на рис.1.2.

Система регулирования находится в режиме ручного управления.

В процессе работы оператор анализирует (визуально) значение измеряемого параметра  $X$  (например, на технологическом индикаторе), и при необходимости, с помощью ручного задатчика, устанавливает необходимое значение технологического параметра  $X$ . Внешние возмущающие воздействия  $Z$  также устраняются оператором, вручную.

Например, при ручном регулировании температуры в печи, задающим воздействием  $SP$  является сигнал с ручного задатчика, измеряемым и регулируемым параметром  $X$  - текущая температура в печи, управляющей величиной  $Y$  является напряжение, подаваемое с ручного задатчика на нагревательный элемент (например, ТЭН).



Рисунок 1.2 - Структурная схема разомкнутой системы регулирования

где:  $SP$  – управляющее (задающее) воздействие;  $X$  - контролируемый технологический параметр;  $Y$  - управляющий сигнал;  $Z$  - внешние возмущения; ОУ – объект управления.

Изн. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						6

## 1.2 Основные термины и определения

В данном разделе приводятся основные термины и определения, используемые в теории автоматического управления (ТАУ).

Современные системы управления технологическими процессами характеризуются большим количеством и разнообразием технологических параметров, систем регулирования и объектов регулирования.

**1.2.1 Параметр технологического процесса** – физическая величина технологического процесса, например, температура, давление, расход, уровень, объем, масса, рН, напряжение и т.д. На рис.1.1 данная величина указана как **X** или **PV=X**, где **PV – Process Variable** – переменная процесса.

Данный параметр называется **входным воздействием (X)** - подаваемым на вход системы или устройства управления.

**1.2.2 Параметр технологического процесса**, который необходимо поддерживать постоянным, или изменять по заданной программе, или изменять по определенному закону, называется - **регулируемым параметром**.

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

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

Измеряемый и (или) регулируемый параметр технологического процесса может преобразовываться первичным прибором (датчиком) в какой-либо унифицированный сигнал. Если датчик выдает неунифицированный сигнал (например, термопары, термопреобразователи сопротивления, тензодатчики и др.), то для приведения его к стандартному диапазону должен быть установлен соответствующий нормализатор (преобразователь) сигналов. Также можно использовать измерители-регуляторы с универсальным входом, которые поддерживают подключение большинства наиболее распространенных типов первичных приборов (датчиков) без использования нормализаторов сигналов.

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

**1.2.4 Управление** – формирование управляющих воздействий по определенному закону, обеспечивающих требуемый режим работы ОУ.

**1.2.5 Автоматическое управление** – управление, осуществляемое без непосредственного участия человека.

**1.2.6 Регулятор** – устройство, обеспечивающее поддержание заданного значения (SP) регулируемой величины (PV) или автоматическое изменение ее по заданному закону.

**1.2.7 Задача регулирования** – доведение выходной величины X объекта регулирования до заранее определенного значения SP и удержания ее на данном значении с учетом влияния возмущающих воздействий.

**1.2.8 Система автоматического регулирования (САР)** – автоматическая система с замкнутой цепью воздействия (см. рис.1.1), в котором управление Y вырабатывается в результате сравнения истинного значения (PV=X) с заданным значением SP. Основное назначение **САР** заключается в поддержании заданного постоянного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону.

**1.2.9** Дополнительная связь в структурной схеме САР (см. рис.1.1), направленная от выхода к входу, называется **обратной связью (ОС)**. Обратная связь может быть отрицательной или положительной.

**1.2.10 Выходное воздействие (Y)** – воздействие, выдаваемое на выходе системы управления или устройства регулирования.

В литературе по автоматизации также встречаются аббревиатуры, соответствующие данному определению:

**MV – Manipulated Variable** – регулируемая (выходная) переменная,

**CO – Controlled Output** - регулируемая (выходная) переменная или мощность.

**1.2.11 Задающее воздействие (SP – Set Point Value, W, Wx, Wv)** – воздействие на систему, определяющее требуемый закон изменения регулируемой величины.

**1.2.12 Возмущающее воздействие (Z)** – воздействие, стремящееся нарушить функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной.

Главное назначение систем автоматической стабилизации – компенсация внешних возмущающих воздействий.

1) Виды возмущающих воздействий, действующие на систему стабилизации (систему управления), приведены в таблице 1.1:

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 7
Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата		

Таблица 1.1 - Виды возмущающих воздействий, действующие на систему стабилизации

Вид возмущающего воздействия	Действие системы управления	Примечания
1 Возмущения со стороны нагрузки на технологический объект	Компенсация внешнего возмущения	Наиболее неприятным случаем является возмущение по нагрузке, т. к. при этом: 1) обычно неизвестно место приложения возмущения; 2) неизвестен момент подачи возмущения; 3) неизвестен характер или вид возмущающей функции.
2 Возмущения в виде изменения сигнала задания на регулятор	Точная отработка сигнала задания	

2) Классификация видов возмущающих воздействий, действующих на систему управления или регулирования, приведена в таблице 1.2:

Таблица 1.2 - Классификация видов возмущающих воздействий

Классификация	Вид возмущающего воздействия	Место приложения возмущения	Примечания
1 По характеру изменения во времени	<ul style="list-style-type: none"> <li>• медленно меняющиеся</li> <li>• импульсные</li> <li>• случайные</li> </ul>		
2 По типам случайных возмущений	<ul style="list-style-type: none"> <li>• низкочастотные случайные возмущения</li> </ul>	Поступают на вход объекта управления	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• высокочастотные (шумы)</li> </ul>	Поступают на выход объекта управления	Необходима фильтрация шумов

Примечания.

1. В зависимости от характера преобладающих возмущений и типа системы управления выбирается и соответствующий критерий оптимизации настроек регулятора.

2. На практике возмущения по нагрузке чаще всего компенсируются соответствующим перемещением регулирующего органа, изменяющего расход вещества или количества подводимой энергии к объекту управления. Поэтому такое возмущение и приводят ко входу объекта, а его величину измеряют в процентах хода регулирующего органа.

1.2.13 **Рассогласование регулирования ( $E = SP - PV = SP - X$ )** – разность между заданным (SP) и действительным (PV) значением регулируемой величины.

1.2.14 **Отклонение регулирования ( $E = PV - SP = X - SP$ )** – разность между действительным (PV) значением и заданным (SP) значением регулируемой величины.

1.2.15 **Статическое регулирование.** При статическом регулировании регулируемая величина (например, температура), находящаяся под влиянием различных внешних воздействий (подача напряжения на ТЭН или подача охлаждающей жидкости) на регулируемый объект по окончании переходного процесса, принимает неодинаковые значения, зависящие от величины воздействия.

*Характерные особенности статической системы регулирования следующие:*

- 1) равновесие системы возможно при различных значениях регулируемой величины;
- 2) каждому значению регулируемой величины соответствует определенное положение регулирующего органа.

1.2.16 **Астатическое регулирование.** При астатическом регулировании нет определенной связи между положением регулирующего органа и установившимся значением регулируемой величины.

При астатическом регулировании при различных по величине значениях внешнего возмущающего воздействия (нагрузки) на объект по окончании переходного процесса восстанавливается значение регулируемой величины.

*Характерные особенности астатической системы регулирования следующие:*

- 1) равновесие системы возможно только при единственном значении регулируемой величины (например, уровня), причем это значение равно заданному;
- 2) регулирующий орган (например, клапан, заслонка) должен иметь возможность занимать различные положения при неизменном значении регулируемой величины.

У астатических регуляторов отсутствует статическая ошибка и регулируемая величина остается равной заданной с точностью, соответствующей нечувствительности регулятора для всех равновесных состояний системы.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						8



### 1.3 Классификация систем автоматического регулирования

Классификация систем автоматического регулирования (САР) приведена в таблице 1.3.

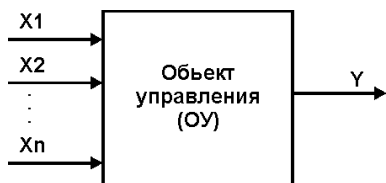
Таблица 1.3 - Классификация систем автоматического регулирования

Классификация САР	Краткая характеристика САР	
	1 По назначению алгоритма изменения задающего воздействия (или по виду выполняемых функций)	Стабилизирующая
Программная		Изменяет регулируемую величину в соответствии с функцией задания во времени – программные задатчики. $SP=F[SPprog(t)]$
Следящая		Задача состоит в том, чтобы изменения регулируемой величины следили за изменениями другого параметра. $X=var$
С управлением от ПЭВМ		Изменяет регулируемую величину в зависимости от заранее неизвестной величины заданной точки. Значение задания регулятору формируется по интерфейсу. $X=var$
2 По количеству контуров регулирования	Одноконтурные	Содержащие один контур регулирования
	Многоконтурные	Содержащие несколько контуров регулирования (в т.ч. каскадные регуляторы, регуляторы ограничения)
3 По количеству регулируемых технологических параметров	Однокомпонентные	Системы с одной регулируемой величиной
	Многокомпонентные <i>несвязанные</i>	Системы с несколькими регулируемыми величинами. Регуляторы непосредственно не связаны и могут взаимодействовать только через общий для них объект регулирования
	Многокомпонентные <i>связанные</i>	Системы с несколькими регулируемыми величинами. Регуляторы различных параметров одного или нескольких объектов связаны между собой: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Регуляторы со статической и/или динамической коррекцией параметра или заданной точки</li> <li>● Регуляторы соотношения нескольких параметров с постоянным или управляемым коэффициентом соотношения</li> <li>● Каскадные регуляторы</li> <li>● Регуляторы ограничения (с макс. или мин. ограничением)</li> </ul>
4 По своему функциональному назначению	Специализированные	САР температуры, давления, расхода, уровня, объема и др.
	Универсальные	С нормированными входными и выходными сигналами и пригодные для управления различными параметрами
5 По закону регулирования или логике работы контура регулирования	Двухпозиционный	См. раздел 3
	Трехпозиционный	
	П,ПИ,ПИД-регулятор	
	ШИМ-регулятор	
	Адаптивные	Самонастраивающиеся, автонастраивающиеся
Оптимальные	Использующие оптимальный закон регулирования	
6 По характеру используемых для управления сигналов (по роду действия)	Непрерывные	Аналоговые сигналы (ток, напряжение). Частный случай – выходной сигнал ШИМ регулятора (с дискретным выходом)
	Дискретные	Релейные, импульсные, цифровые. Выходные устройства – механическое реле, твердотельное реле, симистор, тиристор, транзисторный ключ, интерфейс
7 По характеру математических соотношений	Линейные	Для которых справедлив принцип суперпозиции (см. прим.1)
	Нелинейные	Для которых не справедлив принцип суперпозиции (см. прим.1)
8 По виду используемой для регулирования энергии	Электрические	В т.ч. электронные
	Пневматические	Мембранные, поршневые, лопастные
	Гидравлические	
	Механические	
	Комбинированные	Электропневматические, пневмо-, электромеханические
9 По принципу регулирования	По рассогласованию	См. прим.2
	По отклонению	См. прим.2
	По возмущению	См. прим.3
	Комбинированные	См. прим.4
10 По направлению действия	Прямые	Регуляторы прямого (нормального) действия
	Обратные	Регуляторы обратного (реверсивного) действия
11 По принципу действия	Прямого действия	Не используют внешнюю энергию, а используют энергию самого объекта управления (регуляторы давления)
	Непрямого действия	Для работы требуется внешний источник энергии

Инв. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Примечания к таблице 1.3:

1) **Принцип суперпозиции** (наложения): Если на вход объекта подается несколько входных воздействий (или возмущений) - см. рис. 1.3, то реакция объекта на сумму входных воздействий равна сумме реакций объекта на каждое воздействие в отдельности.



$$Л(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = Л(X_1) + Л(X_2) + \dots + Л(X_n) \quad (1.1)$$

Рисунок 1.3 - Пояснение принципа суперпозиции

2) Подавляющее большинство систем построено по принципу обратной связи - регулирования по рассогласованию или регулирования по отклонению – см. рис.1.4:

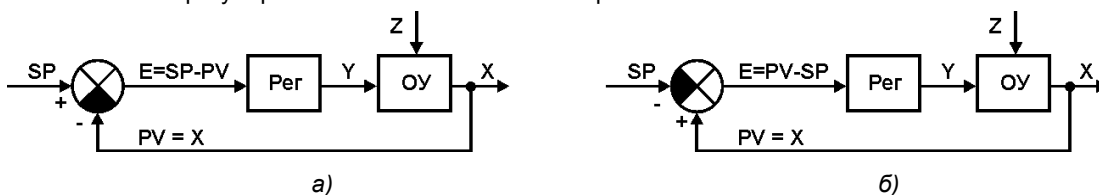


Рисунок 1.4 - Регулирование по рассогласованию а) и регулирование по отклонению б)

3) Принцип регулирования по возмущению (принцип компенсации) – см. рис.1.5:

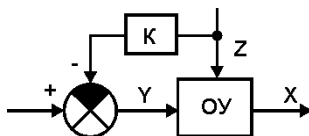


Рисунок 1.5 - Регулирование по возмущению, где: K - усилитель с коэффициентом усиления K

4) Комбинированный принцип регулирования по рассогласованию и возмущению – см. рис. 1.6:

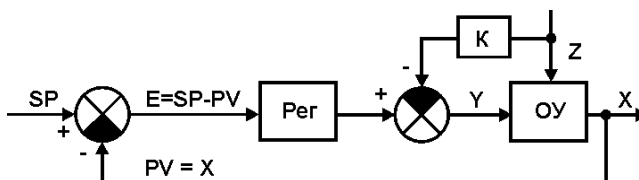


Рисунок 1.6 - Регулирование по рассогласованию и возмущению

Комбинированный принцип регулирования (см. рис. 1.6) сочетает в себе особенности принципов регулирования по рассогласованию (отклонению) и возмущению. Этот способ достигает высокого качества управления.

Ограничения применения комбинированного принципа регулирования:

- не всегда можно измерить возмущающий фактор Z,
- не всегда можно экспериментально определить степень воздействия,
- не всегда можно составить математическую модель объекта управления,
- не всегда представляется возможным установить датчик (или очень дорого).

Инв. № докум.	
Подп. и дата	
Взамен инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

## 1.4 Требования к промышленным САР

Для того чтобы технологическое оборудование работало с высоким КПД, с заданной производительностью, давало продукцию необходимого качества и работало надежно, необходимо поддерживать величины, характеризующие процесс, в большинстве случаев постоянными. Эта важнейшая задача возложена на промышленные системы автоматического регулирования и стабилизации технологических процессов.

В системах стабилизации - сигнал заданной точки (задания, уставка регулятора) остается постоянным в течении длительного времени работы. Другой, не менее важной задачей, является задача программного управления технологическим агрегатом, что обеспечивает переход на новые режимы работы. Решение этой проблемы осуществляется с помощью той же системы автоматической стабилизации, задание которой изменяется от программного задатчика.

Для большинства промышленных САР необходима достаточно высокая точность их работы  $\pm(1-1.5)\%$ . При этом главное назначение системы стабилизации - это компенсация внешних возмущающих воздействий, действующих на объект управления.

Структурная схема одноконтурной САР промышленным объектом управления приведена на рис. 1.7:

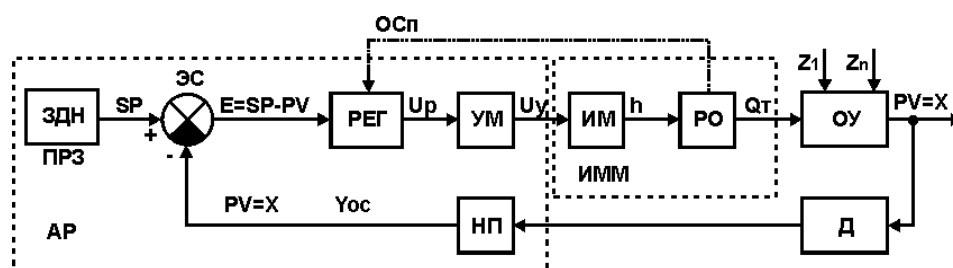


Рисунок 1.7 - Структурная схема одноконтурной САР промышленным объектом управления

Пояснения к рисунку 1.7:

**Основные элементы:** ЗДН – задатчик, ПРЗ – программный задатчик, ЭС - элемент сравнения, РЕГ - автоматический регулятор, УМ - усилитель мощности, АР - автоматический регулятор (современные регуляторы объединяют узлы ЗДН, ПРЗ, РЕГ, УМ, НП), ИМ - исполнительный механизм, РО - регулируемый орган, ОСп - обратная связь по положению регулирующего органа, ОУ - объект управления, Д – датчик (первичный преобразователь), НП - нормирующий преобразователь (в современных микропроцессорных системах управления и регуляторах, является встроенным входным устройством).

**Обозначение переменных:** SP- задающий сигнал, E - ошибка регулирования, Uр- выходной сигнал регулятора, Uу - управляющее напряжение, h - перемещение регулирующего органа, Qт- расход вещества или энергии, Z - возмущающие воздействия, PV=X - регулируемый параметр (например температура), Yос - сигнал обратной связи (выходное напряжение или ток преобразователя).

Характерной особенностью схемы является наличие нормирующего преобразователя НП, обеспечивающего работу автоматического регулятора со стандартными значениями тока (0-5, 0-20, 4-20mA) или напряжения (0-10 В). Нормирующий преобразователь НП выполняет следующие функции:

- 1) преобразует нестандартный входной сигнал (mB, Ом) в стандартный выходной сигнал;
- 2) осуществляет фильтрацию входного сигнала;
- 3) осуществляет линеаризацию статической характеристики датчика;
- 4) применительно к термопаре, осуществляет температурную компенсацию холодного спая.

В современных промышленных регуляторах нормирующий преобразователь НП как правило является обязательной составной частью входного устройства регулятора АР (см. рис. 1.7).

### Основные требования к промышленным САР:

1) Промышленная САР должна обеспечивать устойчивое управление процессом во всем диапазоне нагрузок на технологический объект.

2) Система должна обеспечивать в окрестности рабочей точки заданное качество процессов управления (время переходного процесса, перерегулирование и колебательность).

3) Система должна обеспечивать в установившемся режиме заданную точность регулирования. Желательно обеспечить нулевую статическую ошибку регулирования.

Все эти условия будут выполняться, если объект управления является стационарным, либо его вариации параметров достаточно малы и компенсируются запасами устойчивости системы.

Современные промышленные регуляторы обеспечивают устойчивый процесс регулирования подавляющего большинства промышленных объектов при условии, что правильно выбраны настройки регулятора.

Чем выше требования к качеству регулирования, тем более сложной и дорогой будет система. Поэтому при создании САР стремятся найти разумный компромисс между качеством регулирования и затратами на автоматизацию технологического процесса.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						11

## 1.5 Классификация объектов управления

Объектом управления может быть, например, печь, ректификационная колонна, реактор, теплообменник, а также группа технологических аппаратов или другое технологическое оборудование.

Классификация объектов управления (ОУ) приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Классификация объектов управления

Классификация объектов управления	Краткая характеристика объекта управления
1 По характеру протекания технологического процесса	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Циклические, периодические</li> <li>• Непрерывно-циклические</li> <li>• Непрерывные</li> </ul>
2 По характеру установившегося значения выходной величины объекта  * При подаче вход объекта ступенчатого (пробного) сигнала	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Объекты с самовыравниванием *. <i>Самовыравниванием</i> процесса регулирования называется свойство регулируемого объекта после нарушения равновесия между притоком и расходом вернуться к этому состоянию самостоятельно, без участия человека или регулятора. Самовыравнивание способствует более быстрой стабилизации регулируемой величины и, следовательно, облегчает работу регулятора.</li> <li>• Объекты без самовыравнивания *</li> </ul>
3 По структуре объекта	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Без запаздывания</li> <li>• С запаздыванием. Наличие значительных запаздываний - это характерная особенность большинства технологических объектов. Наличие запаздывания объясняется конечной скоростью распространения потоков информации в технологических объектах (транспортное запаздывание)</li> </ul>
4 По количеству входных и выходных величин и их взаимосвязи	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Одномерные (один вход и один выход)</li> <li>• Многомерные <i>многосвязные</i> - когда наблюдается взаимное влияние технологических параметров друг на друга</li> <li>• Многомерные <i>несвязные</i> - взаимосвязь между каналами которых мала</li> </ul>
5 По виду статических характеристик и характеру математических соотношений	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Линейные</li> <li>• Нелинейные</li> </ul>
6 По поведению в статическом режиме	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Статические. Имеется однозначная зависимость между входным и выходным воздействиями (состояние статики). Примером является любой тепловой объект.</li> <li>• Астатические. Зависимость отсутствует. Пример: Зависимость угла поворота ротора электродвигателя от приложенного напряжения. При подаче напряжения угол поворота будет постоянно возрастать, поэтому однозначной зависимости у него нет.</li> </ul>
7 По распределенности объекта управления	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Локальные объекты управления</li> <li>• Распределенные объекты управления</li> </ul>
8 По типу стационарности объекта	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Стационарные</li> <li>• Нестационарные. Параметры нестационарного объекта с течением времени изменяются. Например, химический реактор с катализатором, активность которого падает с течением времени, или летательный аппарат, масса которого уменьшается по мере выгорания топлива</li> </ul>
9 По зависимости от интенсивности случайных возмущений действующих на объект	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Стохастические</li> <li>• Детерминированные</li> </ul>
10 По направлению действия	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Объекты прямого (нормального) действия</li> <li>• Объекты обратного (реверсивного) действия</li> </ul>
11 По способности запасать рабочую среду (емкостные и многоемкостные объекты)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Не емкостные объекты</li> <li>• Емкостные объекты. Объекты регулирования обладают способностью аккумулировать рабочую среду внутри объема. Запас накопленной объектом энергии (вещества) называется емкостью объекта. Физически она проявляется в виде теплоемкости, геометрической емкости резервуара, инерционности движущихся масс и т.п. Например, емкость бака с водой зависит от его размеров. Чем больше бак, тем медленнее будет изменяться уровень при нарушении соответствия между притоком и расходом. Особенность большинства объектов управления является их многоемкостность ( наличие каскадов или цепочек технологических объектов). Многоемкостность приводит к повышению порядка дифференциального уравнения объекта т.е. к появлению множества достаточно малых постоянных времени объекта.</li> </ul>

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						12

## 1.6 Классификация приборов и средств автоматизации

Приборы и средства автоматизации представляют собой совокупность технических средств, включающих в себя средства измерения и средства автоматизации, предназначенные для восприятия, преобразования и использования информации для контроля, регулирования и управления.

**Структура системотехнических основ построения и развития системы приборов** базируется на стандартизованных принципах и методах:

- 1) унификации сигналов, интерфейсов, конструкций, модулей и блоков,
- 2) минимизации номенклатуры,
- 3) формирование гибких, программируемых и перестраиваемых компонентов системы,
- 4) реализации в изделиях рациональных эстетических и эргономических требований.

Единая государственная система промышленных приборов и средств автоматизации содержит три ветви: гидравлическую, пневматическую и электрическую.

Блочно-модульный принцип характеризуется наличием отдельных модулей или блоков, выполняющих достаточно простую функцию. Этот принцип позволяет уменьшить номенклатуру средств автоматизации, упрощает ремонт и замену, уменьшает стоимость, позволяет реализовать принцип взаимозаменяемости.

### Унифицированные сигналы:

- 1) Пневматические - сигналы давления сжатого воздуха имеют диапазон изменения сигнала: 0,2-1 кгс/см<sup>2</sup> или 0,02-0,1 МПа; сигнал питания: 1,4 кгс/см<sup>2</sup>; расстояние передачи сигнала: до 300 м.
- 2) Электрические сигналы имеют много диапазонов, которые можно разделить на две группы:
  - а) сигналы постоянного тока, например: 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА и др.;
  - б) сигналы напряжения постоянного тока, например: 0-1 В, 0-10 В и др.

**Первичные приборы (датчики)** могут преобразовывать измеряемый параметр в какой-либо унифицированный сигнал. Если же датчик выдает неунифицированный сигнал, то для приведения его к стандартному диапазону должен быть установлен соответствующий нормирующий преобразователь.

### Классификация приборов:

На различных технологических производствах и других объектах наиболее часто измеряемыми величинами являются температура, давление, расход и уровень. На них приходится около 80 % всех измерений. Остальную часть занимают электрические, оптические и др. виды измерения.

При измерениях используются различные измерительные приборы, которые классифицируются по ряду признаков. Общей градацией является разделение их на приборы для измерения: механических, электрических, магнитных, тепловых и других физических величин.

Классификация по роду измеряемой величины указывает, какую физическую величину измеряет прибор (давление  $P$ , температуру  $T$ , расход  $F$ , уровень  $L$ , количество вещества  $Q$  и т.д.).

Исходя из признака преобразования измеряемой величины, измерительные приборы разделяют на приборы: непосредственной оценки или сравнения.

По характеру изменения: стационарные и переносные.

По способу отсчета измеряемой величины: показывающие, регистрирующие, суммирующие.

## 1.7 Первичные преобразователи. Датчики

**Первичные приборы, датчики или первичные преобразователи** предназначены для непосредственного преобразования измеряемой величины в другую величину, удобную для измерения или использования. Выходными сигналами первичных приборов, датчиков являются как правило унифицированные стандартизованные сигналы, в противном случае используются нормирующие преобразователи (см. рис.1.8).

### Различают генераторные, параметрические и механические преобразователи:

- 1) Генераторные осуществляют преобразование различных видов энергии в электрическую, то есть они генерируют электрическую энергию (термоэлектрические, пьезоэлектрические, электростатические, гальванические и др. датчики).
- 2) К параметрическим относятся реостатные, тензодатчики, термосопротивления и т.п. Данным приборам для работы необходим источник энергии.
- 3) Выходным сигналом механических первичных преобразователей (мембранных, манометров, дифманометров, ротаметров и др.) является усилие, развиваемое чувствительным элементом под действием измеряемой величины.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

										Лист
										13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1					

## Основные структурные схемы подключения первичных преобразователей



Рисунок 1.8 - Основные структурные схемы подключения первичных преобразователей

Пояснения к рисунку 1.8. Первичный преобразователь, датчик Д может иметь выходной унифицированный сигнал см.рис.1.8.а и неунифицированный сигнал см.рис.1.8.б. Во втором случае используют нормирующие преобразователи НП.

Нормирующий преобразователь НП выполняет следующие функции: преобразует нестандартный неунифицированный сигнал (например, mV, Ом) в стандартный унифицированный выходной сигнал; осуществляет фильтрацию входного сигнала; осуществляет линеаризацию статической характеристики датчика; применительно к термопаре, осуществляет температурную компенсацию холодного спая.

Нормирующий преобразователь НП применяется, также в следующих случаях: когда необходимо подать сигнал измеряемой величины на несколько измерительных или регулирующих приборов; а также когда необходимо передать сигнал на большие расстояния, например сигнал от термопары передается на малые расстояния - до 10м, а унифицированный сигнал постоянного тока может передаваться на большие расстояния - до 100м.

В современных промышленных регуляторах нормирующий преобразователь НП как правило является обязательной составной частью входного устройства регулятора.

### 1.7.1 Первичные преобразователи для измерения температуры:

По термодинамическим свойствам, используемым для измерения температуры, можно выделить следующие типы термометров:

- термометры расширения, основанные на свойстве температурного расширения жидких и твердых тел;
- термометры газовые и жидкостные манометрические;
- термометры конденсационные;
- электрические термометры (термопары);
- термометры сопротивления;
- оптические монохроматические пирометры;
- оптические цветковые пирометры;
- радиационные пирометры.

### 1.7.2 Первичные преобразователи для измерения давления:

#### По принципу действия:

- жидкостные (основанные на уравнивании давления столбом жидкости);
- поршневые (измеряемое давление уравнивается внешней силой, действующей на поршень);
- пружинные (давление измеряется по величине деформации упругого элемента);
- электрические (основанные на преобразовании давления в какую-либо электрическую величину).

#### По роду измеряемой величины:

- манометры (измерение избыточного давления);
- вакуумметры (измерение давления разрежения);
- мановакуумметры (измерение как избыточного давления, так и давления разрежения);
- напорометры (для измерения малых избыточных давлений);
- тягомеры (для измерения малых давлений, разрежений, перепадов давлений);
- тягонапорометры;
- дифманометры (для измерения разности или перепада давлений);
- барометры (для измерения барометрического давления).

### 1.7.3 Первичные преобразователи для измерения расхода пара, газа и жидкости:

Приборы, измеряющие расход, называются расходомерами. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами-счетчиками. Такие приборы позволяют измерять расход и количество вещества.

Изн. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Подп. и дата
Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						14

Классификация преобразователей для измерения расхода пара, газа и жидкости:

- Механические:

Объемные: ковшовые, барабанного типа, мерники.

Скоростные: по методу переменного или постоянного перепада давления, напорные трубки, ротационные.

- Электрические: электромагнитные, ультразвуковые, радиоактивные.

#### 1.7.4 Первичные преобразователи для измерения уровня:

Под измерением уровня понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной поверхности, принятой за начало отсчета. Приборы, выполняющие эту задачу, называются уровнемерами.

**Методы измерения уровня:** поплавковый, буйковый, гидростатический, электрический и др.

### 1.8 Исполнительные механизмы. Регулирующие органы

Исполнительными механизмами ИМ в системах автоматического регулирования САР и дистанционного управления называются устройства, осуществляющие перемещение регулирующего органа РО в соответствии с поступающими сигналами от управляющего устройства.

Инв. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
											15

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1 Методы описания свойств систем управления

Существуют методы получения математического описания объектов и систем управления:

- *аналитические* - базируются на использовании уравнений, в т.ч. дифференциальных,
- *экспериментальные* - предполагают проведение серии экспериментов на реальном объекте,
- *комбинированные методы* - наиболее эффективные, когда, используя аналитически полученную структуру объекта, ее параметры определяют в ходе экспериментов на реальном объекте.

В теории автоматического управления используются различные методы описания свойств систем управления:

- статические характеристики,
- динамические характеристики,
- дифференциальные уравнения,
- передаточные функции,
- частотные характеристики,
- словесное (текстовое, табличное) описание.

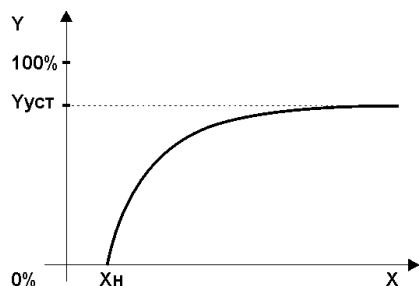
Статические, динамические, частотные характеристики, дифференциальные уравнения и передаточные функции представляют собой точные математические методы описания свойств систем.

Словесное описание, в отличие от математических методов описания свойств систем, помогает понять принцип действия системы, ее назначение, особенности функционирования и т.д. Однако, что самое главное, оно не дает количественных оценок качества регулирования, поэтому не пригодно для изучения характеристик систем и построения систем автоматизированного управления.

### 2.2 Статические характеристики

**Статическая характеристика элемента** - называется зависимость установившихся значений выходной величины от значения величины на входе системы, т.е.:

$$Y_{уст} = c(X) \quad (2.1)$$



Статическую характеристику изображают в виде кривой  $Y(X)$  – см. рисунок 2.1:

Рисунок 2.1 - Статическая характеристика

**Установившийся режим ( $Y_{уст}$ )** - это режим, при котором расхождение между истинным значением регулируемой величины и ее заданным значением будет постоянным во времени.

**Статический элемент** - у которого при постоянном входном воздействии с течением времени устанавливается постоянная выходная величина. Например, при подаче на вход нагревателя различных значений напряжения он будет нагреваться до соответствующих этим напряжениям значений температуры.

**Астатический элемент** - у которого при постоянном входном воздействии сигнал на выходе непрерывно растет с постоянной скоростью, ускорением и т.д.

**Линейный статический элемент** - называется безинерционный элемент, обладающий линейной статической характеристикой вида:

$$Y_{уст} = k \cdot X + b \quad (2.2)$$

Как видно из формулы (2.2), статическая характеристика элемента имеет вид прямой с коэффициентом наклона  $k$  и смещением характеристики  $b$ .

Линейные статические характеристики, в отличие от нелинейных, более удобны для изучения благодаря своей простоте. Если модель объекта нелинейна, то обычно ее преобразуют к линейному виду путем метода линеаризации.

**Система управления называется статической**, если при постоянном входном воздействии ошибка управления  $E$  стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия.

**Система управления называется астатической**, если при постоянном входном воздействии ошибка управления  $E$  стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						16



## 2.3 Динамические характеристики

**Переходный процесс** - это переход системы от одного установившегося режима к другому при каких-либо входных воздействиях. Переходные процессы изображаются графически в виде кривой  $Y(t)$ .

Например, процесс нагрева в печи до установившегося значения  $Y_{уст}$  может иметь вид, представленный на рисунке 2.2.

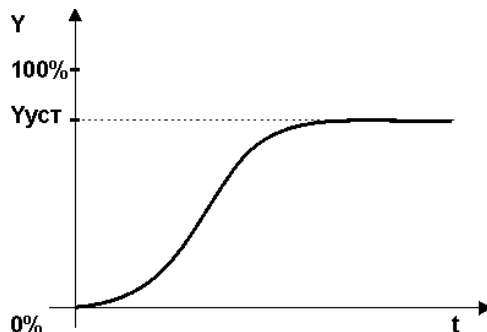
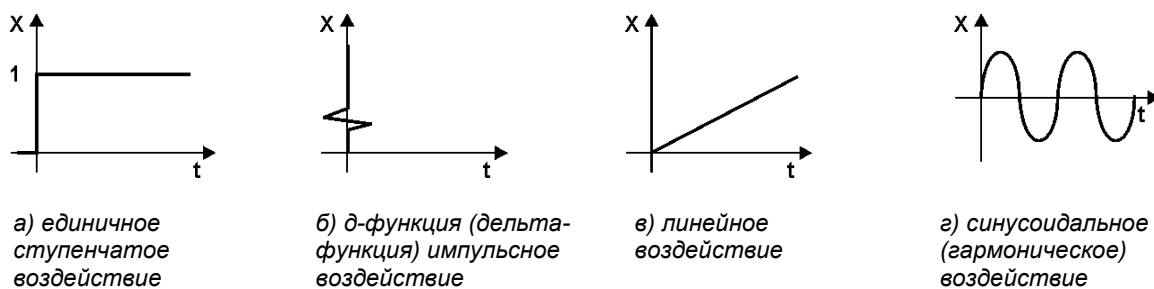


Рисунок 2.2 - Переходный процесс нагрева в печи

Переходный процесс характеризует динамические свойства системы и ее поведение.

Поскольку входные воздействия могут изменяться во времени, то и переходные характеристики будут каждый раз разные. Для простоты анализа систем входные воздействия  $X(t)$  приводят к одному из типовых видов, представленных на рис.2.3:



а) единичное ступенчатое воздействие

б) д-функция (дельта-функция) импульсное воздействие

в) линейное воздействие

г) синусоидальное (гармоническое) воздействие

Рисунок 2.3 - Виды входных воздействий

В зависимости от вида входного воздействия функция  $Y(t)$  может иметь разное обозначение:

**Переходная характеристика  $h(t)$**  - реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях, т.е. при  $x(0) = 0$  и  $y(0) = 0$ .

**Импульсная характеристика  $\psi(t)$**  - реакция объекта на д-функцию при нулевых начальных условиях.

При подаче на вход объекта синусоидального сигнала, на выходе, как правило, в установившемся режиме получается также синусоидальный сигнал, но с другой амплитудой и фазой:

$$Y(t) = A_{\text{вых}} * \sin(\psi * t + \varphi), \quad (2.3)$$

где:  $A_{\text{вых}}$  - амплитуда,  $\psi$  - частота сигнала,  $\varphi$  - фаза.

**Частотная характеристика (ЧХ, АФХ и др.)** - зависимость амплитуды и фазы выходного сигнала системы в установившемся режиме при приложении на входе синусоидального (гармонического) воздействия.

Виды частотных характеристик (ЧХ):

- АФХ - зависимость амплитуды и фазы от частоты (изображается на комплексной плоскости);
- АЧХ - зависимость амплитуды от частоты;
- ФЧХ - зависимость фазы от частоты;
- ЛАХ, ЛАЧХ - логарифмические АЧХ.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						17

## 2.4 Типовые звенья систем регулирования

**2.4.1 Звено системы регулирования** – это элемент, обладающий определенными свойствами в динамическом отношении. Звенья систем регулирования могут иметь разную физическую основу (электрические, пневматические, механические и др. звенья), но относятся к одной группе. Соотношение входных и выходных сигналов в звеньях одной группы описываются одинаковыми передаточными функциями.

Простейшие типовые звенья, приведены на рис.2.4 (на рисунке представлены переходные характеристики и передаточные функции):

- а) усилительное,
- б), в) интегрирующее идеальное, интегрирующее реальное,
- г) дифференцирующее (идеальное, реальное),
- д) аperiodическое инерционное,
- е) колебательное,
- запаздывающее.

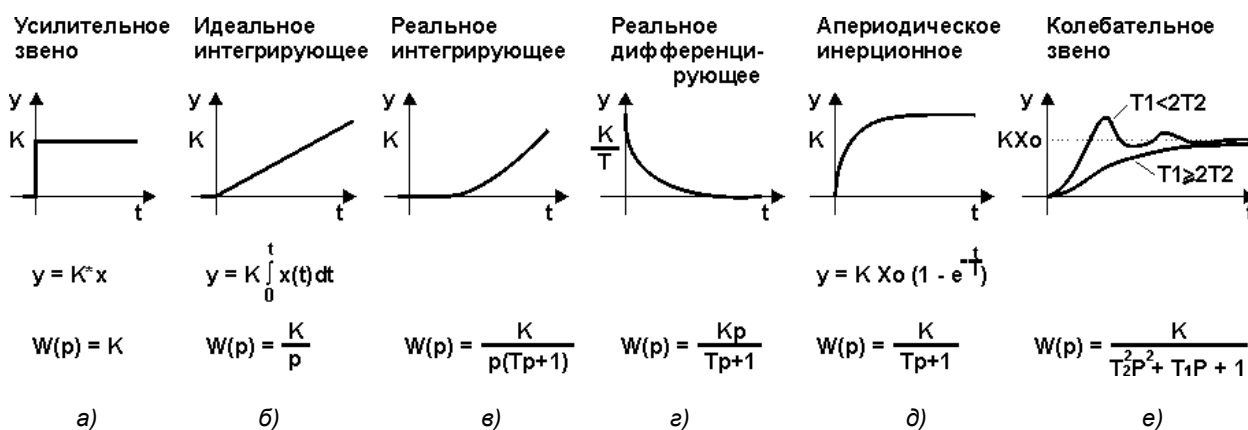


Рисунок 2.4 - Переходные характеристики и передаточные функции типовых звеньев

Пояснения к рисунку 2.4:

а) **Усилительное звено, пропорциональное звено** усиливает входной сигнал в  $K$  раз. Уравнение звена  $y = K \cdot x$ , передаточная функция  $W(p) = K$  (где  $K$  - коэффициент усиления). Пример усилительного звена - механические передачи, датчики. Усилительное звено является безинерционным звеном.

б) **Идеальное интегрирующее звено** имеет выходную величину пропорциональную интегралу входной величины. При подаче сигнала на вход звена выходной сигнал постоянно возрастает. Идеальное интегрирующее звено является **астатическим**, т.к. не имеет установившегося режима.

в) **Реальное интегрирующее звено** имеет передаточную функцию представленную на рисунке 2.4-в. Реальное интегрирующее звено является звеном с запаздыванием. Переходная характеристика в отличие от идеального звена является кривой. Примеры интегрирующего звена: емкость, наполняемая водой; интегральный импульсный исполнительный механизм.

г) **Идеальные дифференцирующие звенья** физически не реализуемы. **Реальные дифференцирующие звенья** представляют собой дифференцирующие звенья большинства объектов. Переходная характеристика и передаточная функция приведена на рис.2.4-г:

д) **Аperiodическое (инерционное) звено** первого порядка представлено на рис.2.4-д, где  $T$  постоянная времени. Большинство тепловых объектов являются аperiodическими звеньями. Например, при подаче на вход электрической печи напряжения ее температура будет изменяться по аналогичному закону.

е) **Колебательное звено** представлено на рис.2.4-е. При подаче на вход ступенчатого воздействия амплитудой  $x_0$  переходная кривая будет иметь один из двух видов: **аperiodический** (при  $T_1 \geq 2T_2$ ) или **колебательный** (при  $T_1 < 2T_2$ ).

ж) **Запаздывающее звено** (на рис.2.4 не представлено). Передаточная функция звена:  $Y(t) = X(t - \tau)$  или  $W(p) = e^{-\tau p}$ . Выходная величина  $Y$  повторяет входную величину  $X$  с некоторым запаздыванием  $\tau$ . Например, ленточный транспортер, конвейер.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

## 2.4.2 Соединения звеньев систем регулирования

Исследуемый объект в целях упрощения анализа функционирования разбивается на элементарные звенья. После определения передаточных функций для каждого звена - решается задача объединения их в одну передаточную функцию объекта. Вид передаточной функции объекта зависит от последовательности соединения звеньев:

- 1) Последовательное соединение звеньев:

$$W_{об} = W_1 \times W_2 \times W_3 \dots \quad (2.4)$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются.

- 2) Параллельное соединение звеньев:

$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots \quad (2.5)$$

При параллельном соединении звеньев их передаточные функции складываются.

## 2.5 Передаточная функция

**2.5.1 Преобразование дифференциальных уравнений по Лапласу** дает возможность ввести удобное понятие передаточной функции, характеризующей динамические свойства системы.

**Передаточной функцией** называется отношение изображения выходного воздействия  $Y(p)$  к изображению входного  $X(p)$  при нулевых начальных условиях.

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \quad (2.6)$$

Передаточная функция является дробно-рациональной функцией комплексной переменной:

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n} \quad (2.7)$$

где:

$B(p) = b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m$  - полином числителя,  
 $A(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n$  - полином знаменателя.  
 Передаточная функция имеет порядок, который определяется порядком полинома знаменателя (n).  
 Из формулы (2.6) следует, что изображение выходного сигнала можно найти как

$$Y(p) = W(p) * X(p) \quad (2.8)$$

Так как передаточная функция системы полностью определяет ее динамические свойства, то первоначальная задача расчета САУ сводится к определению ее передаточной функции.

При расчете настроек регуляторов широко используются достаточно простые динамические модели промышленных объектов управления. В частности, использование моделей инерционных звеньев первого или второго порядка с запаздыванием для расчета настроек регуляторов обеспечивает в большинстве случаев качественную работу реальной системы управления.

В зависимости от вида переходной характеристики (кривой разгона) задаются чаще всего одним из трех видов передаточной функции объекта управления:

- 1) В виде передаточной функции инерционного звена первого порядка:

$$W_0(p) = \frac{K e^{-\tau p}}{T p + 1} \quad (2.9)$$

где: K - коэффициент усиления,  
 T - постоянная времени,  
 $\tau$  - запаздывание,

которые должны быть определены в окрестности номинального режима работы объекта.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						19

2) Для объекта управления без самовыравнивания передаточная функция имеет вид:

$$W_0(p) = \frac{K e^{-\tau p}}{P} \quad (2.10)$$

3) Более точное описание динамики объекта описывает модель второго порядка с запаздыванием:

$$W_0(p) = \frac{K e^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (2.11)$$

### 2.5.2 Экспериментальные методы определения динамических характеристик объектов управления делятся на два класса:

1. Методы определения временных характеристик объекта управления.
2. Методы определения частотных характеристик объекта управления.

Временные методы определения динамических характеристик делятся, в свою очередь, на активные и пассивные.

**Активные методы** предполагают подачу на вход объекта пробных тестирующих сигналов, каковыми являются:

- регулярные функции времени (ступенчатый или прямоугольный импульсы, гармонический сигнал, периодический двоичный сигнал) – см. раздел 2.3;
- пробные сигналы случайного характера (белый шум, псевдослучайный двоичный сигнал - ПСДС).

В зависимости от вида пробного сигнала выбирают соответствующие методы обработки выходного сигнала объекта управления. Так, например, при подаче ступенчатого управляющего сигнала, снимают кривую разгона объекта, а при подаче прямоугольного импульсного сигнала снимают кривую отклика. Кривая отклика снимается для объектов, не допускающих подачу на вход объекта ступенчатых сигналов.

Достоинствами активных методов являются:

- достаточно высокая точность получения математического описания;
- относительно малая длительность эксперимента.

*Следует учитывать*, что активные методы, в той или иной степени, приводят к нарушению нормального хода технологического процесса. Поэтому проведение эксперимента должно быть тщательно спланировано.

**В пассивных методах** на вход объекта не подаются никакие пробные сигналы, а лишь фиксируется естественное движение объекта в процессе его нормального функционирования. Полученные реализации массивов данных входных и выходных сигналов обрабатываются статическими методами. По результатам обработки получают параметры передаточной функции объекта. Однако, такие методы имеют ряд недостатков:

- малая точность получаемого математического описания, (т.к. отклонения от нормального режима работы малы);
- необходимость накопления больших массивов данных с целью повышения точности (тысячи точек);
- если эксперимент проводится на объекте, охваченном системой регулирования, то наблюдается эффект корреляции (взаимосвязи) между входным и выходным сигналами объекта через регулятор. Такая взаимосвязь снижает точность математического описания.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						20

## 2.6 Определение параметров переходных характеристик

Для определения динамических свойств объекта на практике чаще всего используют методику снятия переходной характеристики.

При определении динамических характеристик объекта по его **переходной характеристике (кривой разгона)** на вход подается или ступенчатый пробный сигнал или прямоугольный импульс – см. раздел 2.3.

Во втором случае переходная характеристика (кривая отклика) должна быть построена до соответствующей кривой разгона.

Процесс получения передаточной функции объекта, исходя из данных о переходном процессе, называется идентификацией объекта.

**2.6.1 При снятии переходной характеристики необходимо выполнить ряд условий, представленных в таблице 2.1:**

Таблица 2.1 - Условия снятия переходной характеристики

No	Условия
1	Если проектируется система стабилизации технологического параметра, то переходная характеристика должна сниматься в окрестности рабочей точки процесса.
2	Переходные характеристики необходимо снимать как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего сигнала. По виду кривых можно судить о степени асимметрии объекта. При небольшой асимметрии расчет настроек регулятора рекомендуется вести по усредненным значениям параметров передаточных функций. Линейная асимметрия наиболее часто проявляется в тепловых объектах управления.
3	При наличии зашумленного выхода желательно снимать несколько переходных характеристик (кривых разгона) с их последующим наложением друг на друга и получением усредненной кривой.
4	При снятии переходной характеристики необходимо выбирать наиболее стабильные режимы процесса, например, ночные смены, когда действие внешних случайных возмущений маловероятно.
5	При снятии переходной характеристики амплитуда пробного входного сигнала должна быть, с одной стороны, достаточно большой, чтобы четко выделялась переходная характеристика на фоне шумов, а, с другой стороны, она должна быть достаточно малой, чтобы не нарушать нормального хода технологического процесса.

Примечание к таблице 2.1: **Начальные условия снятия переходной характеристики:**

В начальный момент необходимо, чтобы система управления находилась в покое, т.е. регулируемая величина  $X$  (например, температура в печи) и управляющее воздействие регулятора  $Y$  (выход регулятора на исполнительный механизм) не изменялись, а внешние возмущения отсутствовали.

Например, температура в печи оставалась постоянной и исполнительный механизм не изменяет своего положения. Затем на вход исполнительного механизма подается ступенчатое воздействие, например, включается нагреватель. В результате состояние объекта начинает изменяться.

**2.6.2 Определение динамических характеристик объекта управления с самовыравниванием по его переходной характеристике**

**Самовыравниванием процесса регулирования** называется свойство регулируемого объекта после нарушения равновесия между притоком и расходом вернуться к этому состоянию самостоятельно, без участия человека или регулятора. Самовыравнивание способствует более быстрой стабилизации регулируемой величины и, следовательно, облегчает работу регулятора.

Процесс изменения параметра  $X(t)$  и его переходная характеристика  $h(t)$  изображена на рис. 2.5.

Сняв кривую разгона, и оценив характер объекта управления (с самовыравниванием или без) можно определить параметры соответствующей передаточной функции.

Передаточную функцию вида (выражение 2.9) рекомендуется применять для объектов управления с явно выраженной преобладающей постоянной времени. Перед началом обработки переходную характеристику (кривую разгона) *рекомендуется* пронормировать (диапазон изменения нормированной кривой от 0 до 1) и выделить из ее начального участка величину чистого временного запаздывания.

**ПРИМЕР.** При подаче на вход некоторого объекта ступенчатого воздействия была получена переходная характеристика (см. пример на рис. 2.5). Требуется определить параметры переходной характеристики.

Изн. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 21

Определение динамических характеристик объектов по кривой разгона производится **методом касательной к точке перегиба** переходной характеристики (кривой разгона).

В данном случае **точка перегиба** соответствует переходу кривой от режима ускорения к режиму замедления темпа нарастания выходного сигнала.

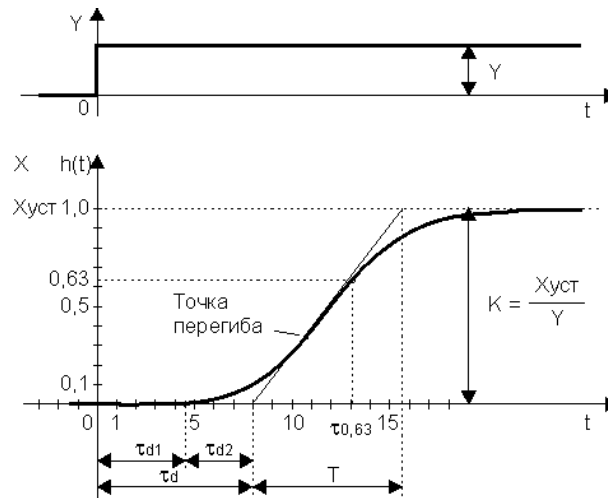


Рисунок 2.5 - Переходная характеристика (кривая разгона) объекта с самовыравниванием

По виду переходной характеристики можно определить динамические свойства объекта:

**K, Xуст, τ<sub>d</sub>, T, R.**

1) *Динамическим коэффициентом усиления* называется величина, показывающая, во сколько раз данное звено усиливает входной сигнал (в установившемся режиме), и равна отношению величины технологического параметра Xуст в установившемся режиме к выходной величине Y:

$$K = \frac{X_{уст}}{Y} \quad (2.12)$$

Коэффициент усиления объекта K для объектов с самовыравниванием является величиной, обратной коэффициенту самовыравнивания ( $K = 1/c$ ).

2) *Установившееся значение выходной величины Xуст* - это значение X при  $t \rightarrow \infty$ . Например, максимальное значение температуры в печи, которое может быть достигнуто при установленной мощности нагревателя.

3) В системах автоматического регулирования, после получения возмущающего воздействия регулируемый параметр изменяется не мгновенно, а через некоторое время. Это время называется запаздыванием  $\tau_d$  процесса в объекте. Различают емкостное и транспортное (передаточное) запаздывание.

*Емкостное запаздывание* зависит от емкости объекта регулирования. Паровой котел - по уровню воды в барабане, например, обладает емкостным запаздыванием.

*Транспортным (динамическим) запаздыванием*  $\tau_d$  называется промежуток времени от момента изменения входной величины Y до начала изменения выходной величины X. Например, это может быть время после включения нагревателя, за которое температура в печи достигнет значения  $\approx 0,1 X_{уст}$ .

Чем больше, время полного запаздывания  $\tau_d$  - тем труднее регулировать такой процесс. Из наиболее часто регулируемых параметров наибольшим - запаздыванием обладают объекты, в которых регулируется температура, а наименьшим - объекты, в которых поддерживается расход жидкости.

4) *Постоянная времени объекта T* может быть определена в соответствии с рис.2.5. Постоянная времени объекта достаточно точно может быть определена как время, за которое температура достигнет значения  $0,63 \cdot X_{уст}$  минус  $\tau_{d1}$ , т.е.:

$$T = \tau_{0,63} - \tau_{d1} \quad (2.13)$$

5) *Максимальная скорость изменения параметра R* - наклон переходной характеристики, может быть определено по формуле:

$$R = X_{уст} / T \quad (2.14)$$

Изн. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						22

### 2.6.3 Определение динамических характеристик объекта управления без самовыравнивания по его переходной характеристике

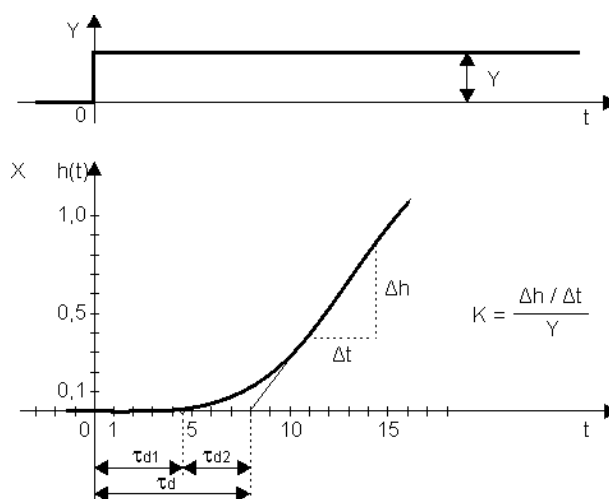


Рисунок 2.6 - Переходная характеристика (кривая разгона) объекта без самовыравнивания

Для объектов без самовыравнивания устойчивое функционирование системы без регулятора невозможно.

Для объекта без самовыравнивания коэффициент усиления определяется как отношение установившейся скорости изменения выходной величины X к величине скачка входного сигнала Y:

$$K = \frac{Dh / Dt}{y} \quad (2.15)$$

Величина динамического запаздывания  $\tau_d$  в объекте определяется так, как показано на рис.2.6.

Для регуляторов с релейным выходом на объект подается 100% мощности. В ряде случаев длительное воздействие такой мощности недопустимо. В этом случае допускается выключение нагревательного элемента после определения  $\tau_d$  и R.

При этом скорость изменения температуры достаточно точно можно определить после достижения величиной X значения  $\approx 0,3X_{уст}$ . Тогда скорость изменения температуры R и постоянная времени T определяются по формулам:

$$R = Dh / Dt \quad (2.16)$$

$$T = X_{уст} / R \quad (2.17)$$

## 2.7 Типовые процессы регулирования

При настройке регуляторов можно получить достаточно большое число переходных процессов, удовлетворяющих заданным требованиям. Таким образом, появляется некоторая неопределенность в выборе конкретных значений параметров настройки регулятора. С целью ликвидации этой неопределенности и облегчения расчета настроек вводится понятие **оптимальных типовых процессов** регулирования.

**Выделяют три типовых процесса регулирования:**

1. Аперiodический процесс с минимальным временем регулирования.
2. Процесс с 20%-ным перерегулированием.
3. Процесс, обеспечивающий минимум интегрального критерия качества.

Имп. и дата	Подп. и дата
Изн. № дубл.	
Взамен изв. №	
Изн. № докум.	
Изн. № докум.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						23

**2.7.1 Аperiodический переходной процесс с минимальным временем регулирования (см. рис. 2.7).**

Этот типовой процесс (см. рис. 2.7) предполагает, что обрабатывается возмущение  $Z$  (система автоматической стабилизации).

В данном случае настройки регулятора подбираются так, чтобы время регулирования  $t_p$  было минимальным.

Данный вид типового процесса широко используется для настройки систем, не допускающих колебаний в замкнутой системе регулирования.

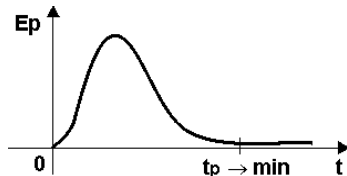


Рисунок 2.7 - График аperiodического переходного процесса, где  $E_p$  - ошибка регулирования,  $t$  - время.

**2.7.2 Переходной процесс с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода (см. рис. 2.8).**

Такой процесс наиболее широко применяется для настройки большинства промышленных САР, т.к. он соединяет в себе достаточно высокое быстродействие  $t_1 = \min$  при ограниченной колебательности  $y = 20\%$ .

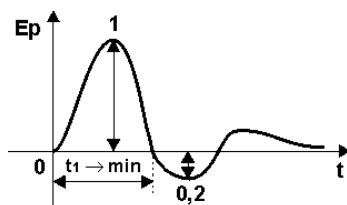


Рисунок 2.8 - График переходного процесса с 20%-ным перерегулированием где  $E_p$  - ошибка регулирования,  $t$  - время.

**2.7.3 Переходной процесс, обеспечивающий минимум интегрального критерия качества (см. рис.2.9).**

Интегральный критерий качества выражается формулой:

$$J_{\min} = \int_0^{\infty} E_p^2(t) dt \rightarrow \min \quad (2.18)$$

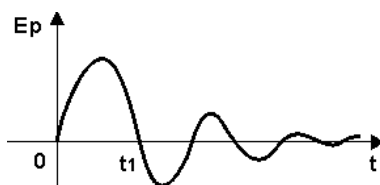


Рисунок.2.9 - График переходного процесса по минимуму интегрального критерия качества где  $E_p$  - ошибка регулирования,  $t$  - время.

К достоинствам этого процесса можно отнести высокое быстродействие (1-й полуволны) при довольно значительной колебательности. Кроме этого, оптимизация этого критерия по параметрам настройки регулятора может быть выполнена аналитически, численно (на ЭВМ) или путем моделирования (на АВМ).

Процесс, обеспечивающий минимум интегрального критерия качества, широко применяется при настройке систем регулирования величины рН - характеризующий кислотность раствора.

**Для каждого из трех видов оптимальных процессов разработаны соответствующие формулы и номограммы для настройки регуляторов на данный процесс.**

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата



## 2.8 Коэффициенты передачи элементов и блоков САР

Основными элементами САР являются: автоматический регулятор АР, исполнительный механизм ИМ, объект управления ОУ, датчик Д с преобразователем НП.

Динамика такой системы во многом определяется произведением статических коэффициентов усиления этих элементов:

$$K_{\text{Общ}} = K_{\text{АР}} * K_{\text{ИМ}} * K_{\text{ОУ}} * K_{\text{Д}} * K_{\text{НП}} \quad (2.19)$$

При расчете динамики используются как размерные, так и безразмерные коэффициенты передач.

Пример, объект управления – нагревательная печь, структурная схема приведена на рис. 2.10:

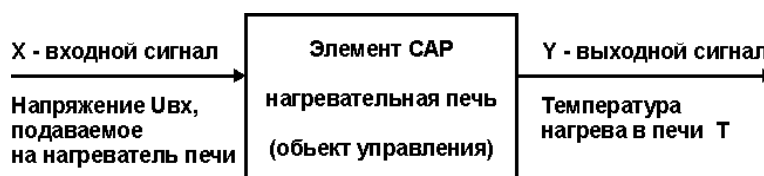


Рисунок 2.10 - Объект управления – нагревательная печь

### 2.8.1 Размерные коэффициенты передачи

Размерные коэффициенты передач в предположении линейности статической характеристики определяются следующим образом:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2.20)$$

где  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  - приращения входного и выходного сигналов в окрестности точки его номинального режима работы.

Если шкала элемента линейна, то:

$$K = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (2.21)$$

где  $X_{\text{max}}$ ,  $X_{\text{min}}$ ,  $U_{\text{max}}$ ,  $U_{\text{min}}$  - максимальные и минимальные значения входного и выходного сигналов элемента.

### 2.8.2 Безразмерные коэффициенты передачи

Более удобны в применении безразмерные коэффициенты передачи элементов. При их определении берутся относительные величины приращений:

$$K = \frac{\Delta Y / U_{\text{ном}}}{\Delta X / X_{\text{ном}}} \quad (2.22)$$

Например, для нагревательной печи при  $\Delta X=8\%$ , в номинальной точке  $X_{\text{ном}}=70\%$ , приращение выхода в номинальной точке  $\Delta Y=18^\circ\text{C}$  составило  $U_{\text{ном}}=134^\circ\text{C}$ . Тогда по формуле (2.22) имеем:

$$K = \frac{18 / 134}{8 / 70} = 1,17$$

Использование номинальной величины при определении коэффициента передачи рекомендуется в случае нелинейных статических характеристик систем (элементов) автоматической стабилизации технологических параметров.

В системах стабилизации расхода выбор нужной расходной характеристики клапана осуществляется в зависимости от вида нелинейности объекта управления с целью линеаризации его статической характеристики.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						25

## 2.9 Устойчивость систем управления

Важным показателем САР является устойчивость.

Основное назначение САР заключается в поддержании заданного постоянного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону.

При отклонении регулируемого параметра от заданной величины (например, под действием внешнего возмущения или изменения задания) регулятор воздействует на систему таким образом, чтобы ликвидировать это отклонение.

Если система в результате этого воздействия возвращается в исходное состояние или переходит в другое равновесное состояние, то такая **система называется устойчивой**.

Если же возникают колебания со все возрастающей амплитудой или происходит монотонное увеличение ошибки  $e$ , то **система называется неустойчивой**.

Для того, чтобы определить, устойчива система или нет, используются критерии устойчивости (в данной методике не рассматриваются):

- 1) корневой критерий,
- 2) критерий Стодола,
- 3) критерий Гурвица,
- 4) критерий Найквиста,
- 5) критерий Михайлова и др.

## 2.10 Показатели качества процесса управления

К системам автоматического регулирования (САР) предъявляются требования не только устойчивости процессов регулирования. Для работоспособности системы не менее необходимо, чтобы процесс автоматического регулирования осуществлялся при обеспечении определенных показателей качества процесса управления.

Если исследуемая САР является *устойчивой*, возникает вопрос о том, насколько качественно происходит регулирование в этой системе и удовлетворяет ли оно технологическим требованиям объекта управления.

На практике качество регулирования определяется визуально по графику переходной характеристики. Однако, имеются точные но более сложные математические методы, дающие конкретные числовые значения (которые не рассматриваются в данной методике).

**Классификация показателей качества состоит из нескольких групп:**

- прямые - определяемые непосредственно по переходной характеристике процесса,
- корневые - определяемые по корням характеристического полинома,
- частотные - по частотным характеристикам,
- интегральные - получаемые путем интегрирования функций.

**Прямыми показателями качества процесса управления, определяемые непосредственно по переходной характеристике являются:**

- 1) Установившееся значение выходной величины  $Y_{уст}$ ,
- 2) Степень затухания  $\Psi$ ,
- 3) Время достижения первого максимума  $t_{max}$ ,
- 4) Время регулирования  $t_p$ ,
- 5) Ошибка регулирования  $E_{ст}$  (статистическая или среднеквадратическая составляющие),
- 6) Перерегулирование  $u$ ,
- 7) Динамический коэффициент регулирования  $R_d$ ,
- 8) Показатель колебательности  $M$ .

Например, переходная характеристика, снятая на объекте управления при отработке ступенчатого воздействия, имеет колебательный вид и представлена на рис. 2.11.

Имп. и дата	Подп. и дата
Изн. № дубл.	
Взамен инв. №	
Изн. № докум.	

Изн. № докум.	Изн. № дубл.	Взамен инв. №	Имп. и дата	Подп. и дата	Лист
Изн. № докум.	Изн. № дубл.	Взамен инв. №	Имп. и дата	Подп. и дата	Лист
Изн. № докум.	Изн. № дубл.	Взамен инв. №	Имп. и дата	Подп. и дата	Лист

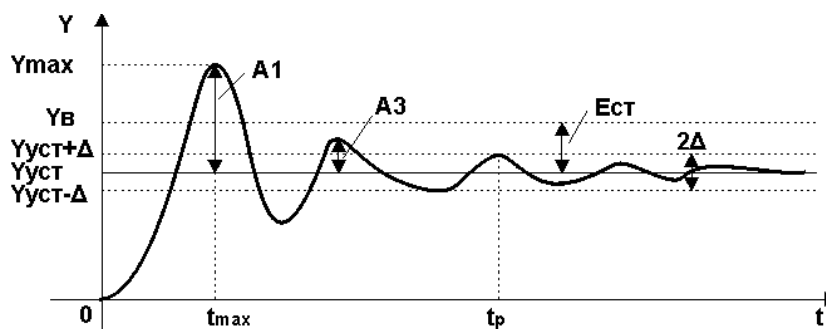


Рисунок 2.11 - Определение показателей качества по переходной характеристике

### 2.10.1 Установившееся значение выходной величины $Y_{уст}$

Установившееся значение выходной величины  $Y_{уст}$  определяется по переходной характеристике, представленной на рис.2.11.

### 2.10.2 Степень затухания $\Psi$

Степень затухания  $\Psi$  определяется по формуле:

$$\Psi = \frac{A1 - A3}{A3} \quad (2.23)$$

где  $A1$  и  $A3$  - соответственно 1-я и 3-я амплитуды переходной характеристики рис.2.11.

### 2.10.3 Время достижения первого максимума $t_{max}$

Время достижения первого максимума  $t_{max}$  определяется по переходной характеристике, представленной на рис.2.11.

### 2.10.4 Время регулирования $t_p$

Время регулирования  $t_p$  определяется согласно рис.2.11 следующим образом:

Находится допустимое отклонение  $\Delta$ , например, задано  $\Delta = 5\%Y_{уст}$  и строится «зона» толщиной  $2\Delta$  (см. рис.2.11). Время  $t_p$  соответствует последней точке пересечения  $Y(t)$  с данной границей. То есть время, когда колебания регулируемой величины перестают превышать 5 % от установившегося значения.

Настройки регулятора необходимо выбирать так, чтобы обеспечить минимально возможное значение общего времени регулирования, либо минимальное значение первой полуволны переходного процесса.

В непрерывных системах с типовыми регуляторами это время бывает минимальным при так называемых оптимальных апериодических переходных процессах. Дальнейшего уменьшения времени регулирования до абсолютного минимума можно достичь при использовании специальных оптимальных по быстрдействию систем регулирования.

### 2.10.5 Ошибка регулирования $E_{ст}$

Статическая ошибка регулирования  $E_{ст} = Y_{в} - Y_{уст}$ , где  $Y_{в}$  - входная величина (см. рис.2.11).

В некоторых САП наблюдается ошибка, которая не исчезает даже по истечении длительного интервала времени - это статическая ошибка регулирования  $E_{ст}$ . Данная ошибка не должна превышать некоторой наперед заданной величины.

У регуляторов с интегральной составляющей ошибки в установившемся состоянии теоретически равны нулю, но практически незначительные ошибки могут существовать из-за наличия зон нечувствительности в элементах системы.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						27

### 2.10.6 Перерегулирование $y$

Величина перерегулирования  $y$  зависит от вида обрабатываемого сигнала.

При обработке ступенчатого воздействия (по сигналу задания) – см. рис.2.11 величина перерегулирования  $y$  определяется по формуле:

$$y = \frac{Y_{\max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} * 100\% \quad (2.24)$$

где значения величин  $Y_{\max}$  и  $Y_{уст}$  определяются согласно рис.2.11.

При обработке возмущающего воздействия, величина перерегулирования  $y$  определяется из соотношения:

$$y = \frac{X_1}{X_m} * 100\% \quad (2.25)$$

где значения величин  $X_m$  и  $X_1$  определяются согласно рис. 2.12.

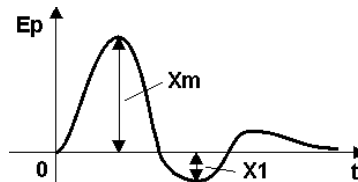


Рисунок 2.12 - График переходного процесса при обработке возмущения

### 2.10.7 Динамический коэффициент регулирования $R_d$

Динамический коэффициент регулирования  $R_d$  определяется из формулы:

$$R_d = \frac{Y_1}{Y_0} * 100\% \quad (2.26)$$

где значения величин  $Y_1$  и  $Y_0$  определяются согласно рис. 2.13.

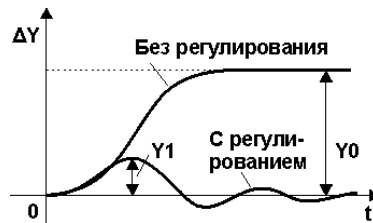


Рисунок 2.13 - К понятию динамического коэффициента регулирования

Величина динамического коэффициента  $R_d$  характеризует степень воздействия регулятора на процесс, т.е. степень понижения динамического отклонения в системе с регулятором и без него.

Инд. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						28

### 2.10.8 Показатель колебательности М

Показатель колебательности М характеризует величину максимума модуля частотной передаточной функции замкнутой системы (на частоте резонанса) и, тем самым, характеризует колебательные свойства системы. Показатель колебательности наглядно иллюстрируется на рисунке 2.14.

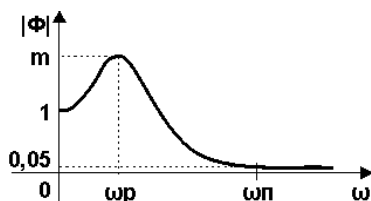


Рисунок 2.14 - График модуля частотной передаточной функции замкнутой системы

Условно считается, что значение  $M=1,5-1,6$  является оптимальным для промышленных САР, т.к. в этом случае у обеспечивается в районе от 20% до 40%. При увеличении значения М колебательность в системе возрастает.

В некоторых случаях нормируется полоса пропускания системы щп, которая соответствует уровню усиления в замкнутой системе 0,05. Чем больше полоса пропускания, тем больше быстродействие замкнутой системы. Однако при этом повышается чувствительность системы к шумам в канале измерения и возрастает дисперсия ошибки регулирования.

Инов. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инов. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 29

### 3 ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В данной главе приводится описание основных типов регуляторов и законов регулирования.

Классификация систем автоматического регулирования (САР) приведена в таблице 1.3 разд.1.3.

В разделах 3.1-3.3 приведены описания алгоритмов работы и законы регулирования релейных (позиционных) регуляторов. Релейные (позиционные) регуляторы выдают сигнал, который обеспечивает перемещение регулирующего органа в одно из фиксированных положений (позиций). Их может быть два, три и более. По количеству позиций различают двух-, трех- и многопозиционные регуляторы.

В разделах 3.4-3.5 приведены описания алгоритмов работы и законы регулирования непрерывных П-, ПИ-, ПИД-регуляторов.

#### 3.1 Двухпозиционные регуляторы

##### 3.1.1 Назначение. Принцип работы

Двухпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием, не требуют настройки и просты в эксплуатации. Эти регуляторы представляют обычный и наиболее широко распространенный метод регулирования.

Двухпозиционные регуляторы используются для управления переключательными элементами - дискретными исполнительными устройствами:

- электромеханическими реле,
- контакторами,
- транзисторными ключами,
- симисторными или тиристорными устройствами,
- твердотельными реле и др.

В простейшем случае (без обратной связи) двухпозиционный регулятор работает как двухпозиционный переключатель.

Например, мощность, подаваемая на нагреватель, имеет только два значения - максимальное и минимальное (нулевое), две позиции (отсюда и название регулятора - двухпозиционный) - нагреватель полностью включен или полностью выключен.

Структурная схема двухпозиционной системы регулирования приведена на рис. 3.1.

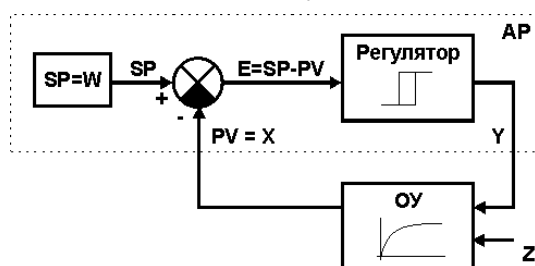


Рисунок 3.1 - Структурная схема двухпозиционной системы регулирования

где: AP – двухпозиционный регулятор, ОУ – объект управления, SP – узел формирования заданной точки (задания), E – рассогласование регулятора, PV=X – регулируемая величина, Y – управляющее воздействие, Z – возмущающее воздействие.

Для предотвращения «дребезга» управляющего выходного устройства (например, реле) и исполнительного механизма (например, нагревательного элемента) вблизи задания SP (слишком частого включения нагревателя), предусматривается гистерезис H – см. раздел 3.1.3.

Например, описание работы двухпозиционной системы регулирования температуры в печи с помощью нагревателя, может быть представлено следующим образом:

- Нагреватель включен, пока температура в печи ( $X=PV$ ) не достигнет значения заданной точки SP.
- Выход регулятора Y (нагреватель) отключается, если регулируемая величина (температура) выше заданной точки SP.
- Повторное включение нагревателя происходит после уменьшения температуры до значения SP-H, т.е. с учетом гистерезиса H переключательного элемента.

Изн. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

### 3.1.2 Алгоритмы двухпозиционного регулирования

Алгоритм двухпозиционных регуляторов определяется статической характеристикой: зависимостью выходного сигнала  $Y$  от входного  $X$  (см. рис. 3.2).

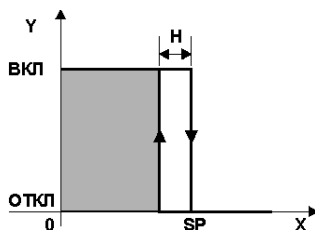


Рисунок 3.2 - Статическая характеристика двухпозиционной системы регулирования

Выходная величина  $Y$  равна *максимальному* воздействию - нагреватель *включен*:

- $Y = \max$  при  $X < SP - H$ , где  $H$  - значение гистерезиса.

Выходная величина  $Y$  равна *минимальному* воздействию - нагреватель *выключен*:

- $Y = 0$  при  $X > SP$ , где  $H$  - значение гистерезиса.

### 3.1.3 Зона гистерезиса

Ширина зоны гистерезиса в современных двухпозиционных регуляторах является *единственным программируемым параметром настройки*. Представление зоны гистерезиса описывается в руководстве по эксплуатации на соответствующий тип регулятора или систему регулирования.

Основные варианты представления зоны гистерезиса показаны на рис.3.3.

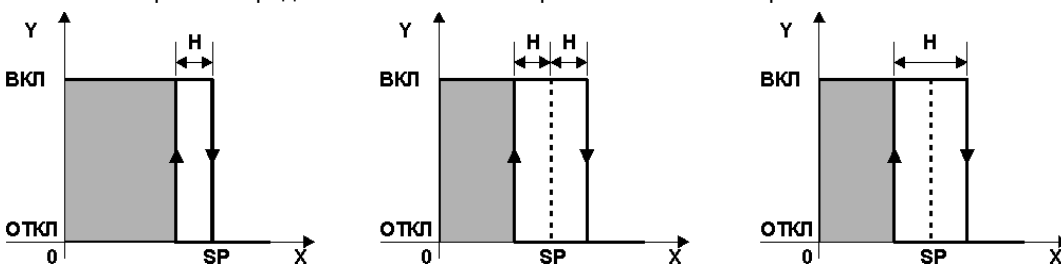


Рисунок 3.3 - Основные варианты представления зоны гистерезиса

Смысл вариантов представления зоны гистерезиса понятен из рисунка 3.3.

Назначение гистерезиса  $H$  - предотвращение «дребезга» управляющего выходного устройства (например, реле) вблизи задания  $SP$  от слишком частого включения нагревателя. В литературе по автоматизации также встречаются другие наименования параметра зоны гистерезиса - зона нечувствительности, зона возврата, зона неравномерности, дифференциал.

Гистерезис (в некоторых типах регуляторов) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения гистерезиса используются в основном для упреждения или задержки включения (выключения) выходных устройств.

Например, включение выходного устройства по значению задания  $SP$  меньшему на величину гистерезиса  $H$  - включение с упреждением, или выключение выходного устройства по значению задания  $SP$  меньшему на величину гистерезиса  $H$  - выключение с задержкой. Эти типы гистерезиса применяются для того, чтобы учесть инерционность объектов регулирования.

### 3.1.4 Процессы регулирования с двухпозиционным законом

Процесс двухпозиционного регулирования является автоколебательным - регулируемая величина как в переходном, так и в установившемся режиме периодически изменяется относительно заданного значения (см. рис. 3.4), т.е. регулируемая величина  $PV(X)$  подвержена незатухающим колебаниям.

Показателями автоколебательного режима являются амплитуда автоколебаний  $A_k$  и период автоколебаний  $T_k$ .

Частота и амплитуда колебаний зависят и определяются следующими величинами:

- от времени транспортного запаздывания  $\tau_d$ ,
- от постоянной времени объекта  $T$  (определяется инерционностью объекта),
- от максимальной скорости  $R$  изменения параметра  $X$  (определяется по переходной характеристике),
- от величины гистерезиса  $H$  переключающего элемента регулятора.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						31

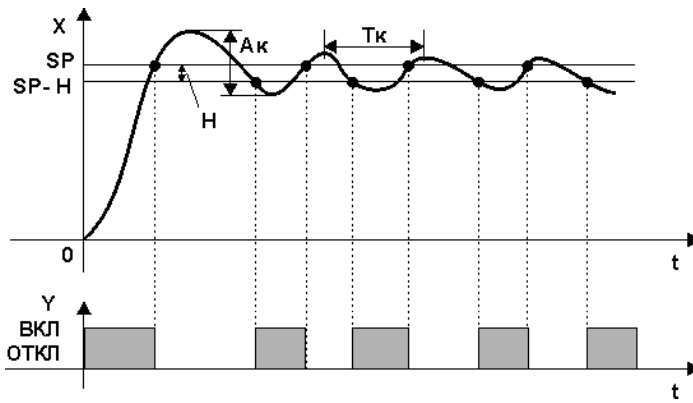


Рисунок 3.4 - Процесс регулирования с двухпозиционным законом

Для объектов с большой инерционностью (большим значением постоянной времени объекта  $T$ ) и с малым запаздыванием  $\tau_d$  регулирование происходит с постоянными колебаниями до 5-15% от задания  $SP$ .

- Чем больше гистерезис  $H$ , отношение  $\tau_d / T$ ,  $R$  - тем больше *амплитуда* колебаний  $A_k$ .
- Чем больше время запаздывания  $\tau_d$  и постоянная времени объекта  $T$  - тем больше *период* колебаний  $T_k$  (см. рис.3.4).

Точность регулирования технологического параметра, например, температуры зависит от величины гистерезиса. Чем меньше гистерезис, тем точнее регулирование, но тем чаще включается нагреватель и тем самым больше износ коммутационных элементов (например, реле). Уменьшая гистерезис можно повысить качество регулирования до некоторого предела, определяемого параметрами объекта регулирования (тепловой инерцией, мощностью нагревателя, тепловой связью нагревателя и объекта и др.).

### 3.1.5 Виды и логика работы двухпозиционных регуляторов и систем сигнализации

#### 3.1.5.1 Статические характеристики двухпозиционных регуляторов

Двухпозиционные регуляторы по виду статической характеристики и логике работы управляющего устройства могут быть представлены в одном из следующих видов - см. рис. 3.5:

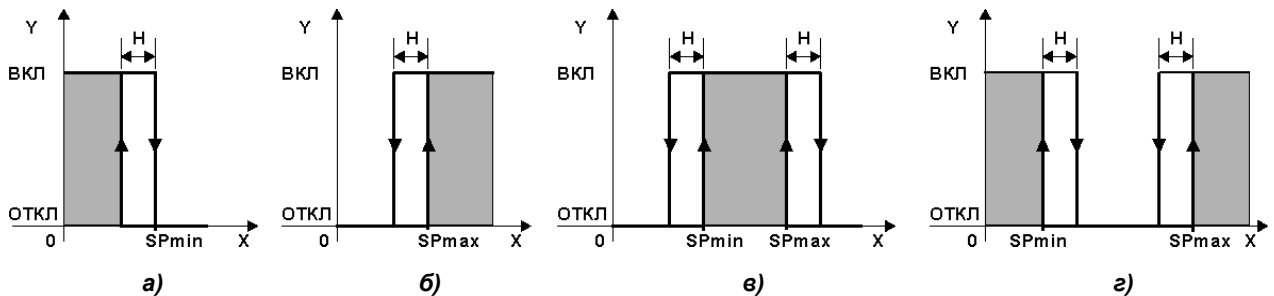


Рисунок 3.5 - Виды статических характеристик двухпозиционных регуляторов

- Вид статической характеристики, представленный на рис. 3.5-а: обычно применяется в различных процессах управления нагревом - нагревательных приборах, печах, термошкафах, теплообменниках и т.п.

Данный тип регулятора называется *обратным* регулятором. При использовании в системах сигнализации данная логика работы выходного устройства носит название «меньше установленного значения» или - «меньше минимума».

- Вид статической характеристики, представленный на рис. 3.5-б: обычно применяется в различных процессах управления охлаждением – в системах вентиляции, в холодильных установках и т.п.

Данный тип регулятора называется *прямым* регулятором. При использовании в системах сигнализации данная логика работы выходного устройства носит название «больше установленного значения» или - «больше максимума».

- Виды статических характеристик, представленные на рис. 3.5-в и 3.5-г: применяются для сигнализации выхода системы управления на рабочий режим. Эти регуляторы еще называют *компараторами*.

- Вид на рис.3.5-в используется для сигнализации вхождения параметра в норму. Данная логика работы выходных устройств имеет наименование «в зоне установленных значений» или - «в зоне минимум-максимум».

Инв. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Инв. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 32
------	------	----------	---------	------	--------------------	------------



- Вид на рис.3.5-г используется для сигнализации выхода параметра за определенные пределы. Данная логика работы выходных устройств имеет наименование «вне зоны установленных значений» или - «вне зоны минимум-максимум».

### 3.1.5.2 Абсолютная (независимая) сигнализация

Абсолютная сигнализация используется в случаях, когда необходимо сигнализировать выход технологического параметра за определенные уставки (например, MIN или MAX), представленные в абсолютных величинах.

Например, в системе управления *независимо* функционируют два устройства: регулятор и система сигнализации. Если пользователь имеет возможность *независимо* устанавливать значения заданной точки регулятора и уставки сигнализации, то используемая система сигнализации называется абсолютной или независимой. Другими словами, если оператор произвел изменение заданной точки регулятора, то значения уставок сигнализации остались прежними.

Статические характеристики и логика работы выходного устройства системы абсолютной (независимой) сигнализации представлены на рис. 3.5(а-г) в разделе 3.1.5.1. В литературе по автоматизации также встречаются другие наименования логики работы, представленной на рис.3.5в и рис.3.5г – *диапазонная сигнализация*. Диапазонная сигнализация также является абсолютной (независимой) сигнализацией.

### 3.1.5.3 Девиационная сигнализация

Девиационная технологическая сигнализация используется в случаях, когда необходимо сигнализировать отклонение технологического параметра от значения заданной точки на значение уставок ALmin и ALmax.

Например, в системе управления функционируют два устройства: регулятор и система сигнализации, но логика их работы имеет определенную зависимость. При изменении заданной точки регулятора будут изменяться абсолютные значения точек срабатывания сигнализации, а их относительные значения ALmin и ALmax при этом будут оставаться постоянными.

Зависимость логики работы девиационной сигнализации вне зоны установленных значений ALmin и ALmax представлена на рис. 3.6 и выражается в следующем.

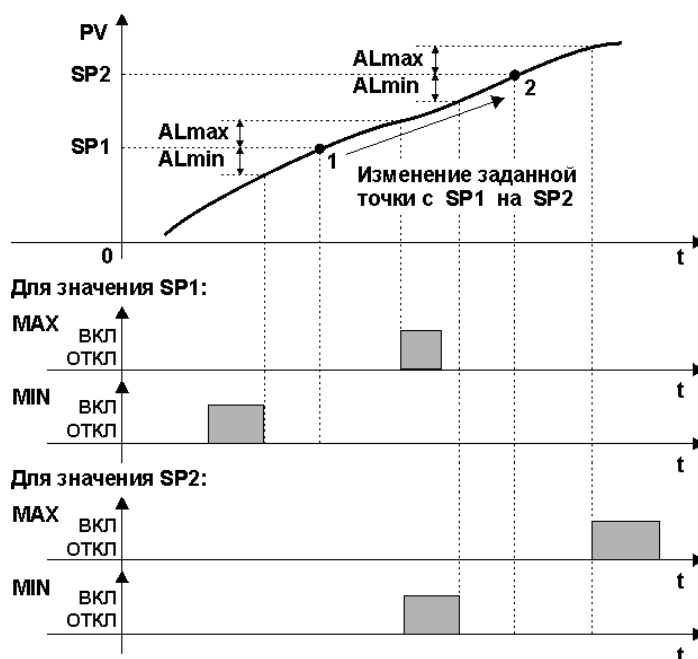


Рисунок 3.6 - Логика работы девиационной сигнализации

В регуляторе установлена некоторая заданная точка SP1 и значения девиационной сигнализации ALmin и ALmax. При изменении технологического параметра PV ниже значения заданной точки SP1 на значение девиационной сигнализации ALmin включится сигнализация MIN. При изменении технологического параметра PV выше значения заданной точки SP1 на значение девиационной сигнализации ALmax включится сигнализация MAX, т.е., для значения SP1:

- Сигнализация MIN *включена*, если:  $PV < SP1 - ALmin$ .
- Сигнализация MAX *включена*, если:  $PV > SP1 + ALmax$ .

Отключение сигнализации происходит с учетом гистерезиса (на рис.3.6 не показан).

Имп. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Подп. и дата
Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 33

В произвольный момент времени оператор произвел изменение значение заданной точки с SP1 на SP2. Теперь, при изменении технологического параметра PV ниже значения заданной точки SP2 на то же значение девиационной сигнализации ALmin включится сигнализация MIN. При изменении технологического параметра PV выше значения заданной точки SP2 на то же значение девиационной сигнализации ALmax включится сигнализация MAX, т.е. для значения SP2:

- Сигнализация MIN включена, если:  $PV < SP2 - AL_{min}$ .
- Сигнализация MAX включена, если:  $PV > SP2 + AL_{max}$ .

Отключение сигнализации происходит с учетом гистерезиса (на рис.3.6 не показан).

Другими словами, если оператор произвел изменение заданной точки регулятора, то значения запрограммированных относительных уставок сигнализации ALmin и ALmax остались прежними, но реальные абсолютные значения уставок срабатывания сигнализации изменились – см.рис. 3.6.

Статические характеристики и логика работы выходного устройства системы девиационной сигнализации представлены на рис. 3.5(а-г) в разделе 3.1.5.1, но реальные абсолютные значения уставок срабатывания сигнализации зависят от значения установленной заданной точки регулятора.

### 3.1.5.4 Двухпозиционное управление и сигнализация с ожиданием события

Двухпозиционное регулирование и сигнализация с ожиданием события применяется в случаях, когда необходимо, например, отключить (включить) включенный (выключенный) управляющий выход для того, чтобы осуществить запуск другого оборудования. Функция ожидания некоторого события является функцией безусловного отключения (включения) управляющего выхода.

Условием ожидания события для этого может служить:

- изменение заданной точки регулятора,
- включение дискретного входа регулятора, т.е. факт состоявшегося события от другого контроллера (регулятора или другого оборудования) формируется дискретным сигналом,
- с запретом срабатывания при старте. Например, установлена логика работы выходного устройства меньше установленного значения с запретом срабатывания при старте (включении питания). Например, при включении оборудования измеряемая величина еще не вышла на режим и меньше установленного значения - это может повлечь включение выходного устройства. Но при данной логике работы выходное устройство не включится, т.к. измеряемая величина впервые вышла за установленные пределы. Выходное устройство включится тогда, когда измеряемая величина выйдет из этих пределов, и затем снова войдет в установленные пределы.

В современных микропроцессорных регуляторах выбор типа условия ожидания события и логика работы выходных устройств (представленные на рис. 3.5(а-г) в разделе 3.1.5.1) являются программируемыми параметрами.

В качестве примера на рис.3.7 приведен процесс двухпозиционного управления с ожиданием события и с логикой работы в зоне установленных значений MIN и MAX.

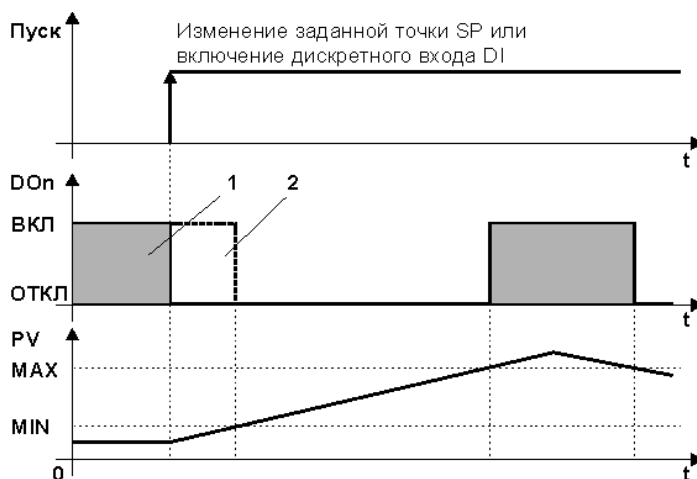


Рисунок 3.7 - Процесс двухпозиционного управления с ожиданием события

Примечание к рисунку 3.7. «1» – с ожиданием события, «2» – без ожидания события. Логика работы выходного устройства (DOn) - вне зоны уставок MIN-MAX.

Имп. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 34

### 3.1.5.5 Двухпозиционное импульсное управление

Двухпозиционный импульсный регулятор применяется для управления электродвигателями, насосами и другим оборудованием. Данный тип управления используется в схемах, где управляющим элементом является реле (контактор, пускатель) с самоблокировкой, т.е. с установкой на "самоподхват" – см. рис 3.8.

Если из схемы управления будет дана команда ПУСК определенной длительности, замкнутся контакты ПУСК, например на 1-2 секунды, включится реле К1, замкнутся контакты К1 и управляющее реле К1 останется включенным.

Если из схемы управления будет дана команда СТОП определенной длительности, разомкнутся контакты СТОП, например 1-2 секунды, выключится управляющее реле К1, разомкнутся контакты К1 и схема вернется в прежнее состояние.

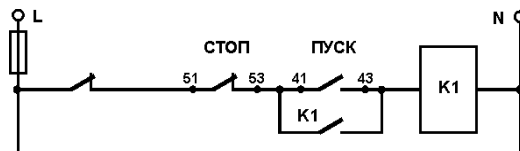


Рисунок 3.8 - Схема управления электродвигателем насоса

Параметрами настройки двухпозиционного импульсного регулятора являются:

- логика работы выходного устройства, которая представлена на рис. 3.5(а-г) в разделе 3.1.5.1, и может быть: меньше заданного значения, больше заданного значения, в зоне установленных значений, вне зоны установленных значений,
- длительность управляющего импульса (например, от 1 до 100 секунд).

В качестве примера на рис.3.9 приведен процесс двухпозиционного импульсного регулирования с логикой работы больше заданного значения (MAX) и длительностью управляющего импульса 2 секунды.

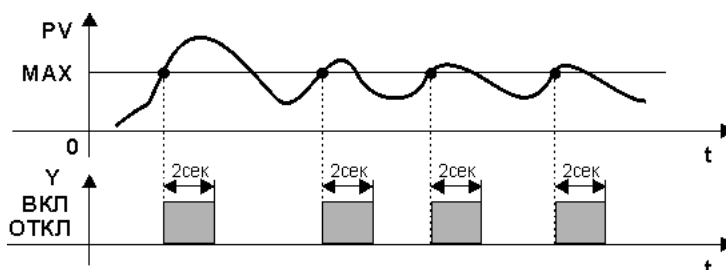


Рисунок 3.9 - Процесс двухпозиционного импульсного регулирования

### 3.1.5.6 Двухпозиционное итерационное регулирование с ограничением скорости

В некоторых моделях современных микропроцессорных регуляторов используется закон двухпозиционного итерационного регулирования.

Основные программируемые параметры итерационного регулятора следующие:

- N – степень ограничения скорости изменения параметра, например  $N = 0 \dots 15$ ,
- $T_{PV}$  – период времени между отсчетами вычисления итераций,  $T_{PV} = 0 \dots 15$  сек,
- H – ширина зоны гистерезиса.

Принцип и описание работы двухпозиционной итерационной системы регулирования температуры в печи с помощью нагревателя, описывается следующим образом:

Если  $E \geq 0$  – выключить нагреватель (используется обратный тип регулирования).

Если  $E < 0$  – включить нагреватель, где:

E – отклонение регулирования, вычисляемое по формуле:  $E = (PV_i - SP) + (PV_i - PV_{i-1}) * N$

$PV_i, PV_{i-1}$  - отсчеты значения параметра (температуры) отстоящие на  $T_{PV}$  секунд (например, 3 сек),

SP – значение заданной точки (задания) регулятора,

N - степень ограничения скорости изменения параметра, например  $N = 2$ . Чем больше это значение, тем больше ограничение скорости.

Если ограничение скорости отсутствует, т.е.  $N=0$ , то  $E = PV_i - SP$ . Ограничение скорости снижает значение перерегулирования вблизи заданной точки, отключая нагреватель с упреждением. Но это может замедлить время выхода на заданную точку при разогреве печи, или при ее регулируемом остывании.

Изн. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Подп. и дата
Изн. № дубл.	Подп. и дата

### 3.1.6 Достоинства и недостатки двухпозиционных регуляторов

#### 3.1.6.1 Достоинства микропроцессорных двухпозиционных регуляторов

К достоинствам микропроцессорных регуляторов производства предприятия МИКРОЛ относятся:

- простота использования и простота настройки регулятора на объекте регулирования,
- цифровая индикация регулируемой величины и заданной точки (задания),
- светодиодная индикация выходных управляющих сигналов,
- возможность подключения внешней заданной точки (задания),
- в одном приборе реализовано несколько регуляторов (от 2 до 8),
- наличие встроенного микропроцессора позволяет быстро адаптировать регулятор (изменяя его структуру) под конкретный объект управления с помощью несложных операций конфигурирования,
- сохранение значений заданных точек (заданий) и других настроечных параметров в цифровом виде в энергонезависимой памяти (в аналоговых регуляторах подстроечные резисторы меняют свои параметры с течением времени, при повышенных температурах, вибрации, что приводит к ненадежной работе).

#### 3.1.6.2 Дополнительные функциональные возможности двухпозиционных регуляторов

В современных микропроцессорных регуляторах, например, регуляторах производства предприятия МИКРОЛ, могут существовать различные функциональные и сервисные возможности:

- выбор направления действия регулятора,
- установка различных видов и значений гистерезиса (см. разделы 3.1.3, 3.1.5),
- масштабирование шкал измеряемых параметров в технологических единицах,
- повышение точности измерения за счет использования цифрового метода линеаризации,
- возможность использования нескольких регуляторов с различными заданными точками по одному параметру,
  - возможность создания программных регуляторов (с помощью программных задатчиков), предусматривающих нагрев, выдержку и остывание с заданной скоростью, переход от одной заданной точки на другую по времени (по таймеру) и/или другому параметру,
  - возможность использования импульсных (динамических) выходных сигналов (типа «пуск-стоп») по двухпозиционной логике управления – для управления электродвигателями насосов, приводов и др.,
  - возможность использования безопасного управления.

Возможность программирования данных режимов и использования различных параметров позволяет создать большое количество разнообразных двухпозиционных систем регулирования.

Кроме того, микропроцессорные регуляторы обладают дополнительными сервисными функциями:

- наличие интерфейсного канала связи (с компьютером и с другими контроллерами) предоставляет возможность контроля или изменения конфигурации параметров регулятора,
- объединение регуляторов в распределенные контрольно-измерительные системы,
- регистрация и архивирование параметров на компьютере.

Следует отметить, что двухпозиционные регуляторы часто используют для вспомогательных нужд, а не для непосредственного регулирования. Например:

- если объектом управляет ПИД регулятор (с аналоговым или импульсным выходом), двухпозиционный регулятор может включать дополнительный контур нагрева или охлаждения для ускорения выхода процесса на режим,
- двухпозиционный регулятор может запрещать вентиляцию при очень низкой температуре на улице или отсутствии центрального отопления.

#### 3.1.6.3 Недостатки двухпозиционных регуляторов

- Двухпозиционные регуляторы практически неприменимы для систем с существенным транспортным запаздыванием ( $\tau_d > 0,2T$ ) и для объектов без самовыравнивания, так как регулируемая величина далеко выходит за необходимые пределы регулирования. В этом случае применяют регуляторы с ПИ или ПИД законом регулирования.

Инв. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ПРМК.420000.001 И1					Лист
					Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	36

## 3.2 Трехпозиционные регуляторы

### 3.2.1 Назначение. Принцип работы

Трехпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием.

Трехпозиционные регуляторы используются для управления переключательными элементами - дискретными исполнительными устройствами:

- электромеханическими реле,
- контакторами,
- транзисторными ключами,
- симисторными или тиристорными устройствами,
- твердотельными реле и др.

Трехпозиционные регуляторы *используются* для систем управления уровнем различных веществ, для систем управления нагреванием-охлаждением различных тепловых процессов, холодильных установок, регулирования микроклимата подогревателем и вентилятором, для систем распределения и смешивания различных потоков веществ с помощью трехходовых клапанов, кранов, смесителей, реверсивных электродвигателей, сервоприводов и др.

Трехпозиционный регулятор включает при помощи переключательных элементов электродвигатель исполнительного механизма на правое вращение (например, открытие регулирующего органа), остановку или левое вращение (соответственно - закрытие регулирующего органа), три позиции (отсюда и название регулятора - трехпозиционный) - электродвигатель включен на правое вращение, полностью остановлен или включен на левое вращение.

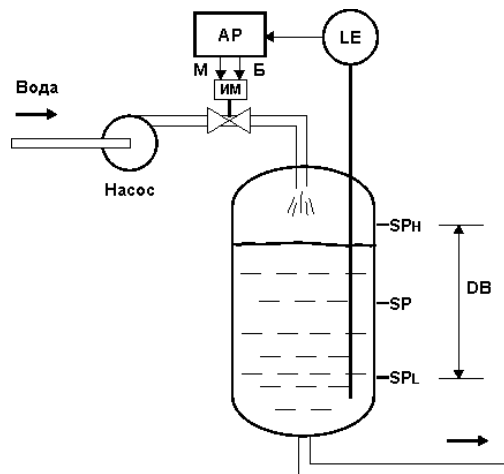
Принцип работы трехпозиционного регулятора рассмотрим на емкости с водой, с постоянно работающим насосом подкачки - см. рис.3.10.

- Для измерения уровня в емкости установлен датчик уровня. На линии подкачки после насоса установлен регулирующий клапан с электроприводом. При заданном уровне  $SP$  - «норма» - клапан находится в некотором промежуточном положении.

- При уменьшении уровня ниже уставки  $SP_L$  «нижний уровень» включится электродвигатель сигналом Б (больше), открывая клапан.

- При восстановлении уровня электродвигатель клапана остановится (снятием сигнала Б) - уровень будет находиться в зоне  $SP$  «норма».

- Если уровень повысится выше уставки  $SP_H$  «верхний уровень», то клапан закроется, отключится электродвигатель сигналом М (меньше).



$AP$  – трехпозиционный регулятор  
 $ИМ$  – исполнительный механизм  
 $LE$  – датчик уровня  
 $SP$  – заданное значение  
 $SP_H$  – заданное значение верхнего уровня  
 $SP_L$  – заданное значение нижнего уровня  
 $DB$  – зона нечувствительности регулятора  
 $М$  – сигнал регулятора «меньше»  
 $Б$  – сигнал регулятора «больше»

Рисунок 3.10 - Схема управления регулятором уровня в емкости

Регулятор работает по принципу  $SP_L$  «нижний уровень» -  $SP$  «норма» (средний уровень) -  $SP_H$  «верхний уровень».

**Величина ширины зоны нечувствительности (мертвой зоны)  $DB$**  (зона «норма») - является программируемым параметром настройки трехпозиционного регулятора (см. рис. 3.10).

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					37

Увеличение ширины зоны нечувствительности  $DB$  уменьшает точность регулирования и может привести к тому, что в процессе работы САР регулируемый орган будет без остановки перемещаться от одного крайнего положения к другому, т.е., не будет отличаться от двухпозиционного регулятора. К такому же результату приводит значительное увеличение скорости регулирующего органа.

Диапазон нечувствительности (мертвая зона)  $DB$  устанавливается с центром в заданной точке.

**Варианты представления зоны нечувствительности (DB):**

- полное значение зоны нечувствительности (см. рис.3.10),
- половинное значение зоны нечувствительности (см. рис.3.12).

Структурная схема трехпозиционной системы регулирования приведена на рис. 3.11.

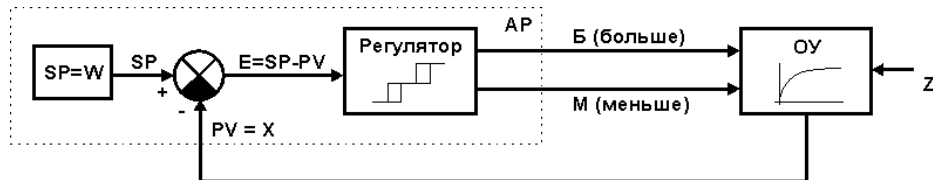


Рисунок 3.11 - Структурная схема трехпозиционной системы регулирования

где:  $AP$  – трехпозиционный регулятор,  $OU$  – объект управления,  $SP$  – узел формирования заданной точки (задания),  $E$  – рассогласование регулятора,  $PV=X$  – регулируемая величина, сигналы  $B$  (больше) и  $M$  (меньше) – управляющие воздействия,  $Z$  – возмущающее воздействие.

Для предотвращения «дребезга» управляющего выходного устройства (например, реле) и исполнительного механизма вблизи точки его включения (слишком частого включения), предусматривается гистерезис  $H$  (см. раздел 3.2.3).

**3.2.2 Алгоритмы трехпозиционного регулирования**

Алгоритм трехпозиционных регуляторов определяется статической характеристикой: зависимостью выходных сигналов  $Y_M$  (меньше) и  $Y_B$  (больше) от входного  $X$  (см. рис. 3.12).

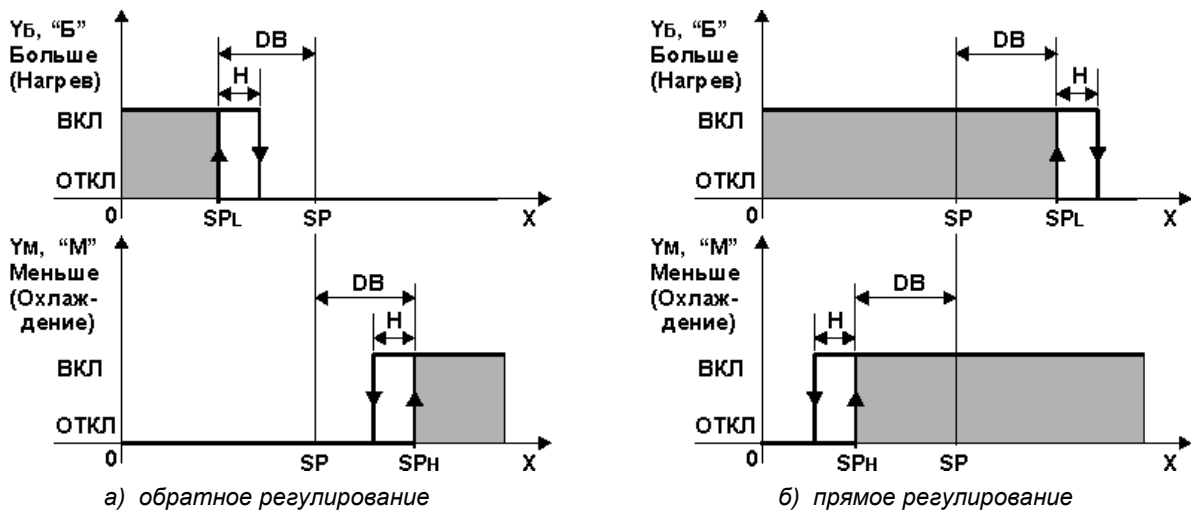


Рисунок 3.12 - Статические характеристики трехпозиционной системы регулирования

На рисунке 3.12-а представлена статическая характеристика трехпозиционной системы регулирования при *обратном* направлении регулирования. Зона регулирования без перекрытия.

На рисунке 3.12-б представлена статическая характеристика трехпозиционной системы регулирования при *прямом* направлении регулирования. Зона регулирования с перекрытием.

Выбор направления регулирования осуществляется в различных микропроцессорных регуляторах по разному (см. руководство по эксплуатации на соответствующую модель регулятора):

- с помощью параметра «прямое-обратное регулирование»,
- с помощью *знака* параметра «зона нечувствительности регулятора». При задании положительного значения параметра обеспечивается зона регулирования без перекрытия, при задании отрицательного значения - обеспечивается зона регулирования с перекрытием.

Имп. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Имп. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Алгоритм трехпозиционных регуляторов при *обратном* направлении регулирования (см. рис.3.12-а) выглядит следующим образом:

- Выходная величина  $Y_B$  равна *максимальному* воздействию - нагреватель *включен*:
- $Y_B = \max$  при  $X < SP - DB$ , где DB-значение ширины зоны нечувствительности.
- Выходная величина  $Y_B$  равна *минимальному* воздействию - нагреватель *выключен*:
- $Y_B = 0$  при  $X > SP - DB + H$ , где H-значение гистерезиса.
- Выходная величина  $Y_M$  равна *максимальному* воздействию - охладитель *включен*:
- $Y_M = \max$  при  $X > SP + DB$ , где DB-значение ширины зоны нечувствительности.
- Выходная величина  $Y_M$  равна *минимальному* воздействию - охладитель *выключен*:
- $Y_M = 0$  при  $X < SP + DB - H$ , где H-значение гистерезиса.

### 3.2.3 Зона гистерезиса

Ширина зоны гистерезиса в современных трехпозиционных регуляторах является *программируемым параметром настройки*. Представление зоны гистерезиса описывается в руководстве по эксплуатации на соответствующий тип регулятора или систему регулирования.

Назначение гистерезиса H - предотвращение «дребезга» управляющего выходного устройства (например, реле) и исполнительного механизма вблизи точки его включения (слишком частого включения). Также зона гистерезиса предназначена для *исключения одновременного включения* выходных устройств  $Y_B$  (больше) и  $Y_M$  (меньше), например для управления реверсивными двигателями, где одновременное включение может привести к выходу из строя двигателя исполнительного механизма.

В литературе по автоматизации также встречаются другие наименования параметра зоны гистерезиса - зона возврата, зона неравномерности, дифференциал.

Гистерезис (в некоторых типах регуляторов) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Отрицательные значения гистерезиса используются в основном для упреждения или задержки включения (выключения) выходных устройств.

### 3.2.4 Процессы регулирования с трехпозиционным законом

Процесс регулирования с трехпозиционным законом при *обратном* направлении регулирования представлен на рис.3.13.

Процесс трехпозиционного регулирования является автоколебательным - регулируемая величина как в переходном, так и в установившемся режиме периодически изменяется относительно заданного значения (см. рис. 3.13), т.е. регулируемая величина PV (X) подвержена незатухающим колебаниям.

Показателями автоколебательного режима являются амплитуда автоколебаний  $A_k$  и период автоколебаний  $T_k$  (см. рис.3.13).

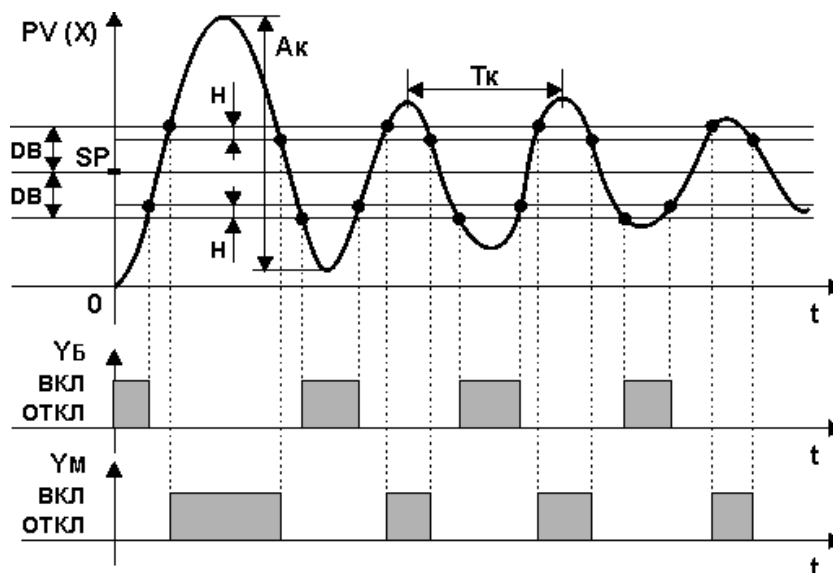


Рисунок 3.13 - Процесс регулирования с трехпозиционным законом

Инд. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						39

Частота и амплитуда колебаний зависят и определяются следующими величинами:

- от времени транспортного запаздывания  $\tau_d$ ,
- от постоянной времени объекта T (определяется инерционностью объекта),
- от максимальной скорости R изменения параметра X (определяется по переходной характеристике),
- от величины зоны нечувствительности DB регулятора и гистерезиса H переключательного элемента.

Для объектов с большой инерционностью (большим значением постоянной времени объекта T) и с малым запаздыванием  $\tau_d$  регулирование происходит с постоянными колебаниями до 3-10% от задания SP.

- Чем больше гистерезис H, отношение  $\tau_d / T$ , R - тем больше *амплитуда* колебаний Ak.
- Чем больше время запаздывания  $\tau_d$ , постоянная времени объекта T и зона нечувствительности DB - тем больше *период* колебаний Tk (см. рис.3.13).

Точность регулирования технологического параметра, например, температуры зависит от величины гистерезиса. Чем меньше гистерезис, тем точнее регулирование, но тем чаще включается нагреватель и тем самым больше износ коммутационных элементов (например, реле). Уменьшая гистерезис можно повысить качество регулирования до некоторого предела, определяемого параметрами объекта регулирования (тепловой инерцией, мощностью нагревателя, тепловой связью нагревателя и объекта и др.).

### 3.2.5 Параметры настройки трехпозиционных регуляторов:

Описание параметров настройки приводятся в руководстве по эксплуатации на соответствующую модель регулятора.

1) Зона нечувствительности DB. В различных типах регуляторов может быть представлена как:

- Полное значение (см. рис.3.10) или половинное значение зоны нечувствительности (см. рис.3.12).
- С помощью *знака* параметра «зона нечувствительности регулятора» можно установить направление действия регулятора. При задании положительного значения параметра обеспечивается зона регулирования без перекрытия, при задании отрицательного значения - обеспечивается зона регулирования с перекрытием.

2) Ширина зоны гистерезиса.

- Может принимать как положительные, так и отрицательные значения.
- Возможно задание для различных управляющих выходов (нагревание, охлаждение) различных зон гистерезиса - гистерезис нагревания, гистерезис охлаждения. Это необходимо для того, чтобы учесть асимметрию объекта управления.

3) Направление действия регулятора.

- Может устанавливаться обратное или прямое управление (см. рис. 3.12).

Возможность программирования различных параметров позволяет создать большое количество разнообразных трехпозиционных систем регулирования.

Инв. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	ПРМК.420000.001 И1					Лист
					Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	40



### 3.2.6 Трехпозиционное импульсное управление

Трехпозиционный импульсный регулятор применяется для управления интегральными исполнительными механизмами, реверсивными электродвигателями, насосами и другим оборудованием.

Параметрами настройки трехпозиционного импульсного регулятора являются:

- Направление действия регулятора. Прямое, обратное.
- Длительность управляющего импульса нагревания (больше, Б,  $Y_B$ ) -  $t_B$ .
- Пауза между управляющими импульсами нагревания (больше, Б,  $Y_B$ ) -  $t_{пБ}$ .
- Длительность управляющего импульса охлаждения (меньше, М,  $Y_M$ ) -  $t_M$ .
- Пауза между управляющими импульсами охлаждения (меньше, М,  $Y_M$ ) -  $t_{пМ}$ .
- Зона нечувствительности  $DB$  (полное или половинное значение).
- Ширина зоны гистерезиса (положительные или отрицательные значения, для нагревания, охлаждения).

В качестве примера на рис.3.14 приведен процесс трехпозиционного импульсного регулирования (при обратном направлении регулирования).

Параметры настройки регулятора представлены на рисунке 3.14.

Структурная схема трехпозиционной импульсной системы регулирования приведена на рис. 3.11.

Алгоритм работы трехпозиционного импульсного регулятора аналогичный алгоритму представленному в разд. 3.2.2, рис. 3.12-а, за исключением формирования выходных импульсных сигналов. В трехпозиционном импульсном регуляторе выходные сигналы (больше-меньше) формируются импульсами программируемой длительности и паузы.

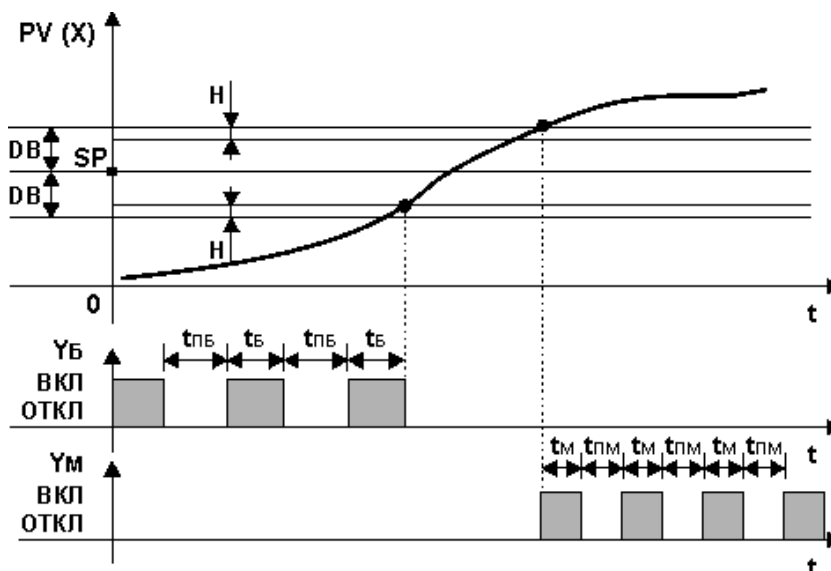


Рисунок 3.14 - Процесс регулирования с трехпозиционным импульсным законом

При программировании различных соотношений длительность-пауза изменяется скорость перемещения исполнительного механизма, что в свою очередь вызывает более точный выход на заданную точку, однако данный тип регулятора является более инерционным по сравнению с обычным трехпозиционным регулятором.

Величины длительностей  $t_B$ ,  $t_M$  и пауз  $t_{пБ}$ ,  $t_{пМ}$  устанавливаются таким образом, чтобы был найден оптимальный компромисс между минимально допустимой длительностью включения исполнительного механизма или блока (например, реле, контактора, магнитного пускателя, охлаждающего устройства, компрессора), частотой включения и получаемого в результате этого характера регулируемой величины.

Инд. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						41

### 3.3 Многопозиционные регуляторы

Многопозиционные регуляторы применяют:

- для повышения точности регулирования,
- для увеличения реакции системы регулирования и уменьшения времени регулирования,
- для улучшения показателей качества регулирования.

#### 3.3.1 Назначение. Принцип работы

Многопозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаздыванием.

Данный тип регуляторов используется для управления переключательными элементами - дискретными исполнительными устройствами: электромеханическими реле, контакторами, транзисторными ключами, симисторными или тиристорными устройствами, твердотельными реле и др., а также трехходовыми клапанами, кранами, смесителями, реверсивными электродвигателями, сервоприводами.

Многопозиционные регуляторы могут управлять одновременно несколькими нагрузками, например, группа ТЭНов, вентиляторы, заслонки и пр.

Многопозиционный регулятор работает как многопозиционный переключатель.

Например, температура в камере регулируется двумя ТЭНами – одним большой мощности для быстрого выхода на температурный режим камеры, другим – менее мощным – для поддержания температуры в камере, а для понижения температуры (охлаждения) используется вентилятор.

Пример структурной схемы многопозиционной системы регулирования приведен на рис. 3.15.

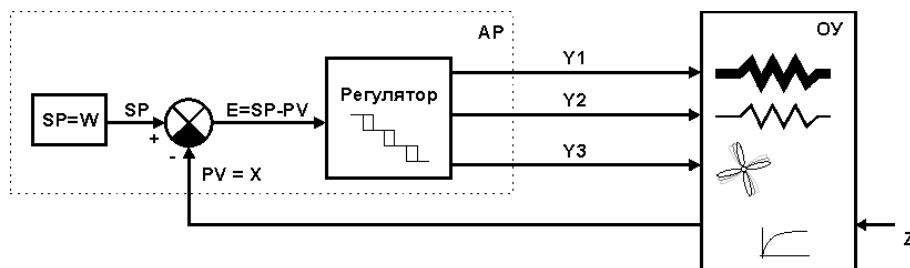


Рисунок 3.15 - Структурная схема многопозиционной системы регулирования

где: AP – многопозиционный регулятор, OU – объект управления, SP – узел формирования заданной точки (задания), E – рассогласование регулятора, PV=X – регулируемая величина, сигналы Y1 (управление ТЭНом большой мощности), Y2 (управление ТЭНом малой мощности), Y3 (управление вентилятором) – управляющие воздействия, Z – возмущающее воздействие.

#### 3.3.2 Алгоритм многопозиционного регулирования

Алгоритм многопозиционных регуляторов определяется статической характеристикой: зависимостью выходных сигналов  $Y_i$  от входного X. На рисунке 3.16 представлена, в качестве примера, статическая характеристика многопозиционной системы регулирования.

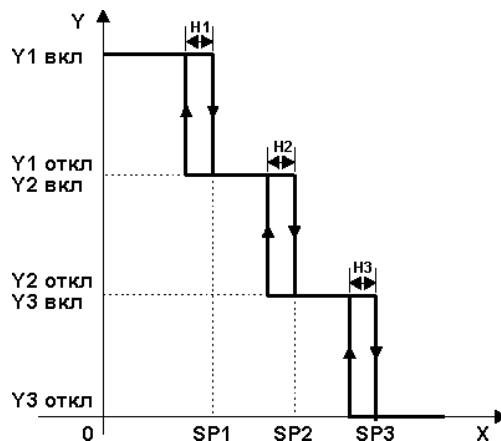


Рисунок 3.16 - Статическая характеристика многопозиционной системы регулирования

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- Логика работы многопозиционного регулятора может быть представлена:
- графически, в виде статической характеристики (например, см. рис. 3.16),
  - в виде таблицы состояний (см. таблицу 3.1 для примера на рис.3.16).

Таблица 3.1 - Логика работы многопозиционного регулятора

Область регулируемого параметра X (PV)	Выход Y1	Выход Y2	Выход Y3	Примечание
X>SP1	Отключен	Включен	Включен	
X<SP1-H1	Включен	Включен	Включен	
X>SP2	Отключен	Отключен	Включен	
X<SP2-H2	Отключен	Включен	Включен	
X>SP3	Отключен	Отключен	Отключен	
X<SP3-H3	Отключен	Отключен	Включен	

Таблица состояний состоит из нескольких столбцов: X (PV) - области регулируемого параметра X, столбцов Y1-Y3 - старого и нового состояния выходных сигналов САР.

В таблице состояний, в качестве примера, указана логика работы двухпозиционного регулятора при обратном типе направления регулирования. В качестве логики работы выходных устройств может быть использована различная логика работы двухпозиционных и/или трехпозиционных законов регулирования, а также различные направления регулирования.

Наибольший эффект использования таблицы состояний достигается при проектировании и программировании очень сложных алгоритмов регулирования.

### 3.3.3 Зона гистерезиса

Ширина зоны гистерезиса в многопозиционных регуляторах является *программируемым параметром настройки*. Представление зоны гистерезиса описывается в руководстве по эксплуатации на соответствующий тип регулятора или систему регулирования.

Более подробно описание представления зоны гистерезиса изложено в разделе 3.1.3.

### 3.3.4 Процессы регулирования с многопозиционным законом

Процесс регулирования (идеализированный) с многопозиционным законом представлен на рис.3.17.

Процесс многопозиционного регулирования, как и всех позиционных (релейных) законов регулирования, является автоколебательным - регулируемая величина PV как в переходном, так и в установившемся режиме периодически изменяется относительно заданного значения SP (см. рис. 3.17), т.е. регулируемая величина PV (X) подвержена незатухающим колебаниям.

Показателями автоколебательного режима являются амплитуда автоколебаний Ак и период автоколебаний Тк.

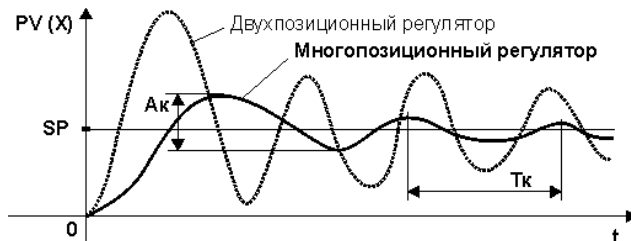


Рисунок 3.17 - Переходная характеристика многопозиционного процесса регулирования

По сравнению с двухпозиционными регуляторами многопозиционные регуляторы имеют большую точность регулирования, большую реакцию системы регулирования, меньшее время регулирования, а также улучшенные показатели качества регулирования.

### 3.3.5 Параметры настройки многопозиционных регуляторов

- 1) Уставка срабатывания выходного устройства одной или нескольких зон регулирования.
- 2) Ширина зоны гистерезиса.
- 3) Логика работы регулятора в каждой зоне в отдельности.

Используя возможность программирования различных параметров позволяет создать большое количество разнообразных многопозиционных систем регулирования.

### 3.3.6 Проектирование многопозиционных микропроцессорных систем управления на базе регуляторов предприятия МИКРОЛ:

Преимущества многопозиционных систем управления, реализованных на двухпозиционных и трехпозиционных микропроцессорных регуляторах предприятия МИКРОЛ представлены в разделе 3.1.6.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						43

### 3.4 П-, ПИ-, ПД-, ПИД - регуляторы

В данном разделе приведены описания алгоритмов работы и законы регулирования непрерывных П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторов с различными структурами выходного сигнала - аналоговым выходом, дискретным (импульсным) выходом или ШИМ-выходом (широко импульсным модулированным сигналом).

Классификация систем автоматического регулирования (САР) приведена в таблице 1.3 разд.1.3.

#### 3.4.1 Типовые регуляторы и регулировочные характеристики

Для регулирования объектами управления, как правило, используют типовые регуляторы, названия которых соответствуют названиям типовых звеньев (описание типовых звеньев представлено в разделе 2.4):

##### 1) П-регулятор, пропорциональный регулятор

Передаточная функция П-регулятора:  $W_P(s) = K_1$ . Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка  $E$ , тем больше управляющее воздействие  $Y$ ).

##### 2) И-регулятор, интегрирующий регулятор

Передаточная функция И-регулятора:  $W_I(s) = K_0 / s$ . Управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки.

##### 3) Д-регулятор, дифференцирующий регулятор

Передаточная функция Д-регулятора:  $W_D(s) = K_2 * s$ . Д-регулятор генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины:  $Y = K_2 * dE/dt$ .

На практике данные простейшие П, И, Д регуляторы комбинируются в регуляторы вида ПИ, ПД, ПИД (см. рис.3.18):

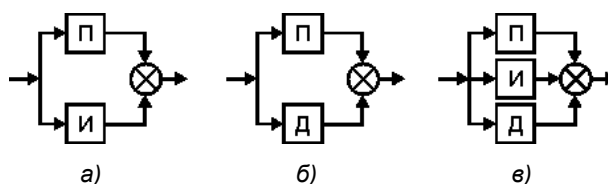


Рисунок 3.18 - Виды непрерывных регуляторов

В зависимости от выбранного вида регулятор может иметь пропорциональную характеристику (П), пропорционально-интегральную характеристику (ПИ), пропорционально-дифференциальную характеристику (ПД) или пропорционально-интегральную (изодромную) характеристику с воздействием по производной (ПИД-регулятор).

##### 4) ПИ-регулятор, пропорционально-интегральный регулятор (см. рис.3.18.а)

ПИ-регулятор представляет собой сочетание П- и И-регуляторов. Передаточная функция ПИ-регулятора:  $W_{ПИ}(s) = K_1 + K_0 / s$ .

##### 5) ПД-регулятор, пропорционально-дифференциальный регулятор (см. рис.3.18.б)

ПД-регулятор представляет собой сочетание П- и Д-регуляторов. Передаточная функция ПД-регулятора:  $W_{ПД}(s) = K_1 + K_2 s$ .

##### 6) ПИД-регулятор, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (см. рис.3.18.в)

ПИД-регулятор представляет собой сочетание П-, И- и Д-регуляторов. Передаточная функция ПИД-регулятора:  $W_{ПИД}(s) = K_1 + K_0 / s + K_2 s$ .

Наиболее часто используется ПИД-регулятор, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						44

### 3.4.2 Структурные схемы непрерывных регуляторов

В данном разделе приведены структурные схемы непрерывных регуляторов с аналоговым выходом - рис.3.19, с импульсным выходом - рис.3.20 и с ШИМ (широтно импульсным модулированным) выходом - рис.3.21.

В процессе работы система автоматического регулирования АР (регулятор) сравнивает текущее значение измеряемого параметра  $X$ , полученного от датчика  $D$ , с заданным значением (заданием  $SP$ ) и устраняет рассогласование регулирования  $E$  ( $E=SP-PV$ ). Внешние возмущающие воздействия  $Z$  также устраняются регулятором. Работа приведенных структурных схем отличается методом формирования выходного управляющего сигнала регулятора.

#### Непрерывный регулятор с аналоговым выходом

Структурная схема непрерывного регулятора с аналоговым выходом приведена на рис.3.19.

Выход  $Y$  регулятора АР (например, сигнал 0-20мА, 4-20мА, 0-5мА или 0-10В) воздействует через электропневматический преобразователь Е/Р сигналов (например, с выходным сигналом 20-100кПа) или электропневматический позиционный регулятор на исполнительный элемент  $K$  (регулирующий орган).

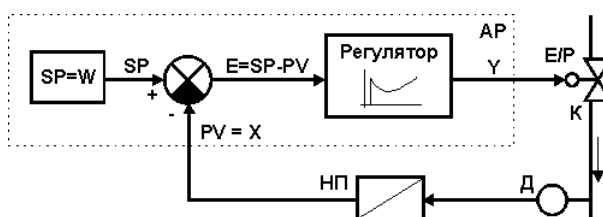


Рисунок 3.19 - Структурная схема регулятора с аналоговым выходом

где: АР – непрерывный ПИД-регулятор с аналоговым выходом,

SP – узел формирования заданной точки,

PV=X – регулируемый технологический параметр,

E – рассогласование регулятора,

D – датчик,

НП – нормирующий преобразователь

(в современных регуляторах является входным устройством)

Y – выходной аналоговый управляющий сигнал

E/P - электропневматический преобразователь,

K – клапан регулирующей (регулирующий орган).

#### Непрерывный регулятор с импульсным выходом

Структурная схема непрерывного регулятора с импульсным выходом приведена на рис.3.20.

Выходные управляющие сигналы регулятора - сигналы Больше и Меньше (транзистор, реле, симистор) через контактные или бесконтактные управляющие устройства (П) воздействуют на исполнительный элемент  $K$  (регулирующий орган).

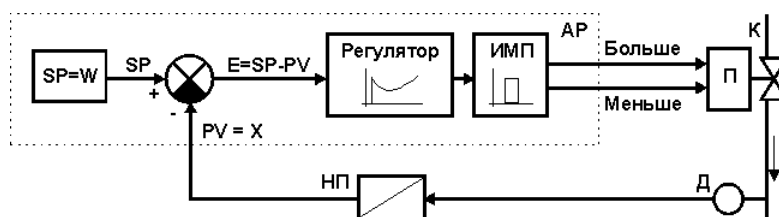


Рисунок 3.20 - Структурная схема регулятора с импульсным выходом

где: АР – непрерывный ПИД-регулятор с импульсным выходом,

SP – узел формирования заданной точки,

PV=X – регулируемый технологический параметр,

E – рассогласование регулятора,

D – датчик,

НП – нормирующий преобразователь

(в современных регуляторах является входным устройством)

ИМП - импульсный ШИМ модулятор, преобразующий выходной сигнал Y в последовательность импульсов со скважностью, пропорциональной выходному сигналу:  $Q=|Y|/100$ .

Сигналы Больше и Меньше – управляющие воздействия,

П – пускатель контактный или бесконтактный,

K – клапан регулирующей (регулирующий орган).

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						45

### Непрерывный регулятор с ШИМ (широтно импульсным модулированным) выходом

Структурная схема непрерывного регулятора с ШИМ (широтно импульсным модулированным) выходом приведена на рис.3.21.

Выходной управляющий сигнал регулятора (транзистор, реле, симистор) через контактные или бесконтактные управляющие устройства (П) воздействуют на исполнительный элемент К (регулирующий орган).

Непрерывные регуляторы с ШИМ выходом широко применяются в системах регулирования температуры, где выходной управляющий симисторный элемент (или твердотельное реле, пускатель) воздействуют на термоэлектрический нагреватель ТЭН, или вентилятор.

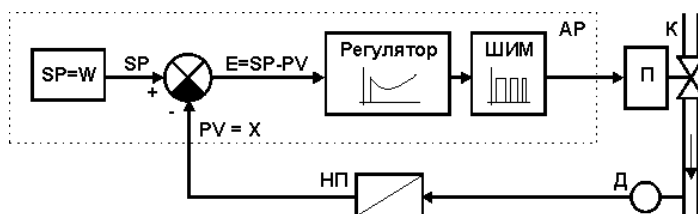


Рисунок 3.21 - Структурная схема регулятора с ШИМ выходом

- где:
- АП – непрерывный ПИД-регулятор с импульсным ШИМ выходом,
  - SP – узел формирования заданной точки,
  - PV=X – регулируемый технологический параметр,
  - E – рассогласование регулятора,
  - Д – датчик,
  - НП – нормирующий преобразователь  
(в современных регуляторах является входным устройством)
  - ШИМ - импульсный ШИМ модулятор, преобразующий выходной сигнал Y в последовательность импульсов со скважностью, пропорциональной выходному сигналу:  $Q=|Y|/100$ .
  - П – пускатель контактный или бесконтактный,
  - К – клапан регулирующий (регулирующий орган).

#### 3.4.3 Согласование выходных устройств непрерывных регуляторов

Выходной сигнал регулятора должен быть согласован с исполнительным механизмом и исполнительным устройством.

В соответствии с видом привода и исполнительным механизмом необходимо использовать выходное устройство непрерывного регулятора соответствующего типа, см. таблицу 3.1.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						46

Таблица 3.1 - Согласование выходных устройств непрерывных регуляторов

Выходное устройство непрерывного регулятора	Тип выходного устройства	Закон регулирования	Исполнительный механизм или устройство	Вид привода	Регулирующий орган
Аналоговый выход	ЦАП с выходом 0-5мА, 0-20мА, 4-20мА, 0-10В	П-, ПИ-, ПД-, ПИД-закон	Преобразователи и позиционные регуляторы электропневматические и гидравлические	Пневматические исполнительные приводы (с сжатым воздухом в качестве вспомогательной энергии) и электропневматические преобразователи сигналов или электропневматические позиционные регуляторы, электрические (частотные приводы)	
Импульсный выход	Транзистор, реле, симистор	П-, ПИ-, ПД-, ПИД-закон	Контактные (реле) и бесконтактные (симисторные) пускатели	Электрические приводы (с редуктором), в т.ч. реверсивные	
ШИМ выход	Транзистор, реле, симистор	П-, ПИ-, ПД-, ПИД-закон	Контактные (реле) и бесконтактные (симисторные) пускатели		Термо-электрический нагреватель (ТЭН) и др.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн. № докум.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						47

### 3.4.2 Реакция регулятора на единичное ступенчатое воздействие

Одной из динамических характеристик объекта управления является его переходная характеристика - реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие (см. раздел 2.3), например, изменение заданной точки регулятора.

В данном разделе приведены переходные процессы системы управления при единичном ступенчатом изменении заданной точки при использовании регуляторов с различным законом регулирования.

Если на вход регулятора подается скачкообразная функция изменения заданной точки - см. рис. 3.19, то на выходе регулятора возникает реакция на единичное ступенчатое воздействие в соответствии с характеристикой регулятора в функции времени.

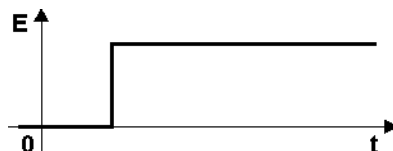


Рисунок 3.19 - Единичное ступенчатое воздействие скачкообразная функция изменения заданной точки регулятора

#### 3.4.2.1 П-регулятор, реакция на единичное ступенчатое воздействие

Параметрами П-регулятора являются коэффициент усиления  $K_p$  и рабочая точка  $Y_0$ .

Рабочая точка  $Y_0$  определяется как значение выходного сигнала, при котором рассогласование регулируемой величины равно нулю. При влиянии возмущающих воздействий возникает, в зависимости от  $Y_0$ , отклонение регулирования.

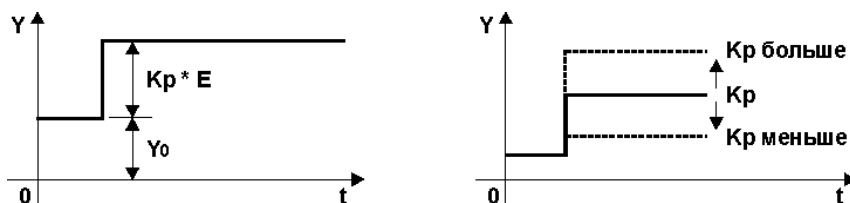


Рисунок 3.20 - П-регулятор. Реакция на единичное ступенчатое воздействие

#### 3.4.2.2 ПИ-регулятор, реакция на единичное ступенчатое воздействие

В отличие от П-регулятора у ПИ-регулятора, благодаря интегральной составляющей, исключается отклонение регулирования.

Параметром интегральной составляющей является время интегрирования  $T_i$ .

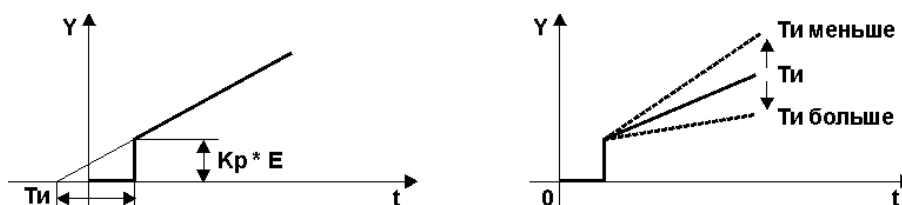


Рисунок 3.21 - ПИ-регулятор. Реакция на единичное ступенчатое воздействие

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата



### 3.4.2.3 ПД-регулятор, реакция на единичное ступенчатое воздействие

У ПД-регуляторов пропорциональная составляющая накладывается на затухающую дифференциальную составляющую.  
 Д-составляющая определяется через усиление упреждения  $V_d$  и время дифференцирования  $T_d$ .

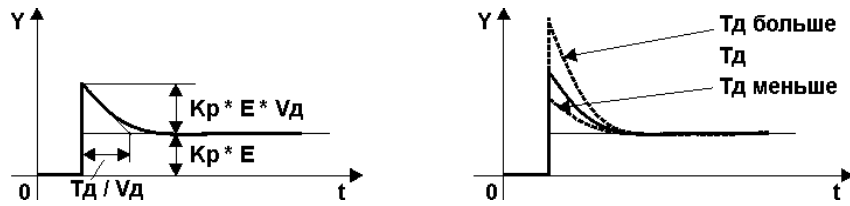


Рисунок 3.22 - ПД-регулятор. Реакция на единичное ступенчатое воздействие

### 3.4.2.4 ПИД-регулятор, реакция на единичное ступенчатое воздействие

Благодаря дополнительному подключению Д-составляющей ПИД-регулятор достигает улучшения динамического качества регулирования.  
 См. ПИ-регулятор, ПД-регулятор.

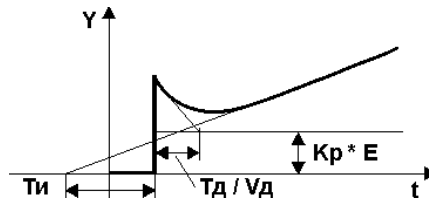


Рисунок 3.23 - ПИД-регулятор. Реакция на единичное ступенчатое воздействие

Инов. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инов. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						49

### 3.5 Адаптивные регуляторы

Ряд современных микропроцессорных приборов автоматически рассчитывают коэффициенты настройки регуляторов, такие регуляторы называются адаптивными. Адаптация производится:

- В процессе вывода состояния объекта на новую заданную точку SP. В этом случае говорят о самонастройке или самооптимизации;

- В процессе стабилизации состояния объекта. В этом случае говорят об адаптивном управлении. Адаптивное управление, которое, по самому определению этого термина, должно обеспечить слежение параметров настройки регулятора за непрерывно изменяющимися свойствами объекта управления. Адаптивные регуляторы позволяют улучшить качество регулирования температуры, например, при изменении загрузки печи и изменения состояния нагревательного элемента в процессе эксплуатации.

Однако можно отметить и **недостатки** адаптивных систем:

- В случае очень больших возмущающих воздействий параметры настройки могут сбиться и система на некоторое время может перейти в колебательный режим со значениями превышающими пределы регулируемой величины PV.

- Встроенные алгоритмы адаптации производят идентификацию *не всех типов объектов управления*. Поэтому, прежде, чем проектировать систему управления, необходимо в технической документации (или получить консультацию у производителя оборудования) *уточнить типы объектов*, которые может идентифицировать та или иная система адаптивного регулирования.

- Методы изменения управляющего выходного сигнала в процессе идентификации объекта могут иметь необратимые последствия для технологического процесса. Например, при самонастройке регулятор может полностью открыть или полностью закрыть клапан (регулирующий орган), или подача пробных гармонических (синусоидальных) сигналов может ввести процесс регулирования в автоколебательный режим.

В связи с этим, **на этапе проектирования** системы управления (а не на этапе пуско-наладочных работ) необходимо уточнить следующие вопросы совместимости:

- Верно ли выбран метод самонастройки для данного процесса или объекта регулирования?
- Может ли быть настроен данным типом алгоритма самонастройки данный объект управления?
- Допустимы ли методы и диапазоны изменения управляющего выхода в процессе самонастройки?

В любом случае для установки адаптивных систем (некоторых производителей) требуется хотя бы грубое задание некоторых параметров:

- частоты опроса,
- максимального и минимального значения регулируемой величины,
- времени регулирования,
- заданного значения перерегулирования,
- допустимого значения изменения выходного сигнала,
- зоны нечувствительности и др.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						50

## 4 ВЫБОР ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ТИПА РЕГУЛЯТОРА

### 4.1 Задача выбора закона управления и типа регулятора

Задача выбора закона управления и типа регулятора состоит в следующем – необходимо выбрать такой тип регулятора, который при минимальной стоимости и максимальной надежности обеспечивал бы заданное качество регулирования. Могут быть выбраны релейные, непрерывные или дискретные (цифровые) типы регуляторов.

*Для того, чтобы выбрать тип регулятора и определить его настройки необходимо знать:*

- 1 Статические и динамические характеристики объекта управления.
- 2 Требования к качеству процесса регулирования.
- 3 Показатели качества регулирования для непрерывных регуляторов.
- 4 Характер возмущений, действующих на процесс регулирования.

Выбор типа регулятора обычно начинается с простейших двухпозиционных регуляторов и может заканчиваться самонастраивающимися микропроцессорными регуляторами. Заметим, что по требованиям технологического регламента многие объекты не допускают применения релейного управляющего воздействия.

### 4.2 Определение динамических характеристик объекта регулирования

Для определения динамических характеристик объекта регулирования - коэффициента усиления (передачи) объекта  $K_0$ , постоянной времени объекта  $T$  и запаздывания  $\tau_d$  на практике чаще пользуются экспериментальными методами, поскольку зависимость между входной и выходной величиной (переходная характеристика или кривая разгона) легче получить именно таким способом, см. раздел 2.6.

### 4.3 Показатели качества процесса регулирования для непрерывных регуляторов

Типовые процессы регулирования и показатели качества непрерывных регуляторов представлены в разделах 2.7, 2.10. В качестве непрерывных регуляторов предполагается использовать регуляторы, реализующие И, П, ПИ, ПД и ПИД - законы управления. Теоретически, с усложнением закона регулирования качество работы системы улучшается.

Известно, что на динамику регулирования наибольшее влияние оказывает величина отношения запаздывания к постоянной времени объекта  $\tau_d / T$ , и представляет собой степень трудности регулирования объекта. Эта величина равняется переходному отклонению регулируемого параметра  $X$  в процентах от заданного значения  $SP$ , когда величина внешнего регулирующего воздействия  $Y$  составляет 1 % от диапазона регулирования.

Эффективность компенсации ступенчатого возмущения регулятором достаточно точно может характеризоваться величиной динамического коэффициента регулирования  $R_d$ , а быстродействие - величиной времени регулирования  $t_r$ .

### 4.4 Рекомендации по выбору закона регулирования и типа регулятора

Минимально возможное время регулирования  $t_r$  для различных законов регулирования и типов регуляторов при оптимальной их настройке определяется таблицей 4.1.

Теоретически, в системе с запаздыванием, минимальное время регулирования  $t_{r\min} = 2 \tau_d$ .

В таблице 4.1 приведены рекомендации по выбору закона регулирования и типа регулятора исходя из величины отношения запаздывания  $\tau_d$  к постоянной времени объекта  $T$ .

Если  $\tau_d / T < 0,2$ , то можно выбрать релейный, непрерывный или цифровой регуляторы.

Если  $0,2 < \tau_d / T < 1$ , то должен быть выбран непрерывный или цифровой, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор.

Если  $\tau_d / T > 1$ , то выбирают специальный цифровой регулятор с упредителем, который компенсирует запаздывание в контуре управления. Однако этот же регулятор рекомендуется применять и при меньших отношениях  $\tau_d / T$ .

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						51

Таблица 4.1 - Выбор закона регулирования и типа регулятора по отношению  $\tau_d / T$  и  $t_p / \tau_d$

Соотношение $\tau_d / T$	Соотношение $t_p / \tau_d$	Характеристика объекта		Закон регулирования и тип регулятора
		по запаздыванию и инерционности	по степени регулируемости	
$0 < \tau_d / T < 0,05$		Без запаздывания	Очень хорошо регулируемый	Релейный, непрерывный П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,05 < \tau_d / T < 0,1$		С большой инерционностью и с малым запаздыванием	Очень хорошо регулируемый	Релейный, непрерывный П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,1 < \tau_d / T < 0,2$		С существенным транспортным запаздыванием	Хорошо регулируемый	Релейный, непрерывный П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,2 < \tau_d / T < 0,4$		С существенным транспортным запаздыванием	Еще регулируемый	Непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,4 < \tau_d / T < 0,8$		С существенным транспортным запаздыванием	Трудно регулируемый	Непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$0,8 < \tau_d / T < 1$		С большим транспортным запаздыванием	Очень трудно регулируемый	Непрерывный или цифровой ПИ-, ПД-, ПИД-регулятор
$\tau_d / T > 1$		С большим транспортным запаздыванием	Очень трудно регулируемый	Цифровой регулятор с упредителем
	$t_p / \tau_d \geq 6,5$			Непрерывный или цифровой, П-регулятор
	$t_p / \tau_d \geq 12$			Непрерывный или цифровой, ПИ-регулятор
	$t_p / \tau_d \geq 7$			Непрерывный или цифровой, ПИД-регулятор

Примечания.

- $t_p$  - время регулирования,  $\tau_d$  - запаздывание в объекте,  $T$  - постоянная времени объекта.
- Релейный регулятор - двухпозиционный, трехпозиционный, многопозиционный регулятор.

На параметры объекта значительное влияние оказывает взаимное расположение исполнительных органов (например, ТЭНа) и первичного преобразователя (датчика).

Наличие запаздывания объекта резко ухудшает динамику замкнутой системы. Часто при отношении  $\tau_d / T > 0,5$  типовые законы управления не могут обеспечить высокую точность и быстродействие процесса регулирования. Главной причиной здесь является резкое снижение критического коэффициента усиления системы при увеличении запаздывания в объекте управления.

В связи с этим повысить качество управления можно либо путем уменьшения запаздывания в объекте, либо за счет применения регулятора более сложной структуры, а именно оптимального регулятора.

Из теории оптимального управления следует, что такой регулятор в своей структуре должен содержать модель объекта управления.

Системы управления с моделью объекта обладают возможностью предугадывать будущие изменения состояния объекта. Они могут быть адаптивными или нет и незаменимы для объектов с существенным временем запаздывания  $\tau_d / T > 0,2$ .

Перечисленные в табл. 4.1 объекты регулирования с отношением  $\tau_d / T < 0,2$  устойчивы и обладают самовыравниванием.

Существуют неустойчивые объекты без самовыравнивания. Например, вентилятор с асинхронным электродвигателем с жесткой характеристикой. При изменении напряжения питания двигатель или находится в заторможенном состоянии, или разгоняется до номинальных оборотов.

Для каждого объекта управления необходимо применять регуляторы с соответствующим алгоритмом и законом регулирования. Это позволяет существенно снизить потери при функционировании объекта (расход энергии, потери продукции и пр.).

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 52

#### 4.4.1 П-закон регулирования

Руководствуясь таблицей 4.1 можно утверждать, что наибольшее быстродействие обеспечивает **П-закон** управления, - исходя из соотношения  $t_p / \tau_d$ .

Однако, если коэффициент усиления П-регулятора  $K_p$  мал (чаще всего это наблюдается в системах с запаздыванием), то такой регулятор не обеспечивает высокой точности регулирования, т.к. в этом случае велика величина статической ошибки.

Если  $K_p \geq 10$ , то П-регулятор приемлем, а если  $K_p < 10$ , то требуется введение в закон управления интегральной составляющей.

#### 4.4.2 ПИ-закон регулирования

Наиболее распространенным на практике является **ПИ-регулятор**, который обладает следующими достоинствами:

1. Обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования.
2. Достаточно прост в настройке, т.к. настраиваются только два параметра, а именно коэффициент усиления  $K_p$  и постоянная времени интегрирования  $T_i$ . В таком регуляторе имеется возможность оптимизации величины отношения  $K_p/T_i \rightarrow \min$ , что обеспечивает управление с минимально возможной среднеквадратичной ошибкой регулирования.
3. Малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличие от ПИД-регулятора).

#### 4.4.3 ПИД-закон регулирования

Для наиболее ответственных контуров регулирования можно рекомендовать использование **ПИД-регулятора**, обеспечивающего наиболее высокое быстродействие в системе.

Однако следует учитывать, что это условие выполняется только при его оптимальных настройках (настраиваются три параметра).

С увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора. Поэтому качество работы ПИД-регулятора для систем с большим запаздыванием становится сравнимо с качеством работы ПИ-регулятора.

Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования и износ исполнительного механизма.

Таким образом, ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования, с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления. Примерами таких систем является системы регулирования температуры.

ПИД регуляторы позволяют для объектов постоянной времени объекта (инерционностью)  $T$  и с малым транспортным запаздыванием  $\tau_d < 0,2T$  обеспечить хорошее качество регулирования: рассогласование регулирования  $E < 1\%$  (от заданной точки), достаточное малое время выхода на режим и невысокую чувствительность к внешним возмущениям. Иногда (в некоторых объектах регулирования с существенным транспортным запаздыванием), при  $\tau_d > 0,2T$  ПИД регулятор обладает плохим качеством регулирования. В этом случае хорошие качественные показатели обеспечивают системы управления с моделью объекта.

Следует иметь в виду, что при неточном задании коэффициентов настройки ПИД регулятор может иметь худшие показатели, чем двухпозиционный регулятор и даже перейти в режим автоколебаний. Для типовых П-, ПИ-, ПИД регуляторов известны простейшие аналитические и табличные методы настройки (например методики Циглера-Никольса).

Вопросы настройки П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторов рассмотрены в разделе 6.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 53

## 5 НАПРАВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ РЕГУЛЯТОРА, ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

### 5.1 Основные положения и определения

#### 5.1.1 Направление действия объекта регулирования:

Объект регулирования может иметь прямую или обратную характеристику. Другими словами – объект регулирования может быть прямого (нормального) или обратного (реверсивного) действия.

*Объект управления прямого (нормального) действия:*

Увеличение значения выходного сигнала регулятора (например, аналоговый выход АО или срабатывание ключа БОЛЬШЕ) вызывает увеличение (рост) технологического параметра. Например, увеличение подачи газа в печь или растущий поток пара в теплообменник вызывают рост температуры.

*Объект управления обратного (реверсивного) действия:*

Увеличение значения выходного сигнала регулятора (например, аналоговый выход АО или срабатывание ключа БОЛЬШЕ) вызывает уменьшение технологического параметра. Например, увеличение подачи охлаждающей жидкости в холодильник вызывают уменьшение температуры.

#### 5.1.2 Измерительные преобразователи прямого действия:

Увеличение технологической величины вызывает увеличение (рост) выходного аналогового сигнала (тока или напряжения) измерительного преобразователя и впоследствии увеличивающуюся (растущую) индикацию технологического параметра.

#### 5.1.3 Исполнительный механизм (клапан) прямого действия:

Увеличение выходного аналогового сигнала регулятора или включение исполнительного импульса БОЛЬШЕ вызывают открытие регулирующего органа исполнительного механизма. Например, большую подачу газа или большой поток пара. Значение управляющего аналогового выходного сигнала (АО) или значение выходной аналоговой ячейки памяти импульсного регулятора во многих приборах является индицируемым параметром.

#### 5.1.4 Направление действия регулятора:

Направление действия регулятора всегда должно иметь встречную характеристику (отрицательная обратная связь) к объекту регулирования (включая исполнительный механизм и измерительный преобразователь).

Регулятор обратного действия в сочетании с объектом, имеющим обратную характеристику, по своим свойствам аналогичен регулятору прямого действия, который управляет объектом с прямой характеристикой.

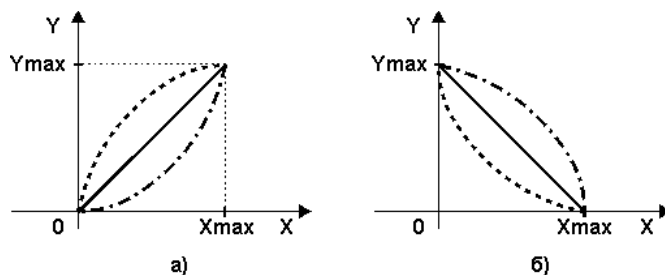


Рисунок 5.1 - Направление характеристики регуляторов  
 а) характеристика регулятора прямого действия,  
 б) характеристика регулятора обратного действия.

Инд. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 54
------	------	----------	---------	------	--------------------	------------

## 5.2 Согласование направления действия регулятора с объектом регулирования

### 5.2.1 Направление действия объекта и исполнительного механизма известно

В данном разделе представлена методика выбора направления действия *аналогового* (5.2.1.1 - с аналоговым выходом) или *импульсного* (5.2.1.2 - с импульсным выходом) регулятора при известном направлении действия объекта регулирования и исполнительного механизма.

5.2.1.1 Выбор направления действия аналогового регулятора в зависимости от направления действия объекта и исполнительного механизма:

Таблица 5.1 - Выбор направления действия аналогового регулятора

Заданы следующие направления действия объекта и исполнительного механизма:			При нажатии клавиши ▲ (больше), при управления выходным сигналом, в ручном режиме:			Регулятор:
Направление действия объекта регулирования	Направление действия исполнительного механизма	Направление действия объекта и исполнительного механизма	Выходной аналоговый сигнал (АО)	Исполнительный механизм (клапан)	Индикруемый и регулируемый параметр	Выбрать необходимое направление действия регулятора
Прямое	Прямое (НЗ)	Прямое	Растет	Открывается	Растет	<i>Обратный</i>
Прямое	Обратное (НО)	Обратное	Растет	Закрывается	Падает	<i>Прямой</i>
Обратное	Прямое (НЗ)	Обратное	Растет	Открывается	Падает	<i>Прямой</i>
Обратное	Обратное (НО)	Прямое	Растет	Закрывается	Растет	<i>Обратный</i>

Примечания.

1. Условные обозначения исполнительного механизма: НО – нормально открытый исполнительный механизм, НЗ – нормально закрытый исполнительный механизм.

2. В таблице отсутствуют режимы, которые не имеют практического смысла: например, объект прямого действия, исполнительный механизм прямого действия и регулятор прямого действия у которого при увеличении выходного сигнала регулируемый параметр увеличивается.

5.2.1.2 Выбор направления действия импульсного (трехпозиционного, ПИД-импульсного) регулятора в зависимости от направления действия объекта и исполнительного механизма:

Таблица 5.2 - Выбор направления действия импульсного регулятора

Заданы следующие направления действия объекта и исполнительного механизма:			При нажатии клавиши ▲ (больше), при управления выходным сигналом, в ручном режиме:			Регулятор:
Направление действия объекта регулирования	Направление действия исполнительного механизма	Направление действия объекта и исполнительного механизма	Срабатывает (активный) коммутационный сигнал или ключ	Исполнительный механизм (клапан)	Индикруемый и регулируемый параметр	Выбрать необходимое направление действия регулятора
Прямое	Прямое <sup>1)</sup>	Прямое	Больше	Открывается	Растет	<i>Обратный</i>
Обратное	Прямое <sup>1)</sup>	Обратное	Меньше	Закрывается	Падает	<i>Прямой</i>
Обратное	Прямое <sup>1)</sup>	Обратное	Больше	Открывается	Падает	<i>Прямой</i>

Примечания.

1. Срабатывание ключа Больше открывает исполнительный механизм.

2. Если исполнительный механизм подключается в обраном режиме (реверсивно), т.е. ключ Больше закрывает исполнительный механизм, тогда необходимо реверсировать обратную связь по положению или изменить направление действия регулятора.

3. В таблице отсутствуют режимы, которые не имеют практического смысла: например, объект прямого действия, исполнительный механизм прямого действия и регулятор прямого действия у которого при увеличении выходного сигнала регулируемый параметр увеличивается.

Изн. № дубл.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Подп. и дата
Изн. № докум.	Подп. и дата

## 5.2.2 Направление действия объекта и исполнительного механизма неизвестны

В данном разделе представлена методика определения направления действия исполнительного механизма (5.2.2.1) и объекта управления (5.2.2.2).

### 5.2.2.1 Определение направления действия исполнительного механизма

1. Перевести регулятор (систему регулирования) в ручной режим.

2. При отключенном технологическом процессе (по возможности) или вблизи его безопасного положения нажать клавишу ▲ (больше) увеличения управляющего воздействия и наблюдать, откроется или закроется исполнительный механизм. Открытие исполнительного механизма означает нормальное действие.

3. Если у импульсных регуляторов наблюдается закрытие, необходимо поменять местами соединения управляющих ключей Больше и Меньше.

4. Наблюдение за исполнительным механизмом осуществляется в соответствии с таблицей 5.3:

Таблица 5.3 - Определение направления действия исполнительного механизма

Тип объекта управления:	Результат наблюдения за исполнительным механизмом:
Объекты прямого действия:	Увеличение технологического параметра X (PV) означает исполнительный механизм прямого действия
Объекты обратного действия:	Уменьшение технологического параметра X (PV) означает исполнительный механизм прямого действия
У импульсных регуляторов при правильно подключенном позиционном квитировании:	Увеличение выходного сигнала У (АО) - означает исполнительный механизм прямого действия

5. Наблюдение за исполнительным механизмом может производиться:

- перед установкой на технологический объект,
- на месте его установки на технологическом оборудовании во время пусконаладочных работ.

### 5.2.2.2 Определение направления действия объекта управления

1. Перевести регулятор (систему регулирования) в ручной режим.

2. При отключенном технологическом процессе (по возможности) или вблизи его безопасного положения нажать клавишу ▲ (больше) увеличения управляющего воздействия и наблюдать на индикации измеренной величины - увеличивается или уменьшается регулируемый технологический параметр.

3. Определение направления действия объекта управления по результатам наблюдения за технологическим параметром (при имеющемся исполнительном механизме) представлено в таблице 5.4:

Таблица 5.4 - Определение направления действия объекта управления

Результат наблюдения за технологическим параметром	Имеется в наличии исполнительный механизм:	Определяемое направление действия объекта управления
Происходит <i>увеличение</i> технологического параметра	<i>Прямого</i> действия (НЗ)	Объект <i>прямого</i> действия
	<i>Обратного</i> действия (НО)	Объект <i>обратного</i> действия
Происходит <i>уменьшение</i> технологического параметра	<i>Прямого</i> действия (НЗ)	Объект <i>обратного</i> действия
	<i>Обратного</i> действия (НО)	Объект <i>прямого</i> действия

## 5.3 Выбор направления действия регулятора

5.3.1 Определить направление действия исполнительного механизма согласно методики 5.2.2.1 и направления действия объекта регулирования согласно методики 5.2.2.2.

5.3.2 Используя данные, полученные в 5.3.1 определить направление действия регулятора в соответствии с таблицами 5.1 или 5.2, в зависимости от выходной структуры (аналоговый или импульсный) существующего типа регулятора.

5.3.3 В современных промышленных регуляторах имеется параметр конфигурации называемый "Направление действия регулятора", который может принимать значение: "Прямой" или "Обратный".

С помощью данного параметра может инвертироваться величина приращения сигнала управления.

Выбор значения этого параметра осуществляется таким образом, чтобы обеспечить отрицательную обратную связь в системе управления.

Имп. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Подп. и дата
Инов. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						56



## 6 МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ

### 6.1 Определение оптимальных настроек регуляторов

Регулятор, включенный в САР, может иметь несколько настроек, каждая из которых может изменяться в достаточно широких пределах. При этом при определенных значениях настроек система будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию.

Поэтому стоит задача определить настройки, соответствующие устойчивой системе, но и выбрать из них оптимальные.

**Оптимальными настройками регулятора** называются настройки, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого-либо показателя качества. Требования к показателям качества устанавливаются непосредственно, исходя из технологических. Чаще всего накладываются требования на время регулирования  $t_p$  (или минимальное время регулирования  $t_{p\min}$ ) и степень затухания ( $\Psi \geq \Psi_{\text{зад}}$ ).

Однако, изменяя настройки таким образом, чтобы увеличить степень затухания, мы можем прийти к слишком большому времени регулирования, что нецелесообразно. И наоборот, стремясь уменьшить время регулирования, мы получаем более колебательные процессы с большим значением  $\Psi$ .

Зависимость степени затухания  $\Psi$  от времени регулирования  $t_p$  в общем случае имеет вид, изображенный на рисунке 6.1.

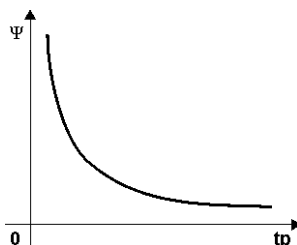


Рисунок 6.1 - Зависимость степени затухания  $\Psi$  от времени регулирования  $t_p$

Для определения оптимальных настроек разработан ряд математических методов, среди которых метод D-разбиения.

Кривой D-разбиения называется кривая в плоскости настроек регулятора, которая соответствует определенному значению какого-либо показателя качества.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						57

## 6.2 Установка параметров регулирования без знания характеристик объекта

Параметры регулирования для оптимальной регулировки оборудования в этом случае еще неизвестны. Для удержания регулирующего контура в стабильном состоянии имеются следующие установки:

Коэффициент пропорциональности  $K_p = 0,1$   
 Время интегрирования  $T_i = 0$  сек (отключено)  
 Время дифференцирования  $T_d = 0$  (отключено).

### - П - регулятор (сигнал управления $P = high$ )

- Установить желаемую заданную величину и в ручном режиме установить рассогласование регулирования на ноль.
- Необходимая для рассогласования регулирования ноль рабочая точка в ручном режиме при  $Y_0 = AU_0$  устанавливается автоматически (.....установка). Рабочая точка может быть также задана вручную, для чего необходимо установить параметр «-»  $Y_0$  на желаемую рабочую точку.
- Переключиться на автоматический режим.
- Медленно увеличивать  $K_p$  пока регулирующий контур через малые изменения заданной величины не начнет клониться к колебаниям.
- Незначительно уменьшать  $K_p$  пока колебания не будут устранены.

### - ПД - регулятор (сигнал управления $P = high$ )

- Установить желаемую заданную величину и в ручном режиме установить рассогласование регулирования на ноль.
- Необходимая для рассогласования регулирования ноль рабочая точка в ручном режиме при  $Y_0 = AU_0$  устанавливается автоматически (.....установка). Рабочая точка может быть также задана вручную, для чего необходимо установить параметр «-»  $Y_0$  на желаемую рабочую точку.
- Переключиться на автоматический режим.
- Медленно увеличивать  $K_p$  пока регулирующий контур через малые изменения заданной величины не начнет клониться к колебаниям.
- Переключить  $T_v$  с OFF на 1 сек.
- Увеличивать  $T_v$  до тех пор, пока колебания не будут устранены.
- Медленно увеличивать  $K_p$  до тех пор, пока снова не появятся колебания.
- Повторять установки в соответствии с двумя предыдущими шагами до тех пор, пока колебания уже не могут быть устранены.
- Незначительно уменьшать  $T_v$  и  $K_p$  пока колебания не будут устранены.

### - ПИ - регулятор (сигнал управления $P = Low$ )

- Установить желаемую заданную величину и в ручном режиме установить рассогласование регулирования на ноль.
- Переключиться на автоматический режим.
- Медленно увеличивать  $K_p$  пока регулирующий контур через малые изменения заданной величины не начнет клониться к колебаниям.
- Незначительно уменьшать  $K_p$  пока колебания не будут устранены.
- Уменьшать  $T_i$  до тех пор, пока регулирующий контур снова не начнет клониться к колебаниям
- Медленно увеличивать  $T_i$  до тех пока уклон к колебаниям не будет устранен

### - ПИД - регулятор (сигнал управления $P = Low$ )

- Установить желаемую заданную величину и в ручном режиме установить рассогласование регулирования на ноль.
- Переключиться на автоматический режим.
- Медленно увеличивать  $K_p$  пока регулирующий контур через малые изменения заданной величины не начнет клониться к колебаниям.
- Переключить  $T_v$  с OFF на 1 сек.
- Увеличивать  $T_v$  до тех пор, пока колебания не будут устранены.
- Медленно увеличивать  $K_p$  до тех пор, пока снова не появятся колебания.
- Повторять установки в соответствии с двумя предыдущими шагами до тех пор, пока колебания уже не могут быть устранены.
- Незначительно уменьшать  $T_v$  и  $K_p$  пока колебания не прекратятся.
- Уменьшать  $T_i$  до тех пор, пока регулирующий контур снова не начнет клониться к колебаниям
- Медленно увеличивать  $T_i$  до тех пока уклон к колебаниям не будет устранен

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						58

### 6.3 Ручная установка параметров регулирования по переходной функции

Если дана переходная функция объекта регулирования или она может быть определена, то параметры регулирования могут быть установлены согласно установочным директивам, указанным в справочниках. Переходная функция в положении регулятора «режим» может быть записана через скачкообразное изменение управляющего воздействия и характер регулируемой величины может регистрироваться самописцем. При этом получается переходная функция, приблизительно соответствующая указанной на рис. 2.5. Хорошие средние величины из установочных параметров многих составителей дают следующие эмпирические формулы:

#### П - регулятор:

Пропорциональный коэффициент  $K_p = T / [\tau_d * K]$

#### ПИ - регулятор:

Пропорциональный коэффициент  $K_p = 0,8 * (T_g / [T_u * K])$   
 Время изодома  $T_n = 3 * T_u$

#### ПИД -:

Пропорциональный коэффициент  $K_p = 1,2 * (T_g / [T_u * K])$   
 Время изодома  $T_n = T_u$   
 Время предварения  $T_v = 0,4 * T_u$

Где:

$T_u$  - время задержки

$T_g$  - время выравнивания

$K_s$  - передаточный коэффициент объекта регулирования

#### Самый простейший способ настройки ПИД-регуляторов:

1.  $I=D=0$ , увеличиваем  $P$  до  $P_{кр}$ , пока в системе не начнутся автоколебания.
2.  $P=P_{кр}/2$ ,  $D=0$ , увеличиваем  $I$  до  $I_{кр}$ , пока в системе не начнутся автоколебания.
3.  $P=P_{кр}/2$ ,  $I=I_{кр}/2$ , увеличиваем  $D$  до  $D_{кр}$ , пока в системе не начнутся автоколебания.
4.  $P=P_{кр}/2$ ,  $I=I_{кр}/2$ ,  $D = D_{кр}/2$ . Готово.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						59

## 7 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И НАСТРОЙКЕ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

- 1 Определить статические и дин х-ки
- 2 Определ парам перех х-ки
- 3 Выбрать з-н рег 2-3-П-ПИ-ПИД
- 4 Исп мет настр опред парам ПИД рег-ра

### 7.1 Выбор параметра и канала регулирования

Одним и тем же выходным параметром объекта можно управлять по разным входным каналам. Например, температуру в печи можно регулировать двумя путями - изменением расхода воздуха или газа в печь.

Задача состоит в том, какой из входных параметров (каналов) следует выбирать. При выборе нужного канала управления исходят из следующих соображений:

1). Из всех возможных регулирующих воздействий выбирают такой поток вещества или энергии, подаваемый в объект или отводимый из него, минимальное изменение которого вызывает максимальное изменение регулируемой величины, т. е. коэффициент усиления по выбранному каналу должен быть по возможности максимальным. Тогда, по данному каналу, можно обеспечить более точное регулирование.

2). Диапазон допустимого изменения управляющего сигнала должен быть достаточен для полной компенсации максимально возможных возмущений, возникающих в данном технологическом процессе, т. е. должен быть запас по мощности управления в данном канале.

3). Выбранный канал должен иметь благоприятные динамические свойства, т. е. запаздывание  $\tau_d$  и отношение  $\tau_d / T$ , где  $T$  - постоянная времени объекта, должны быть возможно меньшими. Кроме того, изменение статических и динамических параметров объекта по выбранному каналу при изменении нагрузки или во времени должны быть незначительными.

4). Выбранный канал регулирования должен быть согласован с технологическим регламентом ведения процесса.

### 7.2 Выбор периода квантования

Для того, чтобы эффект квантования по времени мало сказывался на динамику системы цифрового регулирования, рекомендуется выбирать период квантования из соотношения:

где: - это время достижения выходным сигналом уровня 95% от установившегося значения при подаче на вход объекта ступенчатого сигнала. Если объект первого порядка, то .

Другой подход к выбору величины периода квантования основан на рекомендациях американских ученых Зиглера и Никольса, согласно которым , где - период критических колебаний объекта управления.

В реальных условиях при управлении инерционными процессами значение берется от 1 секунды до нескольких минут (в газоанализаторах, например, 1 раз в час). При регулировании малоинерционных процессов (например, расхода жидкости) величина может составлять десятки доли секунды. Нельзя выбирать большие периоды опроса, особенно для ответственных процессов, т.к. в этом случае аварийные ситуации будут ликвидироваться слишком медленно. В тоже время, при слишком малом периоде опроса повышаются требования к быстродействию ЭВМ и увеличивается влияние шумов.

### 7.3 Регулирование при наличии шумов

Наличие высокочастотных шумовых составляющих в измерительном сигнале приводит к случайным колебаниям исполнительного механизма системы, что, в свою очередь, увеличивает дисперсию ошибки регулирования, снижает точность регулирования. В некоторых случаях сильные шумовые составляющие могут привести систему к неустойчивому режиму работы (стохастическая неустойчивость).

В промышленных системах в измерительных цепях часто присутствуют шумы, связанные с частотой питающей сети (сетевые наводки). В связи с этим важной задачей является правильная фильтрация измерительного сигнала, а также выбор нужного алгоритма и параметров работы регулятора.

Для фильтрации сигналов используются фильтры низкой частоты высокого порядка (5 - 7-й порядки), имеющие большую крутизну спада. Такие ФНЧ иногда встраиваются в нормирующие преобразователи. Кроме этого, для подавления сетевых наводок (50 Гц в России, 60 Гц в США) используют т.н. фильтр-пробку или заграждающий фильтр. Следует учитывать, что заграждающий фильтр рекомендуется применять только для быстродействующих систем, т.е. систем, полоса пропускания которых более 50 Гц.

Таким образом, главной задачей регулятора является компенсация низкочастотных возмущений. При этом, с целью получения минимальной дисперсии ошибки регулирования, высокочастотные помехи должны быть отфильтрованы.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
---------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист 60

Однако, в общем случае, эта задача противоречивая, т.к. спектры возмущения и шума могут накладываться друг на друга. Это противоречие разрешается с помощью теории оптимального стохастического управления, которая позволяет добиться хорошего быстродействия в системе при минимально возможной дисперсии ошибки регулирования.

Для уменьшения влияния помех в практических ситуациях применяются два способа, основанных на:

- 1) уменьшении коэффициента усиления регулятора , т.е., фактически, переход на интегральный закон регулирования, который малочувствителен к шумам;
- 2) фильтрации измеряемого сигнала.

Так, например, в пневматической системе "СТАРТ" существует специальный прибор ПФ 3.1 (прибор функциональный), называемый блоком обратного предварения, который, фактически является настраиваемым фильтром низкой частоты. Постоянная времени прибора ПФ 3.1 изменяется в диапазоне от 3 секунд до 10 минут. Передаточная функция такого фильтра имеет вид:

Постоянная времени настраивается в зависимости от спектра помех. По данным одной из работ, применение блока обратного предварения позволило увеличить в 6 раз при сохранении прежней дисперсии ошибки регулирования и сохранении устойчивой работе системы.

В общем случае, для многомерных систем, задача оптимальной фильтрации решается с помощью фильтра Калмана. Этот фильтр, наряду с получением оценок вектора состояния объекта, обеспечивает минимальную дисперсию всех его компонентов. Однако, для расчета параметров фильтра, необходимо знание статистических характеристик шумов, что в реальных условиях затруднено. Несмотря на это, в современных бортовых системах управления используются специальные измерители статистических характеристик помех, что позволяет использовать и непрерывно уточнять параметры фильтра Калмана.

В общем случае, с целью снижения уровня помех, необходимо также правильно выбирать места установки датчиков и применять экранирование измерительных линий.

#### 7.4 Способы увеличения точности регулирования двухпозиционных регуляторов

Как указывалось в разделах 3.1-3.3 - процесс позиционного (релейного) регулирования представляет собой колебания вокруг заданной точки (см. рис. 3.4, 3.13, 3.17). Частота и амплитуда определяются величинами времени транспортного запаздывания  $\tau_d$ , максимальной скорости  $R$  изменения параметра, постоянной времени объекта  $T$ , зоны нечувствительности  $DB$ .

Для улучшения процесса позиционного регулирования, т.е. для уменьшения отклонений регулируемого параметра  $PV$  от заданной точки  $SP$  необходимо уменьшать транспортное запаздывание  $\tau_d$  и инерционность  $T$  системы регулирования. Это можно сделать, изменив конструкцию объекта регулирования или соответствующим образом разместив датчик, например, вблизи нагревателя.

При прочих равных условиях, чем больше  $PV_{max}$  – максимально возможное значение регулируемой величины, тем больше колебания в позиционных регуляторах. Это значение следует установить по возможности равным верхней границе диапазона регулирования.

Эти же рассуждения также относятся и к нижней границе диапазона. Т.е. установив постоянный нагреватель и подключив подогреватель к регулятору можно существенно улучшить характеристики  $CAV$ . Если, тем не менее, требуется широкий диапазон регулирования, можно применить четырехпозиционный регулятор, подключив к нему два элемента, один из которых в два раза мощнее другого.

Инд. № докум.	Подп. и дата
Взамен инв. №	Подп. и дата
Инд. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
						61

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДСТУ 3626-97. Базові програмно-технічні комплекси локального рівня для розосереджених автоматизованих систем керування технологічними процесами. Загальні вимоги.
2. ГОСТ 23222-88. Характеристики точности выполнения предписанной функции средств автоматизации. Требования к нормированию. Общие методы контроля.
3. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины: Справочник /Под ред. Кошарского Б.Д. -Изд. 3-е. -Л.: Машиностроение, 1976. -486 с.
4. Аязян Г.К. Расчет автоматических систем с типовыми алгоритмами регулирования: Учеб. пособ. - Уфа.: Изд-во УНИ, 1986. -135 с.
5. Бесекецкий В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1975.
6. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности: Учебник. -М.: Химия, 1985. -352 с.
7. Дадаян Л.Г. Автоматизация технологических процессов: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. -Уфа.: Изд-во УНИ, 1985. - 225 с.
8. Клиначев Н. В. Теория систем автоматического регулирования и управления: Учебно-методический комплекс. - Offline версия. - [http://visim.nm.ru/tau\\_lect.html](http://visim.nm.ru/tau_lect.html), - Челябинск, 2003.
9. Мазуров В.М. Курс лекций. Кафедра АТМ. Тульский Государственный университет.
10. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических производств. Учеб. пособ. -М.: Химия, 1982. - 296 с.
11. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / В.Я.Баранов, Т.Х.Безновская, В.А.Бек и др.; Под общ. Ред. В.В.Черенкова. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние.- 847с., ил.
12. Ротач В.Я. Автоматизация настройки систем управления. -М.: Энергоиздат, 1984.
13. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. -М.: Энергоиздат, 1984.
14. Рубашкин А.С. Методика наладки систем автоматического регулирования прямоточных котлов.
15. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления/ Под редакцией В.А.Бесекецкого. - М.: Наука, 1978.
16. Стефани Е.П. Основы построения АСУ ТП: Учеб. пособ. -М.: Энергоиздат, 1982. -352 с.
17. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов. -М.: Энергоиздат, 1982.
18. Теория автоматического управления: Учебник. В 2-х частях / Под ред. А.А.Воронова. -М.: Высш.шк., 1986. -Ч.1. - 367 с. - Ч.2. -504 с.
19. Шафрановский В.А. Справочник наладчика автоматики котельных установок.- Симферополь: Таврия, 1987.- 176с.
20. Abdul Aziz Ishak, Muhammed Azlan Hussain. "Reformulation of the Tangent Method for PID Controller Tuning". Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering, Universiti Malaya. 50603 Kuala Lumpur, Malaysia. <http://aabi.tripod.com>
21. "Basics of Proportional-Integral-Derivative Control", Control Engineering, March 1998.
22. "Comparison of PID Control Algorithms", ExperTune, Inc., <http://www.expertune.com/artCE87.html>.
23. John G. Ziegler and Nathaniel B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, Nov. 1942, pp. 759-768.
24. John A. Shaw, "PID Algorithms and Tuning Methods. Process Control Solutions", Rochester, New York. 585-234-5864, <http://www.jashaw.com/pid/tutorial/index.html>, 2001.
25. Thomas B. Kinney, "Tuning Process Controllers", Process Automation Series, Foxboro-McGraw-Hill, Inc., 1985, pp. 19-24.
26. Vance VanDoren, "Ziegler-Nichols Methods Facilitate Loop Tuning", Control Engineering Online, Sept. 1998, <http://www.controleng.com>.

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата	ПРМК.420000.001 И1	Лист
Изн.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

### Лист регистрации изменений

Изменение	Номера листов			Всего листов в документе	№ документа	Входящий № сопровождающего документа и дата	Подпись	Дата
	Измененных	Замененных	Новых					

Изн. № докум.	Подп. и дата	Взамен инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПРМК.420000.001 И1