

# Техника автоматического регулирования для практиков

Манфред Шляйхер





# **Техника автоматического регулирования для практиков**

*Манфред Шляйхер*



## **Предисловие и некоторые замечания по содержанию настоящей брошюры**

Техника автоматического регулирования освещается в целом ряде книг и статей, которые зачастую содержат слишком много теории и поэтому труднопонятны. Настоящая брошюра позволяет сотрудникам, занимающимся планированием, вводом в эксплуатацию и обслуживанием установок, освоить практические основы техники автоматического регулирования.

Читатель должен обладать техническим образованием или пройти предварительную подготовку.

Все разъяснения ориентированы на практику и подкреплены примерами. Мы не пользуемся методами высшей математики, вместо этого мы прибегаем к эмпирическим формулам и стараемся сообщить интуитивное понимание техники автоматического регулирования. Даже в тех случаях, когда детально обсуждается техника фирмы JUMO (глава 1 и 7), большинство разъяснений остается в силе.

## **Чтобы облегчить вам ориентацию, мы приводим здесь краткую информацию о разделах настоящей книги:**

В **главе 1** мы рассматриваем основные общие принципы техники автоматического регулирования. После сведений о замкнутом контуре регулирования и переходном процессе при регулировании, мы описываем различное оборудование.

**Глава 2** описывает различные объекты регулирования и рассказывает о том, как можно характеризовать объект.

После чтения **главы 3** читатель должен в принципе уметь обращаться с параметрами ПИД-регулятора ( $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$ ).

В **главе 4** мы описываем различные процедуры оптимизации и указываем структуры регуляторов, которые могут использоваться для различных регулируемых величин.

Сведения о принципе работы и конфигурировании двухточечных, трехточечных, трехточечных ступенчатых и позиционных регуляторов даны в **главе 5**.

**Глава 6** рассматривает специальные схемы включения регуляторов – такие, как, например, каскадное регулирование, – которые обладают различными функциональными или коммерческими преимуществами.

Регуляторы фирмы JUMO включают дальнейшие функции, так, например, в **главе 7** описаны самооптимизация или программирование регулятора.

## **Семинары по технике автоматического регулирования**

На момент издания данной брошюры по этой тематике проводятся три различных семинара. В качестве рабочего материала для обучения, ориентированного на практику, мы используем настоящую брошюру. Помимо изучения теории, участники имеют возможность проводить по отдельным главам практические занятия с объектами регулирования.

Дальнейшие сведения вы можете получить на нашем сайте [www.jumo.net](http://www.jumo.net) в разделе Support, а также вы можете просто позвонить нам.

Мы желаем вам приятного чтения данной брошюры и надеемся, что из нее вы получите все необходимые вам сведения. Мы с радостью рассмотрим ваши замечания.

Фульда, февраль 2006 г.

Манфред Шляйхер

Примечание:

Данная брошюра была составлена максимально добросовестно. Мы не берем на себя ответственности за возможные ошибки. В любом случае, авторитетными источниками являются инструкции по эксплуатации соответствующих устройств.



**JUMO GmbH**

Marksistskaya, 34/8

109147 Moskau

RUSSISCHE FÖDERATION

Телефон: +7 495 961 32 44

Факс: +7 495 911 01 86

E-mail: [jumo@jumo.ru](mailto:jumo@jumo.ru)

Internet: [www.jumo.ru](http://www.jumo.ru)

Перепечатка с указанием первоисточника разрешена!

Номер компонента: 00495055

Номер книги: FAS525

Отпечатано: 02.06

<b>1</b>	<b>Основные понятия .....</b>	<b>9</b>
1.1	Замкнутый контур регулирования .....	9
1.2	Переходной процесс при регулировании .....	11
1.3	Измерение фактического значения / датчики и преобразователи .....	11
1.3.1	Период дискретизации .....	14
1.4	Типы выходов регуляторов .....	14
1.5	Исполнительные элементы.....	15
1.5.1	Исполнительные элементы для двоичного управления.....	15
1.5.2	Исполнительные элементы для непрерывного управления .....	17
1.6	Типы регуляторов .....	19
1.7	Компактные регуляторы фирмы JUMO.....	19
<b>2</b>	<b>Объект регулирования .....</b>	<b>21</b>
2.1	Общие сведения об объектах регулирования.....	21
2.2	Объекты с выравнением и без выравнения.....	22
2.2.1	Объекты с выравнением .....	22
2.2.2	Объекты без выравнения.....	23
2.3	Объекты (звенья) статические, с запаздыванием и задержками .....	25
2.3.1	Статические объекты регулирования .....	25
2.3.2	Объекты с запаздыванием: $PT_t$ –объекты .....	26
2.3.3	Объекты с задержкой: $PT_H$ -объекты .....	28
2.4	Регистрация переходной характеристики для объектов с не менее чем двумя задержками и запаздыванием .....	32
<b>3</b>	<b>Регуляторы непрерывного действия .....</b>	<b>35</b>
3.1	П-регулятор.....	35
3.1.1	Зона пропорционального регулирования.....	36
3.2	И-регулятор.....	40
3.3	ПИ-регулятор .....	43
3.4	ПД-регулятор .....	46
3.4.1	Практическая дифференциальная составляющая – $DT_1$ -элемент.....	51
3.5	ПИД-регулятор.....	53
3.5.1	Блок-схема ПИД-регулятора.....	54
<b>4</b>	<b>Замкнутый контур регулирования / оптимизация.....</b>	<b>56</b>
4.1	Поведение при задающем / возмущающем воздействии.....	56
4.2	Устойчивое и неустойчивое поведение при регулировании.....	57
4.3	Методы оптимизации.....	58
4.3.1	Метод незатухающих колебаний по Циглеру и Николсу .....	58
4.3.2	Метод переходной характеристики по Чину, Хронесу и Ресвику .....	59

---

# Содержание

---

4.3.3	Метод скорости нарастания.....	61
4.3.4	Эмпирический метод определения параметров регулирования.....	62
4.3.5	Контроль настройки регулятора для ПИД-структуры.....	64
<b>4.4</b>	<b>Какая структура регулятора используется для различных регулируемых величин? .....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>Регуляторы дискретного действия .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1</b>	<b>Дискретные и квази-непрерывные регуляторы.....</b>	<b>68</b>
<b>5.2</b>	<b>Дискретный двухточечный регулятор .....</b>	<b>69</b>
5.2.1	Дискретный двухточечный регулятор с объектом 1-го порядка .....	70
5.2.2	Дискретный двухточечный регулятор с объектом высшего порядка .....	71
<b>5.3</b>	<b>Квази-непрерывный двухточечный регулятор: пропорциональный регулятор.....</b>	<b>72</b>
5.3.1	Поведение интегральной и дифференциальной составляющих квази-непрерывного двухточечного регулятора.....	74
<b>5.4</b>	<b>Трехточечный регулятор .....</b>	<b>76</b>
5.4.1	Дискретный трехточечный регулятор .....	77
5.4.2	Квази-непрерывный трехточечный регулятор .....	78
5.4.3	Поведение интегральной и дифференциальной составляющих квази-непрерывного трехточечного регулятора.....	79
<b>5.5</b>	<b>Регуляторы для управления исполнительными элементами с серводвигателями .....</b>	<b>80</b>
5.5.1	Трехточечный ступенчатый регулятор .....	80
5.5.2	Позиционный регулятор .....	84
<b>6</b>	<b>Схемы для улучшения качества регулирования.....</b>	<b>86</b>
<b>6.1</b>	<b>Базовая нагрузка .....</b>	<b>86</b>
<b>6.2</b>	<b>Режим разделения диапазона .....</b>	<b>87</b>
<b>6.3</b>	<b>Поддержание возмущения на постоянном уровне .....</b>	<b>88</b>
<b>6.4</b>	<b>Аддитивное и мультипликативное наложение возмущения .....</b>	<b>89</b>
6.4.1	Аддитивное наложение возмущения .....	89
6.4.2	Мультипликативное наложение возмущения .....	91
<b>6.5</b>	<b>Грубое / точное регулирование .....</b>	<b>93</b>
<b>6.6</b>	<b>Каскадное регулирование.....</b>	<b>94</b>
<b>6.7</b>	<b>Регулирование пропорции.....</b>	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>Специальные функции регуляторов .....</b>	<b>99</b>
<b>7.1</b>	<b>Самооптимизация.....</b>	<b>99</b>
7.1.1	Метод незатухающих колебаний.....	99
7.1.2	Метод переходной характеристики.....	101
7.1.3	Дальнейшие сведения о методах оптимизации .....	102
<b>7.2</b>	<b>Startup и телесервис / диагностика .....</b>	<b>104</b>
<b>7.3</b>	<b>Функция регистрации.....</b>	<b>106</b>

---



## Содержание

---

7.4	Функция рампы .....	108
7.5	Программный регулятор .....	109
7.6	Предельные компараторы.....	110
7.7	Двоичные функции .....	111
7.8	Ручной режим .....	111
7.9	Ограничение управляющего сигнала .....	112
7.10	Пользовательская линейаризация.....	113
7.11	Измерение влажности.....	114
7.12	Интерфейсы.....	115
	Приложение: Использованные сокращения .....	117
	Указатель .....	119

---

# Содержание

---

## 1 Основные понятия

Настоящая глава вводит основные понятия техники автоматического регулирования и описывает различные компоненты. Мы начинаем с замкнутого контура регулирования и даем определение переходного процесса. Далее мы описываем различную сенсорную технику, исполнительные элементы и регуляторы, отчасти на примерах компонентов, производимых фирмой JUMO.

### 1.1 Замкнутый контур регулирования

Замкнутый контур регулирования состоит из объекта регулирования, регулятора и исполнительного элемента:

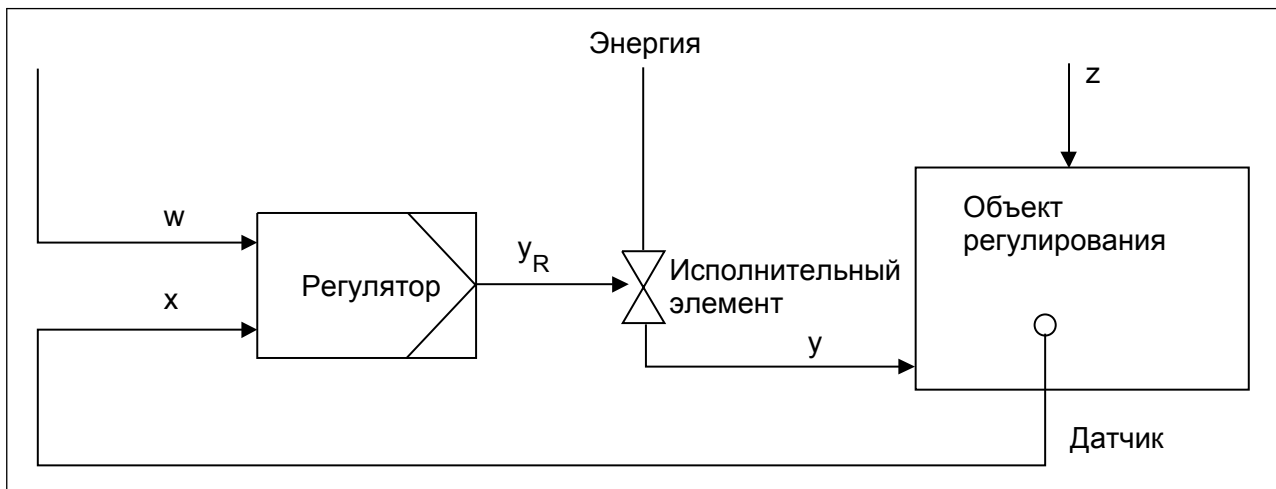


Рисунок 1: Замкнутый контур регулирования

На Рисунке 1 показан пример замкнутого контура регулирования: печь, работающая на газе.

#### Объект регулирования

Объект регулирования является той частью установки, где необходимо поддерживать **регулируемую величину (x)** на постоянном уровне. В нашем примере регулируемая, или фактическая величина – это температура; ее значение измеряется термометром сопротивления или термоэлементом и подается на вход регулятора.

В контуре регулирования можно влиять на фактическое значение при помощи **управляющего воздействия (y)**. Управляющее воздействие является энергией и в нашем примере оно представлено потоком газа.

#### Исполнительный элемент

В большинстве случаев регулятор не может непосредственно задавать управляющее воздействие, поэтому используются исполнительные элементы. Регулятор управляет исполнительными элементами посредством **управляющего сигнала  $y_R$** . В нашем примере в качестве исполнительного элемента используется газовый клапан.

Если регулятор выдает управляющий сигнал 100 %, то на объект управления подается максимальное количество газа. Аналогично, при управляющем сигнале 50 % в объект подается вдвое меньшее количество газа.

# 1 Основные понятия

## Регулятор

При помощи управляющего сигнала (в нашем примере лежащего в диапазоне 0 ... 100 %) регулятор добивается равенства фактического значения установленному в регуляторе **заданному значению ( $w$ )**. Разность между заданным и фактическим значением ( $w - x$ ) называется **рассогласованием регулируемой величины ( $e$ )**.

Изменения **возмущающего воздействия  $z$**  приводят к нежелательным изменениям регулируемой величины. Дальнейшие сведения о возмущениях вы найдете в главе 2 «Объект управления».

Из предыдущего обсуждения следует, что необходимо проводить различие между управляющим (выходным) сигналом регулятора и управляющим воздействием (энергией, подаваемой в объект управления). Для специалиста по автоматическому регулированию важно, какой процент энергии подается в управляемый процесс. Поэтому для него решающей величиной является управляющий сигнал  $u_R$ .

На Рисунке 2 показано изображение на экране регулятора JUMO IMAGO 500. Здесь выводятся важнейшие величины:

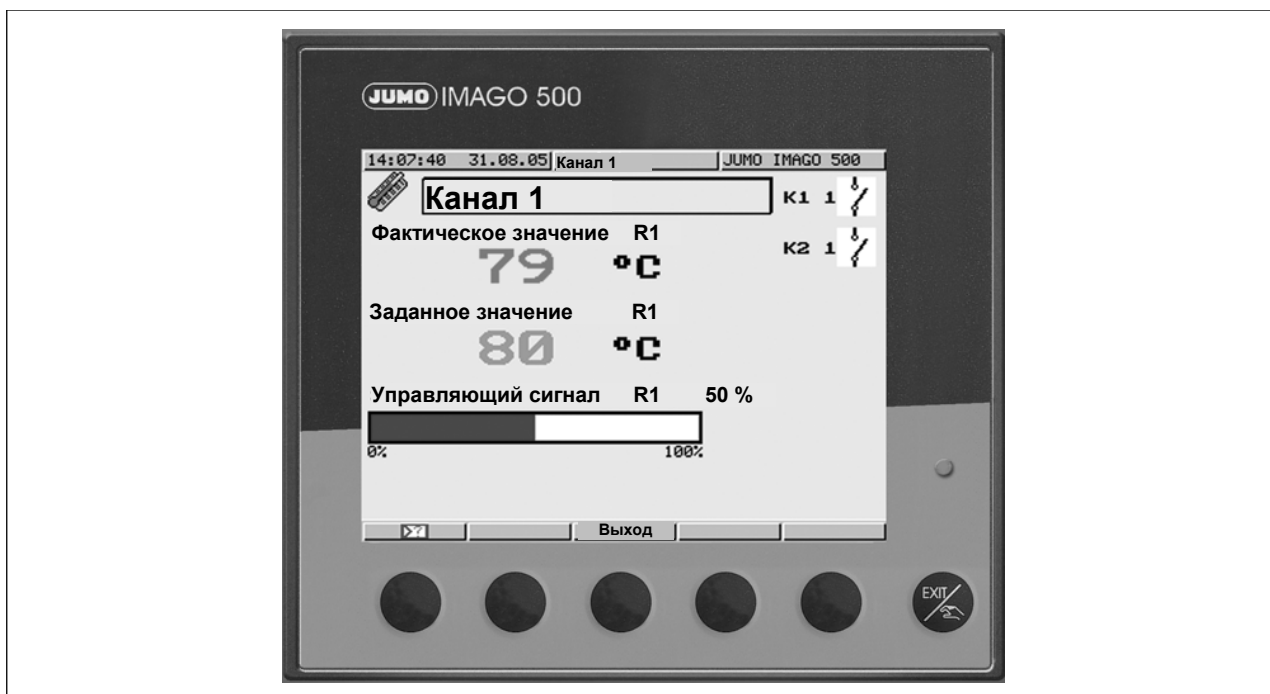


Рисунок 2: Изображение на экране регулятора JUMO IMAGO 500

В данной главе были введены некоторые величины, используемые в технике автоматического регулирования, и их краткие обозначения. Далее, большинство используемых в данной книге обозначений с кратким пояснением приведено в разделе «Приложение: используемые обозначения».

## 1.2 Переходной процесс при регулировании

Для регулятора следует определить параметры его переходного процесса. Какого результата следует ожидать от регулятора в замкнутом контуре, если, например, происходит переключение к новому заданному значению?

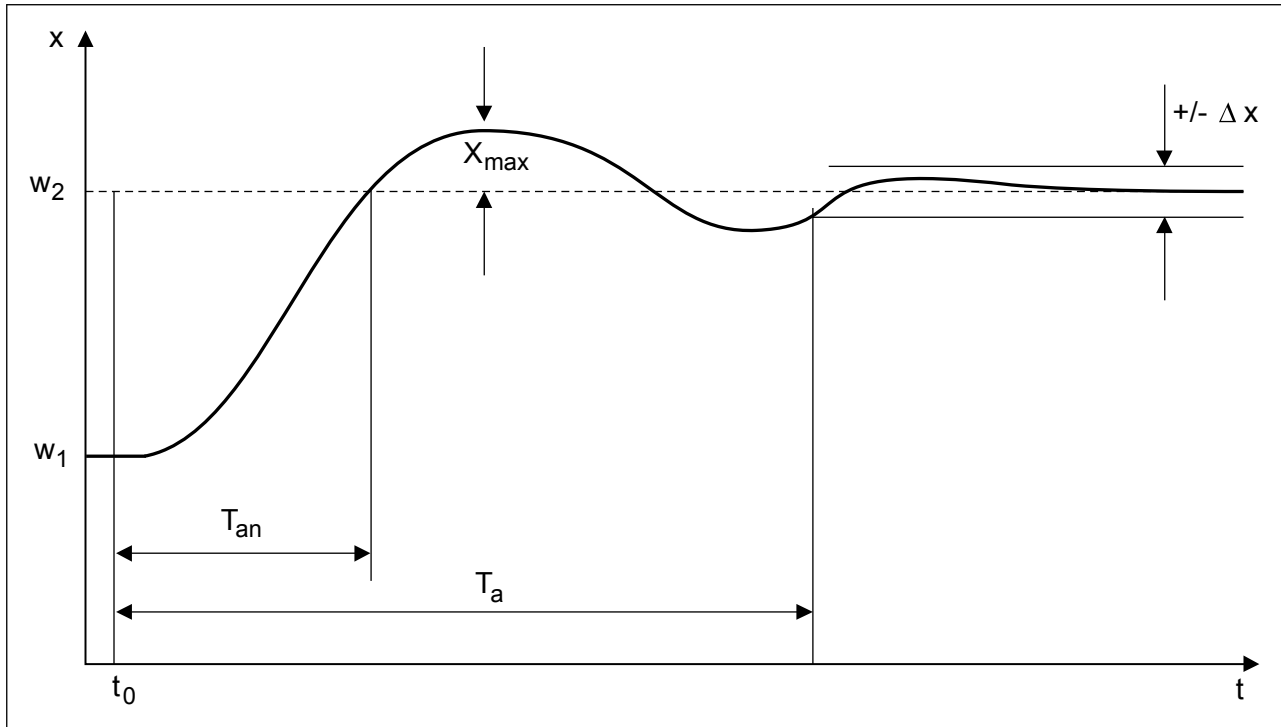


Рисунок 3: Критерии переходного процесса

Пройдет некоторое время, пока фактическое значение не станет постоянно находиться в некотором интервале вокруг заданного значения ( $\pm \Delta x$ ). Это время называется временем переходного процесса ( $T_a$ ). Сколь широк предписанный интервал, зависит от требований к системе управления.

Если при переходе к новому заданному значению происходит перерегулирование, то максимальное отклонение фактического значения от заданного называется пиком перерегулирования ( $X_{max}$ ). Время, в течение которого фактическое значение впервые достигает заданного, называется временем регулирования ( $T_{an}$ ).

В данной книге мы будем рассматривать исключительно пик перерегулирования и время переходного процесса. Здесь будет уместно заметить, что контур регулирования работает тем лучше, чем меньше величины  $T_a$  и  $X_{max}$ .

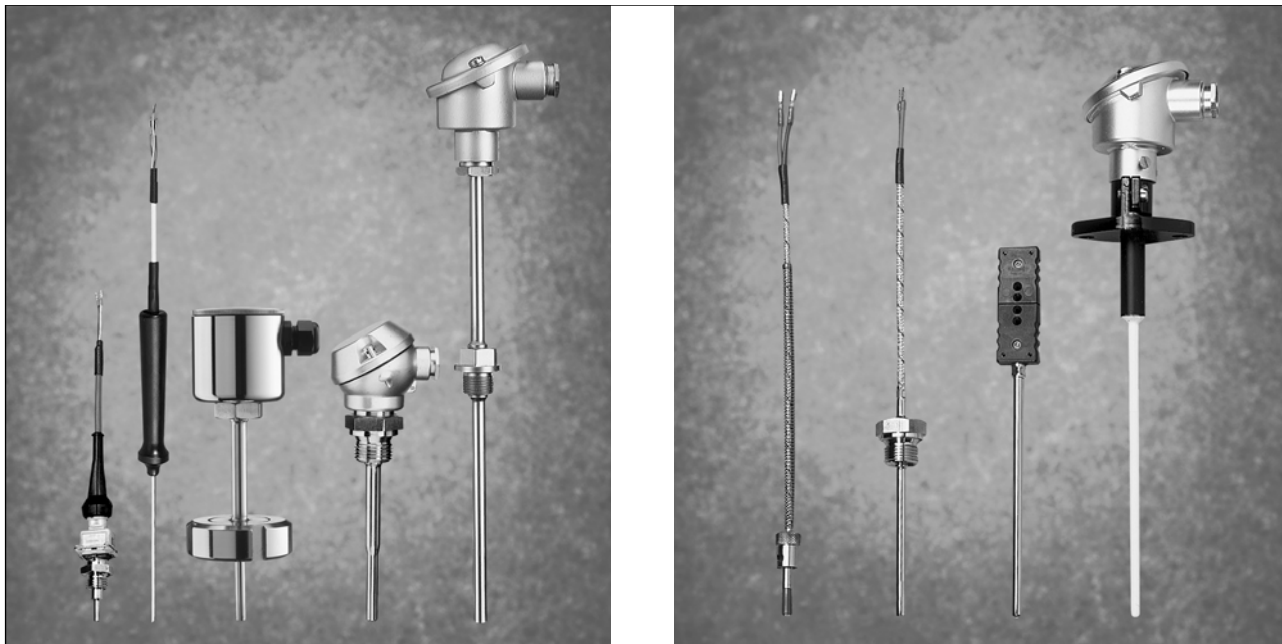
## 1.3 Измерение фактического значения / датчики и преобразователи

Для электрического измерения температуры очень часто применяют термометры сопротивления (например, Pt 100). Они обладают сопротивлением, зависящим от температуры, и их характеристики известны. Вход регулятора, используемый для подключения термометра сопротивления, следует программным образом настроить и активировать подходящую характеристику. В регуляторах фирмы JUMO хранятся характеристики различных термометров сопротивления.

Если характеристика термометра активирована, регулятор преобразует измеренную величину сопротивления в соответствующую ей температуру.

# 1 Основные понятия

Кроме этого, прежде всего, для высоких температур, находят применение термоэлементы, которые выдают напряжение, растущее при увеличении температуры. Здесь также линейаризация производится при помощи регулятора.



**Рисунок 4: Термометры сопротивления и термоэлементы фирмы JUMO**

При больших расстояниях между датчиком и регулятором применяются измерительные преобразователи. Они преобразуют измерения термометра сопротивления / термоэлемента, подключенного к их входу, в линейаризованный выходной сигнал (например, 4...20 мА). В регуляторе остается лишь масштабировать этот сигнал в соответствии с заданными верхним и нижним пределами измеряемой величины:



**Рисунок 5: Измерительно-преобразовательная головка JUMO dTRANS T01 для подключения к термометрам сопротивления или термоэлементам**



**Рисунок 6: Четырехпроводной измерительный преобразователь JUMO dTRANS T02 LCD с дисплеем**

Кроме этого, фирма JUMO предлагает различные исполнения измерительных преобразователей, которые выдают уже линейаризованный сигнал.



**Рисунок 7: Измерительные преобразователи JUMO MIDAS и dTRANS p02**

В заключение необходимо упомянуть, что фирма JUMO производит множество датчиков и преобразователей для измерения аналитических величин (уровень pH, окислительно-восстановительный потенциал, проводимость, растворенный кислород и т.д.)

# 1 Основные понятия



Рисунок 8: Индуктивный измерительный преобразователь проводимости JUMO CTI-500 и одностержневая измерительная цепь JUMO tecLine pH

## 1.3.1 Период дискретизации

Работа названных измерительных преобразователей основана на использовании микропроцессоров, которым требуется время на вычисления. Измеряемое значение регистрируется датчиком и после внутренней обработки выдается как аналоговая величина. После обновления состояния выхода снова происходит измерение входного сигнала. Время между считываниями входного сигнала называется периодом дискретизации.

Период дискретизации важен для регуляторов, в особенности, при обработке фактического значения. В этом случае период дискретизации равен времени считывания входного сигнала, вычисления и выдачи управляющего сигнала до нового считывания.

Типичные периоды дискретизации у регуляторов фирмы JUMO лежат в диапазоне 50...250 мс. Для большинства применений в технике управления процессов достаточно уже 250 мс. Для быстрых процессов (например, в технике измерения давления) регулятор должен работать с очень малым периодом дискретизации.

## 1.4 Типы выходов регуляторов

При регулировании температуры в качестве выходов часто применяются **реле**. Управляющие контакты чаще всего бывают выполнены как переключающие, но иногда также и как замыкающие контакты. Регулятор управляет, например, силовым контактором, который направляет энергию в процесс.

Чтобы добиться удовлетворительного результата для относительно быстрых объектов, где регулируется температура, двоичный выход должен переключаться достаточно часто. Механический узел будет в этом случае довольно быстро изнашиваться. По этой причине JUMO поставляет регуляторы с **выходами на полупроводниковыми реле и логическими выходами** для коммутации, например, ~230 В или =24 В.

В случае быстрых объектов регулирования (давление, расход жидкости, скорость вращения и т.д.) чаще всего оказывается невозможным применять управление при помощи двоичного сигнала – это привело бы к колебаниям регулируемой величины. Для таких применений регуляторы можно оснастить **непрерывными выходами**, которые могут на выбор выдавать



сигналы по току или по напряжению.

## 1.5 Исполнительные элементы

В большинстве случаев регулятор не формирует непосредственно управляющее воздействие на объект управления, вместо этого он при помощи своего выходного сигнала управляет исполнительным элементом. Исполнительный элемент обеспечивает подачу энергии для процесса пропорционально управляющему сигналу. Рассмотрим некоторые важные типы исполнительных элементов:

### 1.5.1 Исполнительные элементы для двоичного управления

Простейший исполнительный элемент, управляемый двоичным выходным сигналом регулятора ( $=24\text{ В}$ ,  $\sim 230\text{ В}$  и т.д.), – это **силовой контактор**. Если регулятор замыкает свой контакт, контактор срабатывает, и электрическая энергия начинает подаваться на объект управления. Силовые контакторы подходят для медленных процессов, не требующих высокой частоты переключений.

Если для более быстрых объектов переключения должны производиться чаще, то необходимо применять электронные переключатели. Примером являются **тиристорные силовые переключатели**. Их управляющие напряжения (как, например, у показанной здесь серии ТУА) лежат в диапазоне  $4\text{...}32\text{ В}$ , при этом они могут коммутировать напряжения до  $660\text{ В}_{\text{эфф}}$ .

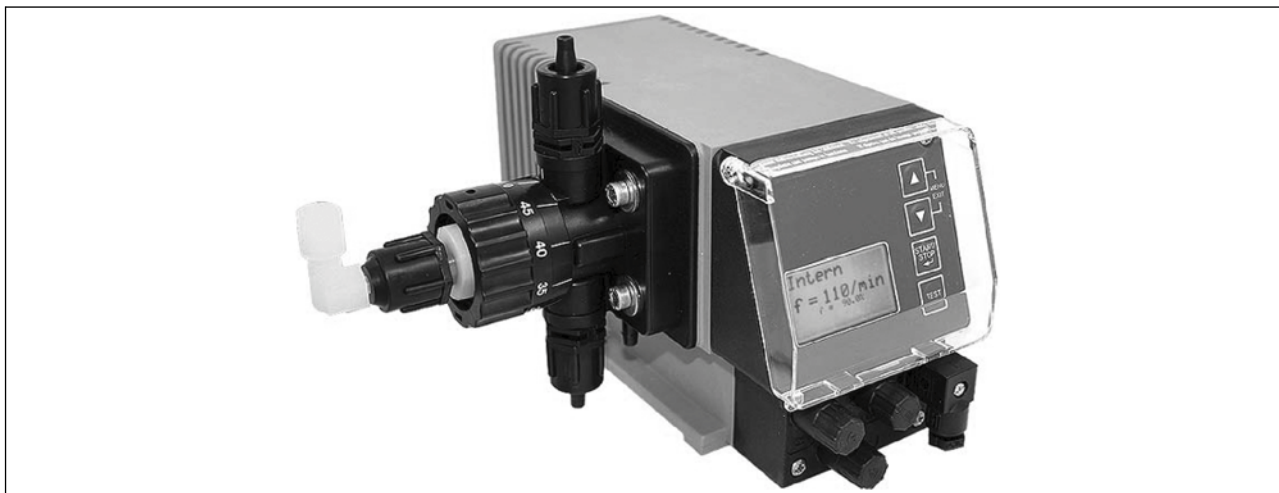
Переключения производятся без механических деталей. В силу этого можно выбрать очень высокую частоту переключений. Необходимо учитывать, что, с одной стороны, переключатель в открытом состоянии обладает определенной мощностью потерь, а, с другой стороны, нагрузка, даже если переключатель закрыт, не будет полностью обесточена (существуют токи утечки).



Рисунок 9: Тиристорный силовой переключатель серии ТУА фирмы JUMO

# 1 Основные понятия

Для техники аналитических измерений часто применяются **дозировочные насосы**. Эти исполнительные элементы ожидают импульсов на входе. С каждым импульсом насос выдает определенное количество жидкости. Увеличение управляющего сигнала регулятора соответствует повышению частоты импульсов на его выходе. Фирма JUMO поставляет регуляторы для применения с дозировочными насосами.

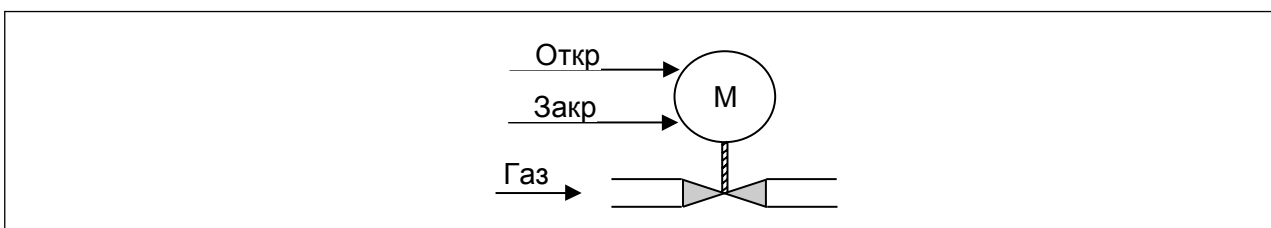


**Рисунок 10: Дозировочный насос**

**Магнитные клапаны**, по сигналу регулятора, либо полностью открываются, либо, в состоянии покоя, закрываются.

**Исполнительные элементы с сервомоторами** управляются двумя реле регулятора. В течение времени, когда реле 1 подает напряжение в соответствующую цепь, исполнительный элемент (на Рисунке 11 – клапан) постепенно открывается. Аналогично, реле 2 закрывает исполнительный элемент. Преимущество этого исполнительного элемента: при имеющемся сервомоторе он может быть легко оборудован собственно исполнительным элементом (клапан, задвижка, заслонка и т.д.). Монтаж выполняется достаточно просто. Даже если исполнительный элемент с сервомотором управляется двоичным сигналом, он формирует непрерывное управляющее воздействие.

Дальнейшие сведения об этих исполнительных элементах и соответствующих регуляторах вы найдете в главе 5.5.1 «Трехточечный регулятор» и главе 5.5.2 «Позиционный регулятор».



**Рисунок 11: Схематическое изображение исполнительного элемента с сервомотором, состоящего из сервомотора и клапана в качестве исполнительного элемента**

# 1 Основные понятия

## 1.5.2 Исполнительные элементы для непрерывного управления

Во многих приложениях управляющее воздействие должно быть непрерывным. Причиной является то, что у очень быстрых объектов управления при двоичном управлении фактическое значение оказывается неустойчивым.

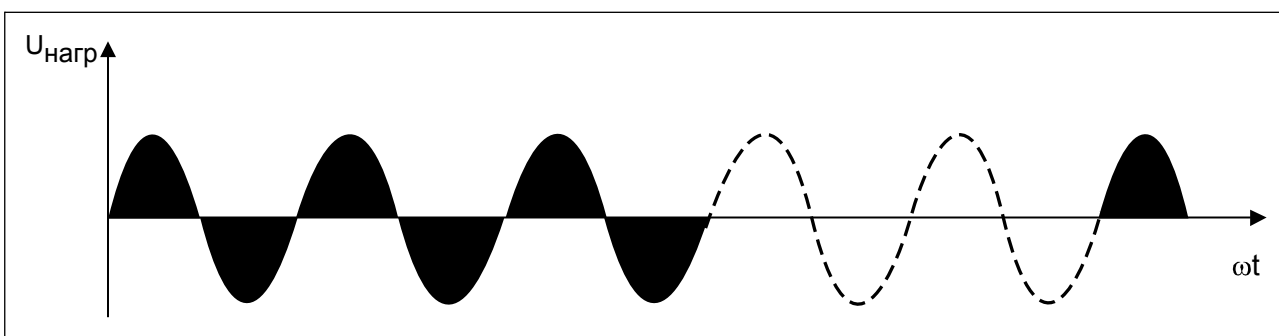
Для непрерывного управления при помощи электрической энергии фирма JUMO предлагает два типа (квази-)непрерывных исполнительных элементов:



**Рисунок 12:** Тиристорный силовой исполнительный элемент и силовой преобразователь на биполярных транзисторах с изолированным затвором с амплитудным регулированием

На тиристорный силовой исполнительный элемент, помимо сетевого напряжения, подается управляющий сигнал регулятора. Упрощенно его можно представить как быстрый переключатель, относительная длительность включения которого пропорциональна управляющему сигналу регулятора.

Тиристорный силовой исполнительный элемент может работать в двух режимах: В импульсно-групповом режиме он подает на нагрузку определенное количество периодов сетевого напряжения, а остальные перекрывает (Рисунок 13):

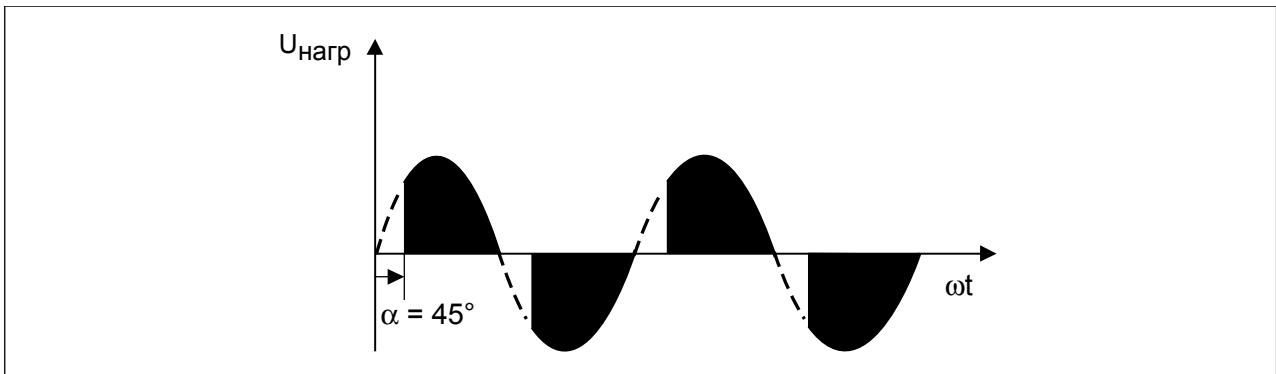


**Рисунок 13:** Выходной сигнал тиристорного силового исполнительного элемента в импульсно-групповом режиме при управляющем сигнале 60 %.

Время включения и выключения настолько мало, что для многих объектов управление может рассматриваться как непрерывное.

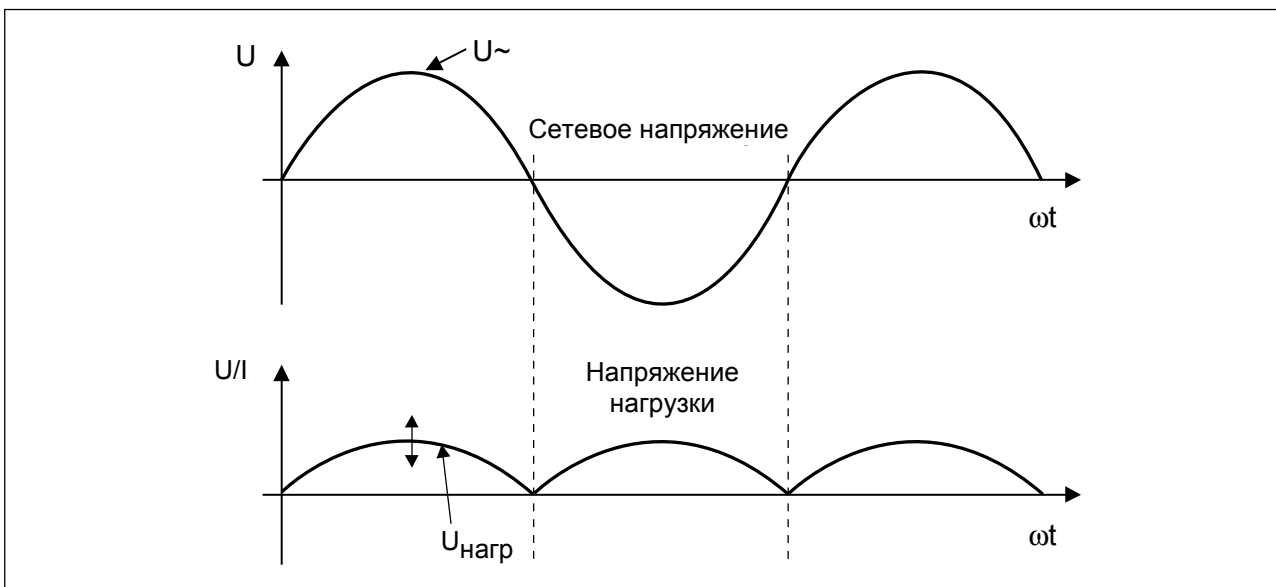
# 1 Основные понятия

Для более быстрых объектов (например, для регулировки силы света) тиристорный силовой исполнительный элемент можно включить в режиме фазовой отсечки: В этом случае он подает определенную часть полупериодов на нагрузку и при большем управляющем сигнале уменьшает угол отсечки  $\alpha$  (рисунок 14).



**Рисунок 14:** Выходной сигнал тиристорного силового исполнительного элемента в режиме фазовой отсечки

**Силовой преобразователь на биполярных транзисторах с изолированным затвором**, по сравнению с тиристорным исполнительным элементом, является настоящим непрерывным исполнительным элементом. Он варьирует амплитуду своего выходного напряжения пропорционально управляющему воздействию, задаваемому регулятором.



**Рисунок 15:** Амплитудное регулирование в случае силового преобразования на биполярном транзисторе с изолированным затвором

Для непрерывного управления потоками газов или жидкостей имеются **пропорциональные клапаны**. Они открываются пропорционально управляющему сигналу (например, 4...20 мА).

## 1.6 Типы регуляторов

Описанные исполнительные элементы требуют определенных типов регуляторов, которые будут представлены ниже:

**Регуляторы непрерывного действия** выдают непрерывный выходной сигнала (обычно 0/4... 20 мА или 0/2... 10 В). Их управляющий сигнал может находиться в диапазоне 0...100 %, при этом выходной сигнал пропорционален управляющему сигналу.

**Двухточечные регуляторы** оснащены коммутирующим или двоичным выходом. Хотя такой регулятор направляет в нагрузку либо полную, либо нулевую мощность, здесь также может выдаваться управляющий сигнал 0...100%. В этом случае регуляторы варьируют относительную длительность включения выходов пропорционально управляющему сигналу.

**Трехточечные регуляторы** можно представить как два отдельных двухточечных регулятора: Первый регулятор управляет, например, нагревом посредством одного выхода, а второй регулятор включает охлаждение при помощи второго выхода.

**Трехточечные шаговые и позиционные регуляторы** лучше всего подходят для управления исполнительными элементами с сервомоторами. Два выхода регулятора посредством сервомотора управляют открыванием и закрывание исполнительного элемента.

## 1.7 Компактные регуляторы фирмы JUMO

Фирма JUMO поставяет четыре основных серии компактных регуляторов и, кроме этого, специализированные приборы для различных отраслей. В качестве иллюстрации рассмотрим здесь некоторые свойства наиболее дешевого регулятора (серия iTRON) и регулятора с наибольшим набором функций (IMAGO 500).

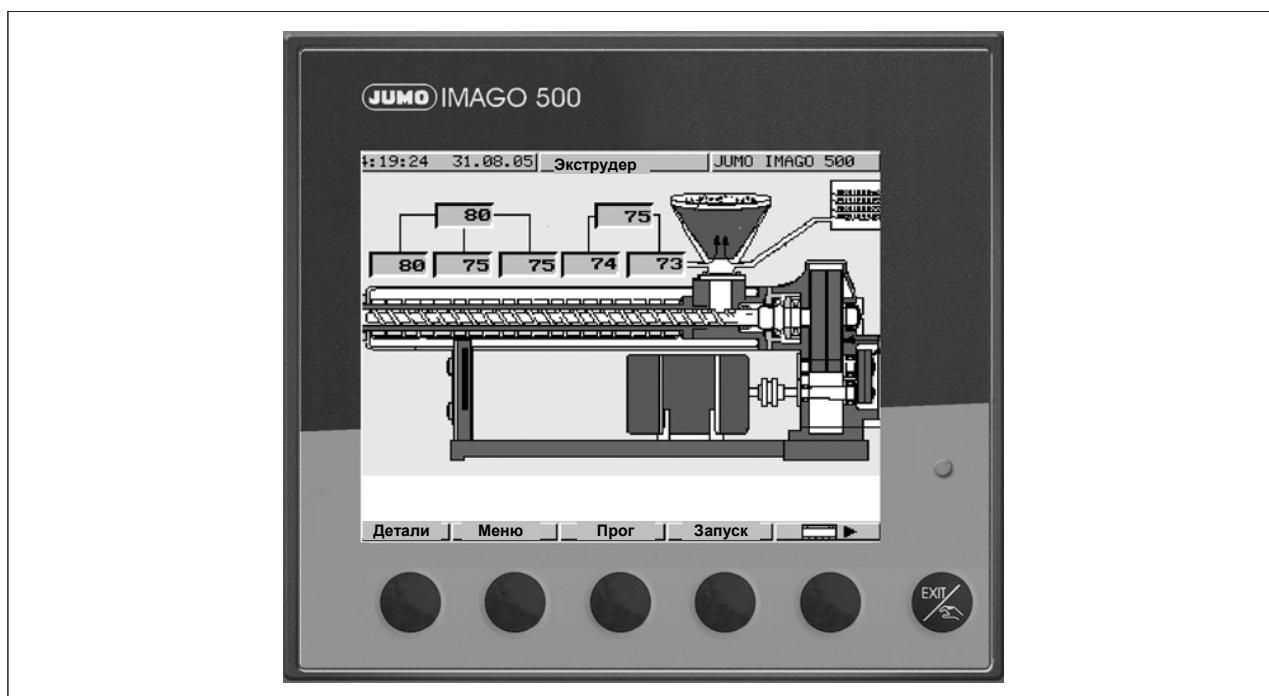


**Рисунок 16: JUMO iTRON**

Регуляторы серии JUMO iTRON можно сконфигурировать как двух- или трехточечные. Для измерения фактического значения можно подключить датчик (термометр сопротивления или термоэлемент) или типовой сигнал. Регулятор обладает двоичными выходами, на которых выдается управляющий сигнал или результат контроля фактического значения. В так называемом автоматическом режиме регулятор на своем дисплее выводит фактическое значение. При помощи двоичных входов можно активировать двоичные функции, как, например, переключение заданного значения. При помощи клавиш или прилагаемой программы Setup прибор можно конфигурировать.

# 1 Основные понятия

Ниже приводится небольшой обзор возможностей регулятора JUMO IMAGO 500.



**Рисунок 17: Пользовательское изображение на экране регулятора JUMO IMAGO 500**

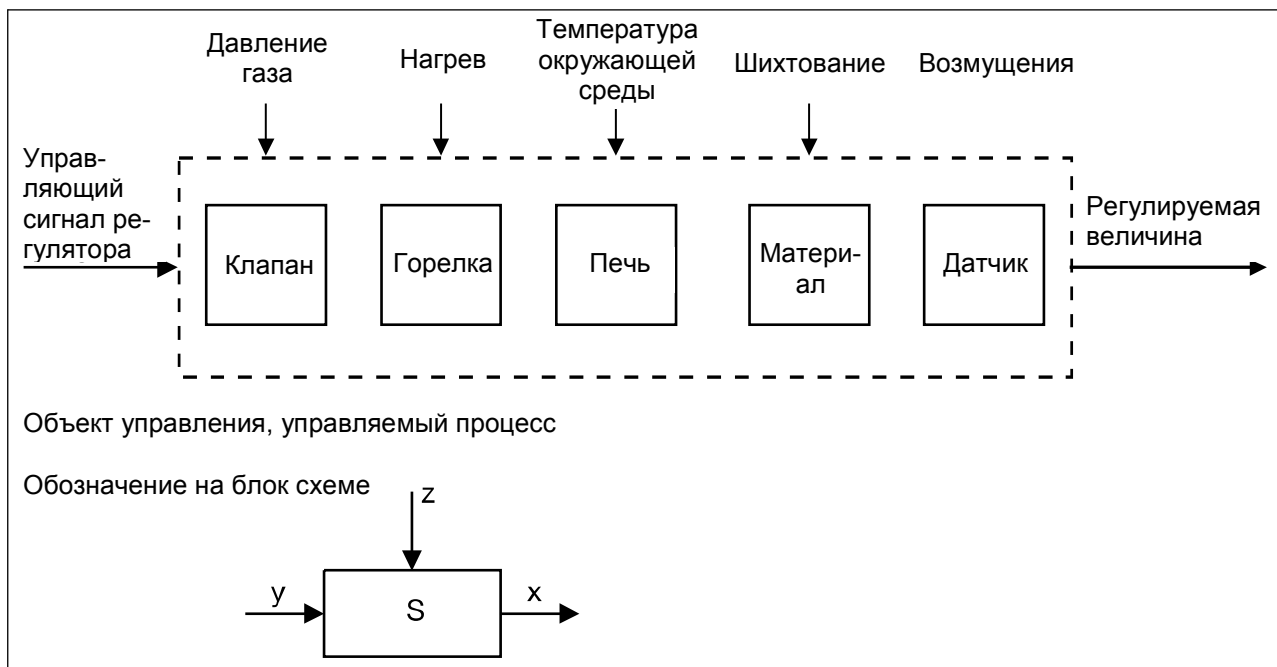
JUMO IMAGO 500 является 8-канальным регулятором, и к нему возможно подключение 8 датчиков. Можно задавать все типы регуляторов, приведенные в главе 1.6 «Типы регуляторов». Регулятор построен по модульному принципу: Можно добавлять новые или заменять имеющиеся узлы. К этому прибору возможно подключение по протоколу MOD-Bus или PROFI-BUS-DP. Можно подключать релейные модули, которые делают доступными до 28 выходов. Регулятор может выполнять запись данных, и измеренные данные можно считывать при помощи ПК через интерфейс. Изображения на экране и тексты сообщений (Рисунок 17) можно свободно задавать, что позволяет обеспечить привязку к конкретной установке. При помощи различных функций регулятор способен брать на себя решение многих задач по управлению процессами.

### 2 Объект регулирования

Данная глава посвящена свойствам объектов регулирования с выравниванием и без выравнивания. Вы познакомитесь со статическими объектами с запаздыванием и задержками. В конце главы будет продемонстрировано, как можно охарактеризовать объект регулирования.

#### 2.1 Общие сведения об объектах регулирования

Объектом регулирования является та часть установки, где необходимо добиться равенства регулируемой величины заданному значению. С точки зрения техники автоматического регулирования, объект регулирования начинается там, где подается управляющий сигнал регулятора (включение исполнительного элемента в состав объекта является некоторым упрощением, которое, однако, вполне пригодно для практических целей!). Объект регулирования заканчивается там, где должно измеряться фактическое значение, то есть у датчика. На объект действуют возмущения, которые влияют на регулируемую величину, когда меняется их значение. Рисунок 18 показывает объект регулирования на примере печи, работающей на газе:



**Рисунок 18: Входные и выходные величины объекта регулирования**

Управляющий сигнал регулятора в этом примере подается на клапан. Здесь начинается объект регулирования. В печи находится материал, в котором помещен датчик температуры. Здесь заканчивается объект регулирования.

Рассмотрим теперь поток энергии:

Если регулятор меняет величину управляющего сигнала, клапан относительно быстро перемещается в новое положение. Немедленно изменяется и поток газа к горелке. Внутренняя область печи медленно нагревается, и через некоторое время температура материала повышается. В нашем объекте регулирования имеются замедляющие звенья или накопители энергии, которые замедляют ее передачу.

Возмущения, также и в этом примере, – это те величины, при изменении которых и при неизменном управляющем сигнале устанавливается другая температура.

## 2 Объект регулирования

---

### Пример:

Если задан именно такой управляющий сигнал, при котором устанавливается требуемая температура материала, а возмущающее воздействие – температура окружающей среды меняется в сторону понижения, то при том же управляющем сигнале температура материала также уменьшится. В замкнутом контуре управления регулятор может противодействовать возмущению, формируя больший управляющий сигнал.

## 2.2 Объекты с выравнением и без выравнения

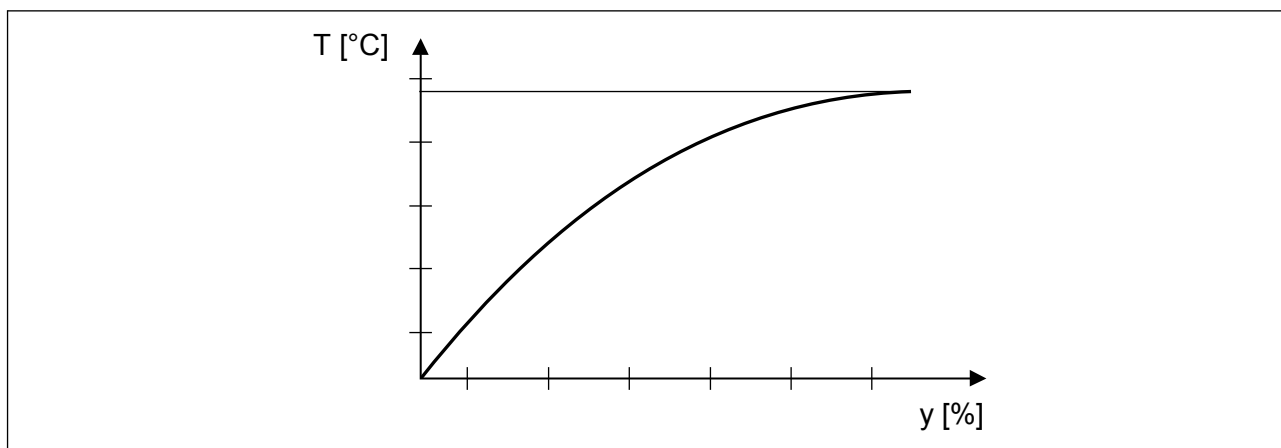
### 2.2.1 Объекты с выравнением

Объект регулирования, показанный на Рисунке 18, является так называемым объектом регулирования с выравнением, что означает следующее. Если задать произвольный управляющий сигнал при помощи регулятора, переведенного в ручной режим, и дождаться устойчивого фактического значения, то всегда установится значение регулируемой величины, пропорциональное управляющему сигналу.

Если измерить так называемую статическую характеристику объекта (фактическое значение в зависимости от управляющего сигнала), то в большинстве случаев она окажется нелинейной.

### Пример:

При измерении статической характеристики для объекта, показанного на Рисунке 18, мы повышаем управляющий сигнал шагами по 10 % и ожидаем установления устойчивой температуры печи. При этом мы увидим, что при том же изменении управляющего сигнала прирост температуры будет больше при низких температурах, чем при высоких. Характеристика нелинейна!



**Рисунок 19: Нелинейная характеристика**

Нелинейность является одной из причин того, что может оказаться необходимым менять параметры регулятора при различных заданных значениях, чтобы улучшить поведение системы при регулировании.

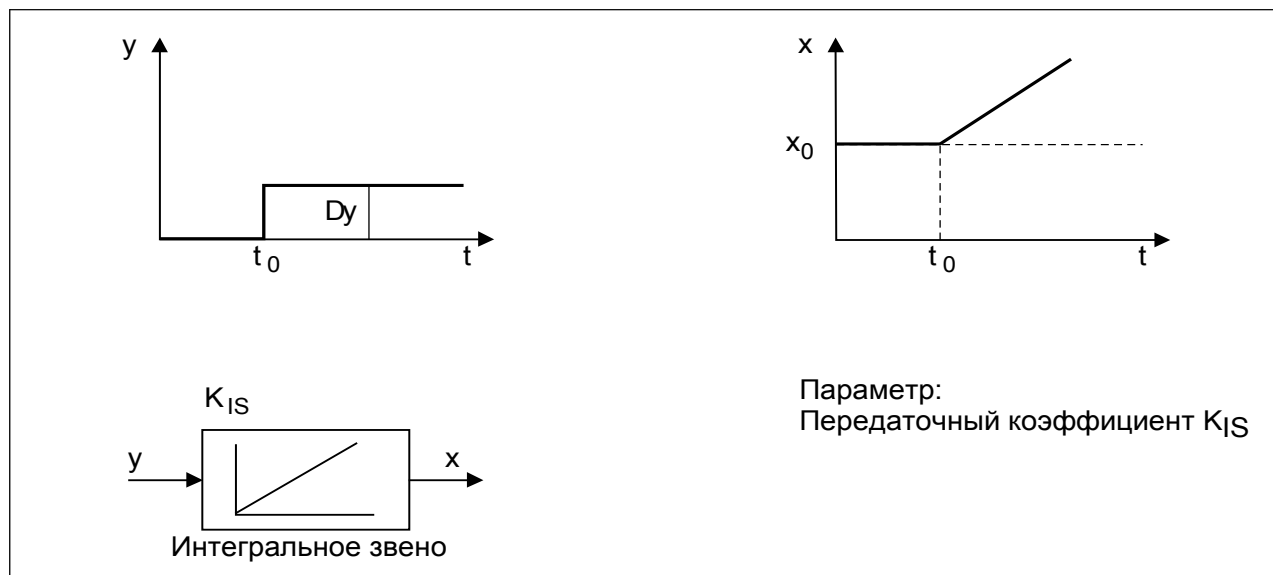


## 2 Объект регулирования

### 2.2.2 Объекты без выравнивания

Объект регулирования без выравнивания реагирует на управляющий сигнал постоянным изменением фактического значения. Отклонение фактического значения зависит от свойств объекта и пропорционально величине управляющего сигнала и времени.

На Рисунке 20 показано поведение объекта без выравнивания, не содержащего задержек или звеньев с запаздыванием:



**Рисунок 20: Переходная характеристика объекта без выравнивания и его условное обозначение**

Если управляющий сигнал равен 0 % (Рисунок 20), то фактическое значение остается неизменным. Если, например, управляющий сигнал меняется скачком, то фактическое значение начинает равномерно меняться. Изменение тем быстрее, чем больше подаваемый управляющий сигнал. В силу их интегрирующего поведения такие объекты называются интегрирующими или И-объектами.

Если на объект без выравнивания подается управляющий сигнал, фактическое значение будет непрерывно меняться, пока не достигнет границы допустимого диапазона.

При постоянном управляющем сигнале имеет место следующее соотношение:

$$\Delta x = K_{IS} \cdot \Delta y \cdot t \quad (1)$$

$K_{IS}$  называется передаточным коэффициентом объекта регулирования без выравнивания.

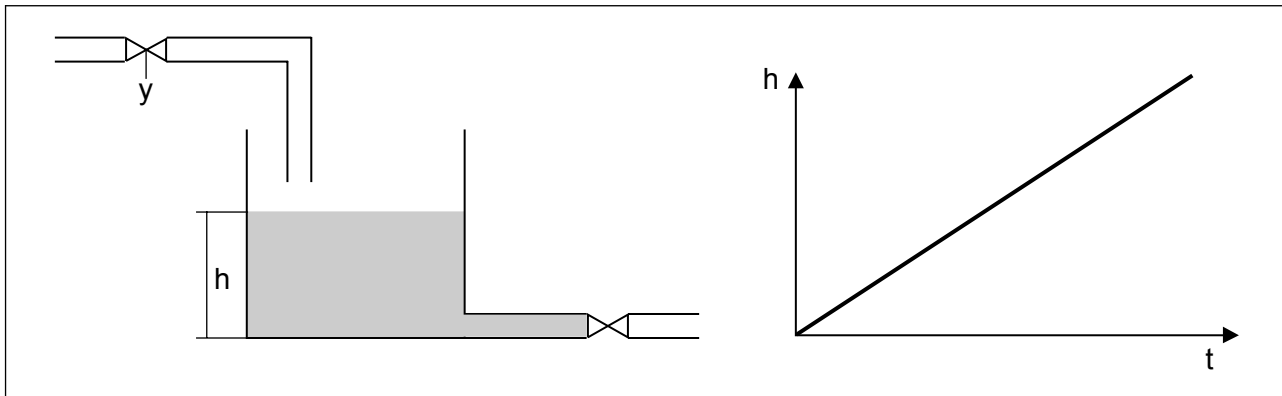
Для меняющегося управляющего сигнала формула принимает следующий вид:

$$\Delta x = K_{IS} \cdot \int_{t_0}^t y \, dt \quad (2)$$

Примерами объектов без выравнивания являются:

- позиционирования
- регулирования уровня жидкости (Рисунок 21)

## 2 Объект регулирования



**Рисунок 21:** Объект с регулированием уровня жидкости

Самый известный пример объекта регулирования без выравнивания – это, пожалуй, резервуар с жидкостью, обладающий впускным и выпускным штуцером. Пусть выпускной клапан, представляющий возмущение, закрыт. Если открыть впускной клапан и поместить его в фиксированное положение, то уровень жидкости в резервуаре (регулируемая величина) будет непрерывно и равномерно расти со временем.

Уровень в резервуаре растет тем быстрее, чем больше количество жидкости, впускаемой в единицу времени. Уровень растет до высоты перепускной трубы резервуара. Автоматическая стабилизация здесь отсутствует. Даже при появлении возмущения, т.е. открытии выпускного клапана, не будет устанавливаться новое равновесное состояние, как у объекта регулирования с выравниванием (исключение: поток на впуске = потоку на выпуске).

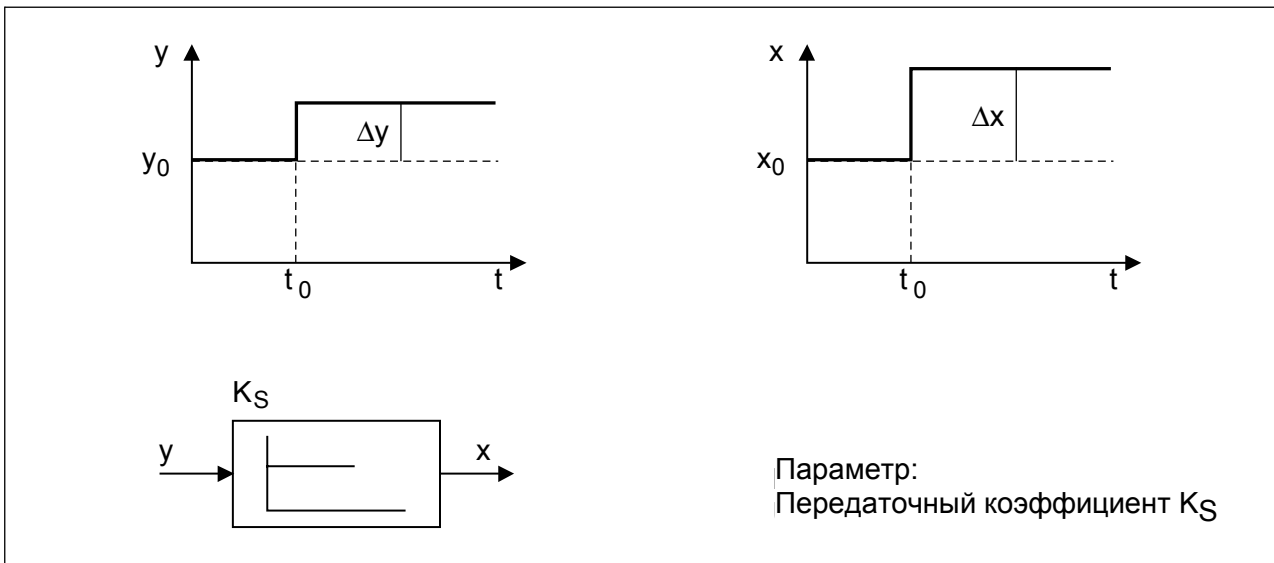
### 2.3 Объекты (звенья) статические, с запаздыванием и задержками

В данной главе мы рассмотрим объекты или звенья, демонстрирующие один из названных выше типов поведения. Все рассуждения относятся к объектам с выравниванием.

Вначале мы рассмотрим звенья «в чистом виде», но дальше мы увидим, что большинство объектов объединяют в себе все виды звеньев.

#### 2.3.1 Статические объекты регулирования

Статические объекты регулирования усиливают заданный управляющий сигнал в число раз, равное передаточному коэффициенту  $K_S$ , без какой-либо временной задержки.



**Рисунок 22:**      **Переходная характеристика статического объекта и его обозначение**

Если на такой объект подан управляющий сигнал, то немедленно устанавливается устойчивое фактическое значение (управляющий сигнал, умноженный на передаточный коэффициент  $K_S$ ). При скачкообразном повышении управляющего сигнала фактическое значение увеличивается пропорционально управляющему сигналу без временной задержки.

Соотношение между изменением регулируемой величины  $\Delta x$  и изменением управляющего сигнала описывается следующей формулой:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y \quad (3)$$

Статические объекты регулирования, работающие абсолютно без задержек, не встречаются на практике. Статическое поведение имеется всегда в комбинации с временными звеньями, которые мы опишем в следующих разделах.

## 2 Объект регулирования

### 2.3.2 Объекты с запаздыванием: $PT_t$ -объекты

Статический объект или звено может, например, работать в комбинации с элементом запаздывания. Так возникает  $PT_t$ -объект.

Этот объект задается, с одной стороны, передаточным коэффициентом, а с другой стороны, временем запаздывания.

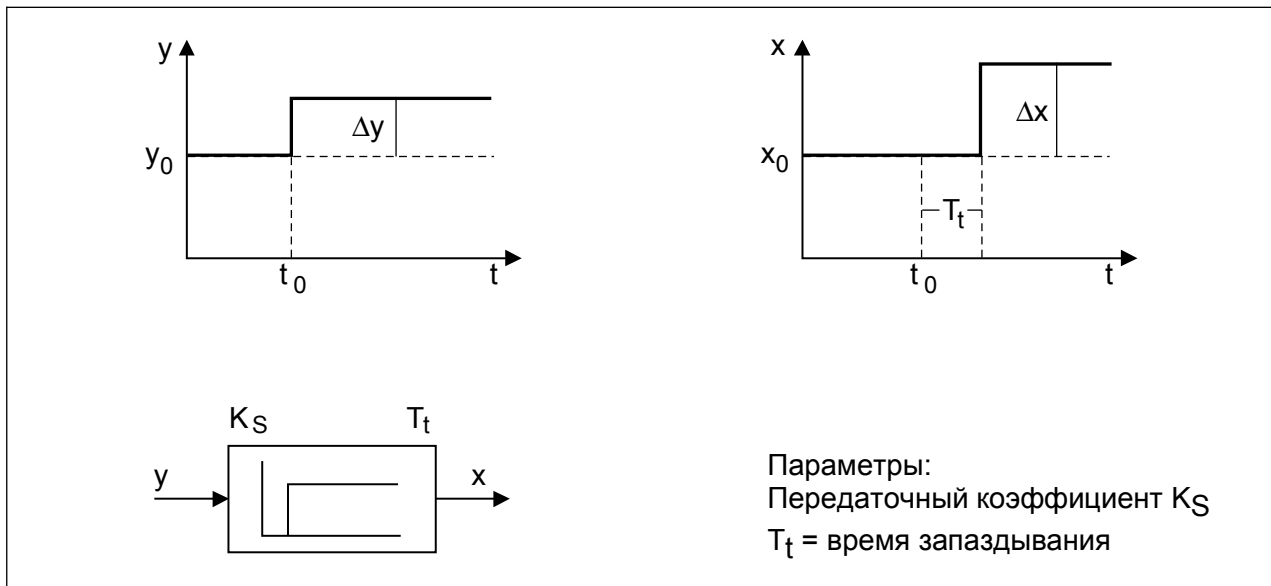


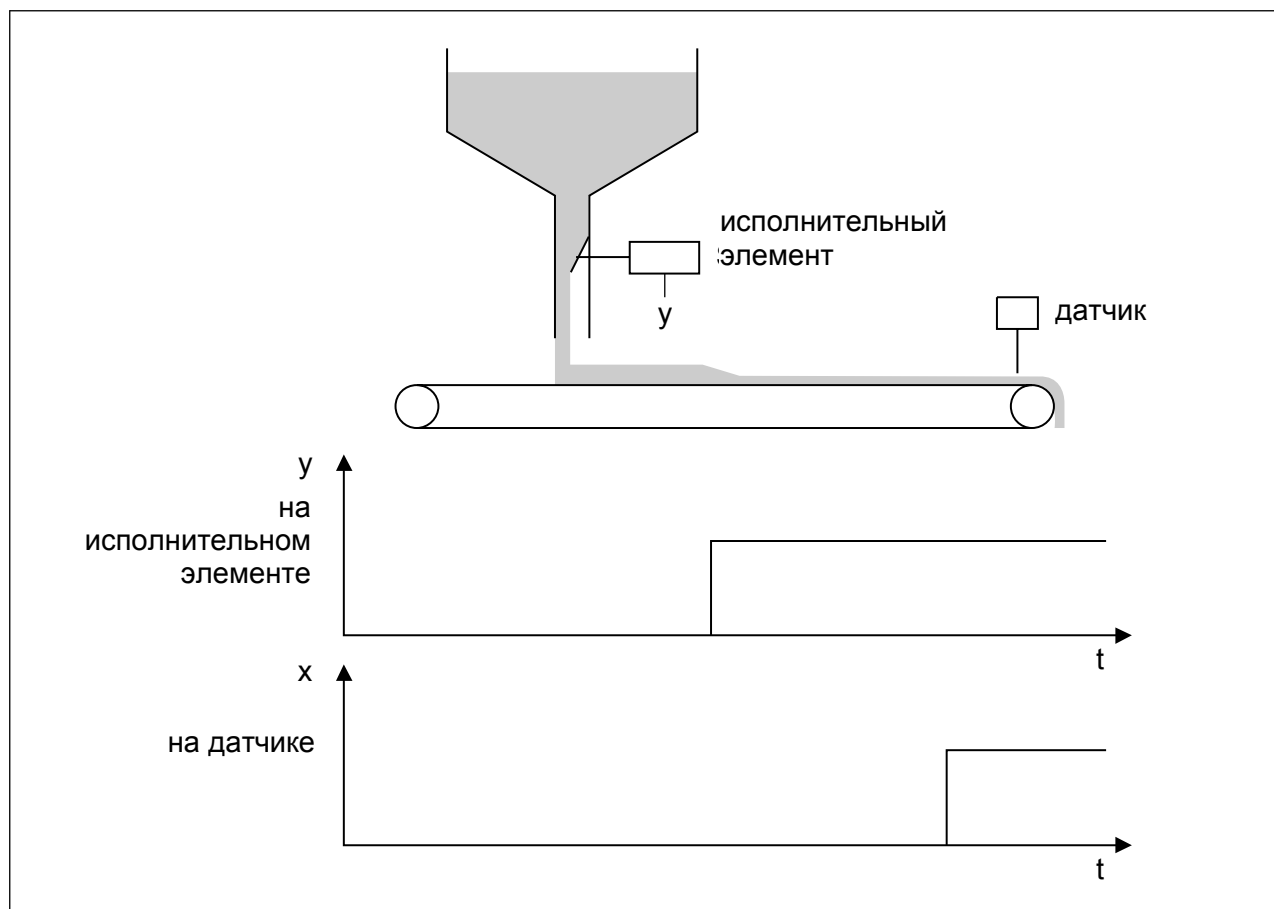
Рисунок 23: Переходная характеристика  $PT_t$ -объекта и его обозначение

Объект ведет себя как статический, однако, меняет фактическое значение при скачке управляющего сигнала лишь после истечения времени запаздывания. Для связи между фактическим значением изменением управляющего сигнала получается следующая формула:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y, \text{ однако, с запаздыванием } T_t \quad (4)$$

## 2 Объект регулирования

Примером  $PT_t$ -объекта является ленточный транспортер, где целью регулирования является поддержание постоянного количества транспортируемого сыпучего материала:



**Рисунок 24: Регулирование количества материала на ленточном транспортере**

Регулятор при помощи своего сигнала управляет заслонкой. Если управляющий сигнал скачкообразно повышается, и предполагается, что заслонка также открывается без задержки, то определенное количество сыпучего материала в единицу времени начинает падать на ленту транспортера. Транспортеру, однако, потребуется некоторое время, пока материал достигнет датчика. Время, через которое датчик регистрирует изменение фактического значения, является временем запаздывания данного объекта регулирования.

### Численный пример:

Если исходить из того, что управляющий сигнал повышается скачком от 0 до 50 %, и датчик через 10 с регистрирует количество транспортируемого материала 100 т/ч, то время запаздывания будет равно 10 с.

Наш объект помимо этого характеризуется передаточным коэффициентом. Что определить его, мы можем повысить управляющий сигнал скачком с 50 до 75 %. В нашем примере должно получиться фактическое значение 150 т/ч.

Передаточный коэффициент получается из изменения фактического значения, поделенного на изменение управляющего сигнала:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{150 \frac{\text{т}}{\text{ч}} - 100 \frac{\text{т}}{\text{ч}}}{75 - 50\%} = \frac{50 \frac{\text{т}}{\text{ч}}}{25\%} = 2 \frac{\text{т}}{\text{ч} \cdot \%} \quad (5)$$

## 2 Объект регулирования

Что означает в нашем примере передаточный коэффициент  $2 \frac{T}{ч \cdot \%}$  ?

Если повысить управляющий сигнал на 1 %, количество транспортируемого материала возрастет на  $2 \frac{T}{ч}$ .

В нашем примере объект регулирования можно задать передаточным коэффициентом  $K_S$   $2 \frac{T}{ч \cdot \%}$  и временем запаздывания 10 с.

Запаздывания затрудняют оптимизацию контура регулирования, и при проектировании их следует по возможности минимизировать.

### 2.3.3 Объекты с задержкой: РТ<sub>n</sub>-объекты

У объектов с задержками фактическое значение после задания управляющего сигнала устанавливается через некоторое время. Задержка объясняется тем, что энергия в контуре регулирования проходит через несколько накопителей, которые необходимо заполнить.

Такие объекты можно математически описать уравнением, которое для каждого накопителя энергии содержит (экспоненциальный) член. В силу этого соотношения, подобные объекты называются объектами первого, второго, третьего и т.д.

В данной главе мы рассмотрим, какое поведение получается вследствие задержек.

#### Объекты с одной задержкой (1-й порядок)

У объектов с одной задержкой, т.е. с одним накопителем энергии, регулируемая величина при скачкообразном изменении управляющего сигнала начинает меняться немедленно и все медленней стремится к конечному значению (Рисунок 25).

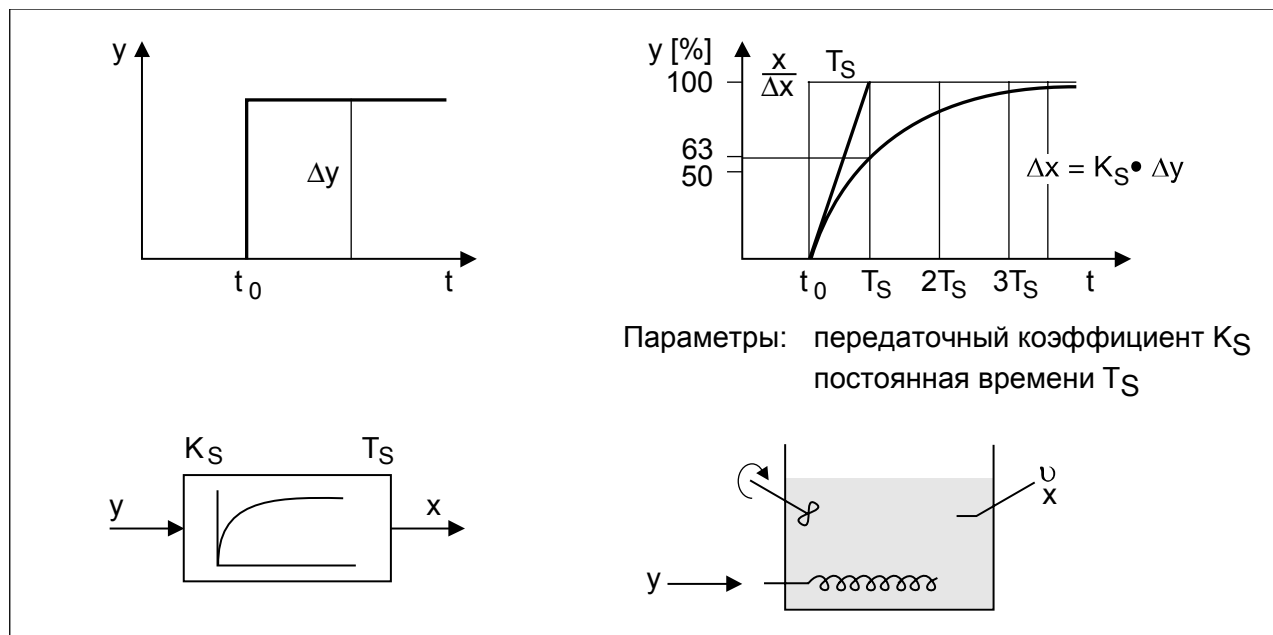


Рисунок 25: Объект 1-го порядка: РТ<sub>1</sub>-объект

## 2 Объект регулирования

На Рисунке 25 справа показан пример, приближенно изображающий объект 1-го порядка:

В водяной ванне имеется только один накопитель энергии, это вода. Энергия, поступающая от исполнительного элемента (скажем, тиристорного силового исполнительного элемента), немедленно преобразуется нагревательной спиралью в тепловую энергию (нагревательная спираль не накапливает энергию, она нагревается без задержки). Тепловая энергия немедленно передается воде. Вода тут же начинает нагреваться. Мы считаем, что используемый датчик обладает очень малой массой, и теплопроводность между водой и датчиком является очень хорошей.

Если мы повышаем мощность нагрева (управляющее воздействие) скачком, то температура воды будет меняться в соответствии со следующим уравнением:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) \quad (6)$$

Как нам определить для этого объекта 1-го порядка параметры  $K_S$  и  $T_S$ ?

Мы скачкообразно повышаем мощность, скажем, на 5 кВт и записываем фактическое значение (температуру воды) при помощи самописца. Таким образом, мы имеем:

$$\Delta y = 5 \text{ кВт} \quad (7)$$

Перед скачком фактическое значение было 20 °С, после скачка, допустим, оно достигло 80 °С. Отсюда получаем:

$$\Delta x = 60 \text{ К} \quad (8)$$

После записи переходной характеристики мы определяем передаточный коэффициент объекта регулирования по следующей формуле:

$$K_S = \frac{\text{Изменение регулируемой величины}}{\text{Изменение управляющего сигнала}} = \frac{60 \text{ К}}{5 \text{ кВт}} = 12 \frac{\text{К}}{\text{кВт}} \quad (9)$$

Упрощенным образом передаточный коэффициент можно истолковать следующим образом: Если мы повышаем мощность на 1 кВт, то температура возрастет на 12 К.

Теперь определим постоянную времени объекта регулирования:

Из протоколированного фактического значения мы можем определить время, которое должно пройти, прежде чем изменение фактического значения составит 63 %. Изменение фактического значения 63 % в данном примере имеет место при температуре

$$20 \text{ °С} + 60 \text{ К} \cdot 63\% \approx 58 \text{ °С} \quad (10)$$

Время, по истечении которого достигается температура воды 58 °С, соответствует постоянной времени  $T_S$  – примем, что в нашем примере эта температура была достигнута за 100 с.

$$\Delta x = 12 \frac{\text{К}}{\text{кВт}} \cdot 5 \text{ кВт} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{100 \text{ с}}} \right) \quad (11)$$

## 2 Объект регулирования

На Рисунке 26 показана переходная характеристика нашего объекта регулирования:

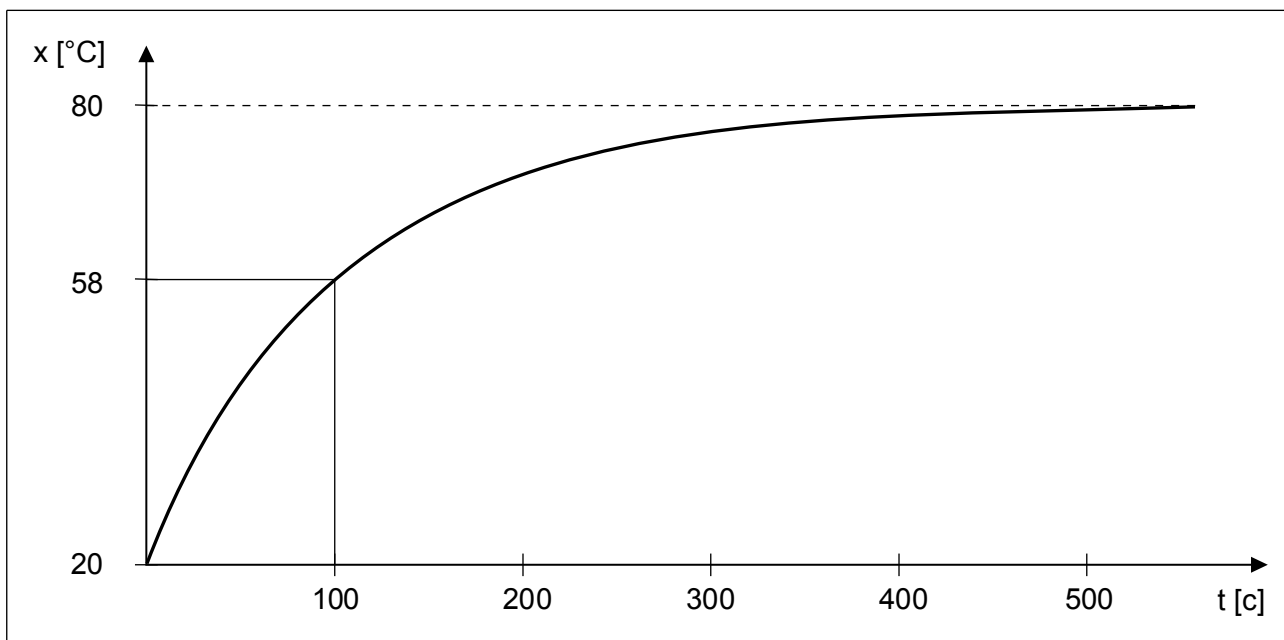


Рисунок 26: Примерный график переходной характеристики объекта 1-го порядка

### Объекты с двумя задержками (2-й порядок)

У объекта с двумя задержками имеются два накопителя энергии:

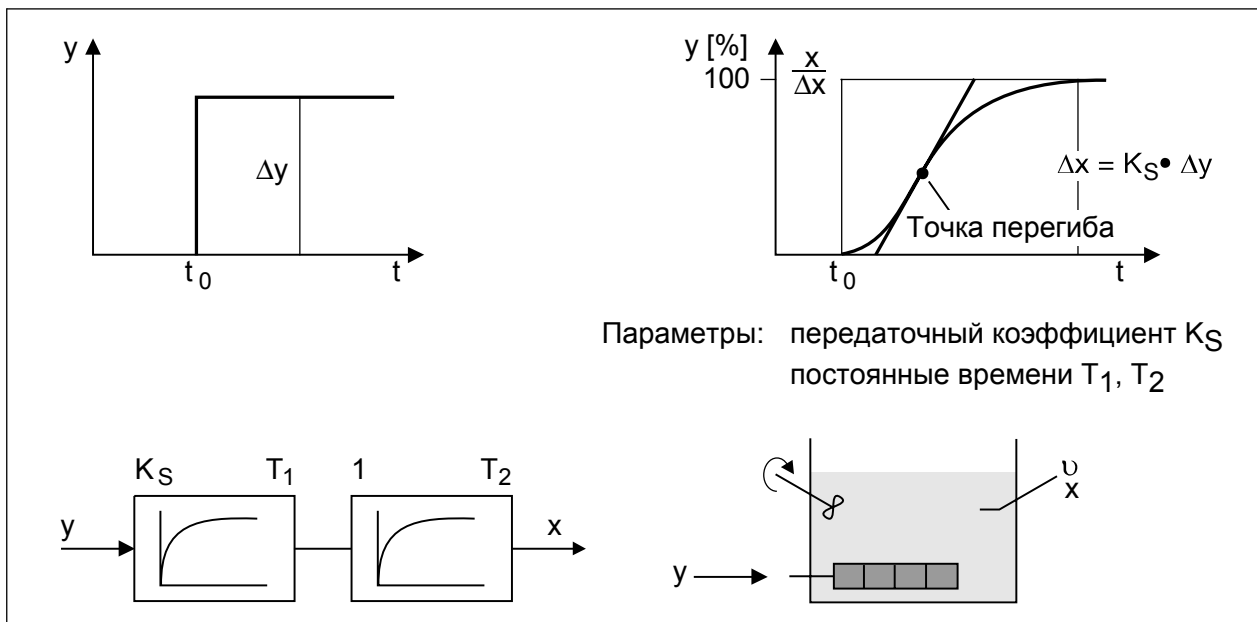


Рисунок 27: Объект 2-го порядка:  $PT_2$ -объект



## 2 Объект регулирования

Объект с двумя задержками называется  $PT_2$ -объектом и определяется постоянными времени обоих накопителей энергии и передаточным коэффициентом.

Как видно из обозначения (Рисунок 27), для практического рассмотрения принимается, что первый передаточный коэффициент равен  $K_S$ , а второй равен 1.

На Рисунке 27 показан пример объекта 2-го порядка, у которого энергия проходит через два накопителя. Если в водяной ванне в примере  $PT_1$ -объекта нагреватель состоял из спирали, то здесь она заменена нагревательным стержнем. Нагревательный стержень обладает относительно большой массой, поэтому он представляет собой второй накопитель энергии.

Если мощность нагревателя меняется скачком с 0 до 5 кВт, то первая задержка потребует энергии для того, чтобы нагреть стержень. Лишь когда температура стержня станет заметно выше температуры воды, вода начнет нагреваться.

По этой причине у таких объектов фактическое значение после скачка управляющего сигнала возрастает с задержкой (Рисунок 27), и его скорость возрастания сначала растет, затем падает, пока не будет достигнуто конечное значение. Переходная характеристика обладает областью с максимальным наклоном, в которой на Рисунке 27 показана касательная.

*С математической точки зрения, максимальный наклон имеется только в одной точке, точке перегиба. На практике считается, что наклон остается постоянным в некоторой области вокруг точки перегиба, так как саму точку перегиба трудно определить. В дальнейшем мы будем рассматривать «область максимального наклона», а не точку перегиба.*

Если на объект 2-го порядка подан скачок управляющего сигнала, то фактическое значение меняется согласно следующему уравнению:

$$\Delta x = K_S \cdot \Delta y \cdot \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \text{ для } T_1 \neq T_2 \quad (12)$$

В этой формуле можно увидеть обе постоянные времени и передаточный коэффициент  $K_S$ . Определение обеих постоянных времени по переходной характеристике сопряжено с очень сложными математическими вычислениями. На практике объекты 2-го и высшего порядка характеризуются эквивалентными параметрами (см. главу 2.4 «Регистрация переходной характеристики для объектов с не менее чем двумя задержками и запаздыванием»).

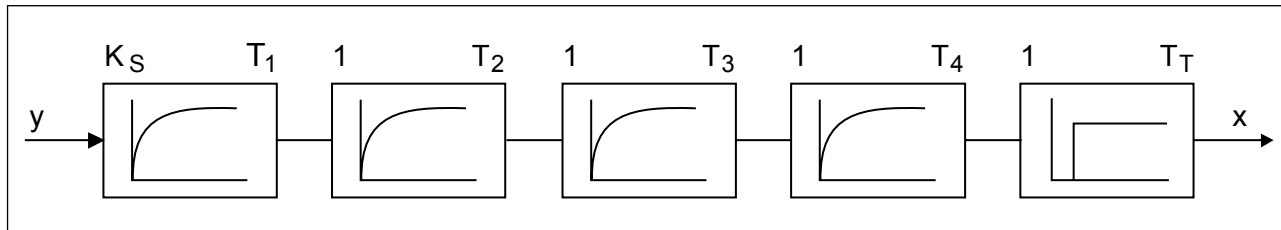
### Объекты высшего порядка

На практике объекты регулирования обладают более, чем двумя, накопителями энергии. Их переходные характеристики, однако, имеют тот же характер, как и у рассмотренных ранее объектов 2-го порядка: У них также имеется время задержки и область с максимальным наклоном.

## 2 Объект регулирования

### 2.4 Регистрация переходной характеристики для объектов с не менее чем двумя задержками и запаздыванием

Объекты регулирования чаще всего состоят из нескольких элементов с задержками и запаздыванием:



**Рисунок 28:** Блок-схема объекта регулирования с несколькими задержками и запаздыванием

Приведенная блок-схема объекта регулирования состоит из четырех задержек и одного элемента с запаздыванием. О реальном объекте практик не знает, какого порядка этот объект и сколько элементов с задержками он включает. Тем более, ему неизвестны соответствующие постоянные времени.

Объекты, начиная со 2-го порядка (включая звенья с запаздыванием) характеризуются при помощи вспомогательных величин. Пользуясь эквивалентными параметрами и эмпирическими формулами, в дальнейшем можно определять параметры регулирования, близкие к оптимальным.

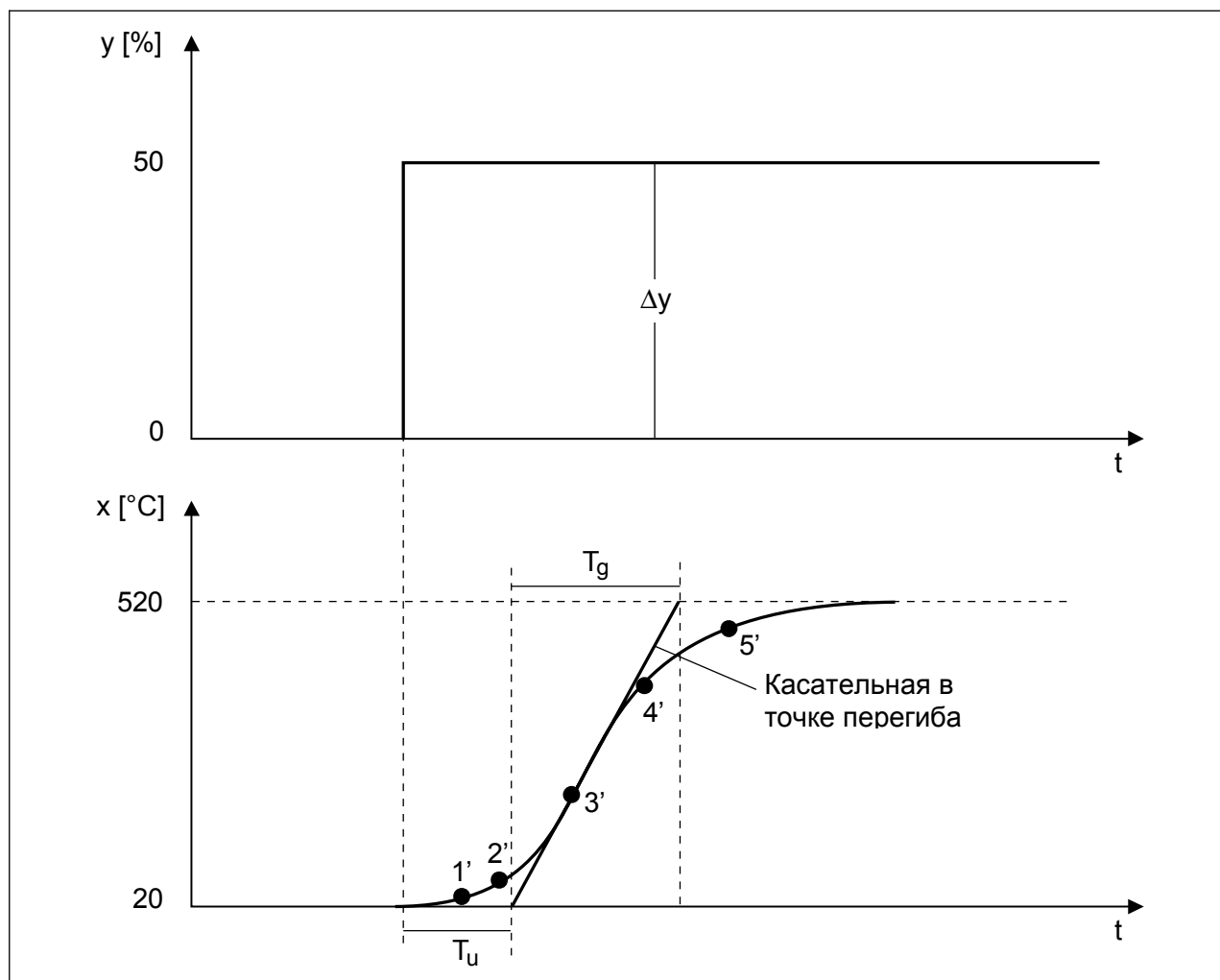
Упомянутыми эквивалентными параметрами являются уже известные нам передаточный коэффициент ( $K_S$ ) и, кроме этого, время задержки ( $T_U$ ) и время выравнивания ( $T_G$ ).

Для определения этих параметров необходимо записать переходную характеристику. Для этой цели на объект регулирования подается скачок управляющего сигнала и регистрируется временной ход фактического значения (см. Рисунок 29). Строя касательные к графику фактического значения, определяют область, в которой он обладает наибольшим наклоном. Касательную наносят на график. Время от скачка управляющего сигнала до точки пересечения касательной в точке перегиба с временной осью является временем задержки ( $T_U$ ); время от точки пересечения этой касательной с временной осью до точки ее пересечения с максимальным фактическим значением соответствует времени выравнивания ( $T_G$ ).

Передаточный коэффициент получают как изменение фактического значения, деленное на скачок управляющего сигнала.

#### **Пример:**

Следует определить  $K_S$ ,  $T_U$  и  $T_G$  для промышленной печи. Печь охладилась, внутри нее температура составляет 20 °С. Теперь при помощи регулятора, переведенного в ручной режим, задается скачок управляющего сигнала от 0 до 50 %, и строится график фактического значения. На Рисунке 29 показан временной ход фактического значения:



**Рисунок 29: Определение времени задержки и выравнивания**

Проведем на уровне максимального фактического значения (520 °С) прямую, параллельную оси времени. Теперь можно определить передаточный коэффициент объекта:

$$K_S = \frac{\text{Изменение регулируемой величины}}{\text{Изменение управляющего сигнала}} = \frac{500 \text{ К}}{50\%} = 10 \frac{\text{К}}{\%} \quad (13)$$

Теперь нужно построить касательную в точке перегиба: Рассмотрим на графике фактического значения слева направо после скачка точки (1', 2' и т.д.). Начиная с 1', мы наносим касательные. Касательная в точке 1' идет относительно полого. Если мы перейдем к точкам, расположенным правее (2', 3'), то мы увидим, что касательные становятся все круче.

Двигаясь далее направо (4', 5'), мы видим, что касательные становятся положе. Таким образом, определяется область максимального наклона. На Рисунке 29 касательная в точке 3' обладает максимальным наклоном.

Теперь можно определить временные параметры описанным выше способом.

В дальнейшем мы увидим, что эти три параметра объекта могут быть использованы для определения параметров регулирования, близких к оптимальным.

## 2 Объект регулирования

---

Соотношение  $T_g/T_u$  может служить мерой управляемости объекта:

$T_g/T_u > 10$                     хорошо управляемый

$T_g/T_u = 10...3$             управляемый

$T_g/T_u < 3$                     плохо управляемый

Как мы могли заметить уже в главе 2.2.1 «Объекты с выравниванием», характеристики объектов регулирования обычно нелинейны. Это означает, что при  $K_S$  низких температурах больше, чем при высоких. Для нашей промышленной печи мы определили некоторый усредненный  $K_S$ , поскольку мы задали очень большой скачок управляющего сигнала. На практике, по этой причине задаются такие скачки, после которых фактическое значение устанавливается на уровне дальнейшей рабочей точки.

Дальнейшие сведения по этой теме вы найдете в главе 4.3.2 «Метод Чина, Хронеса и Ресвика».

# 3 Регуляторы непрерывного действия

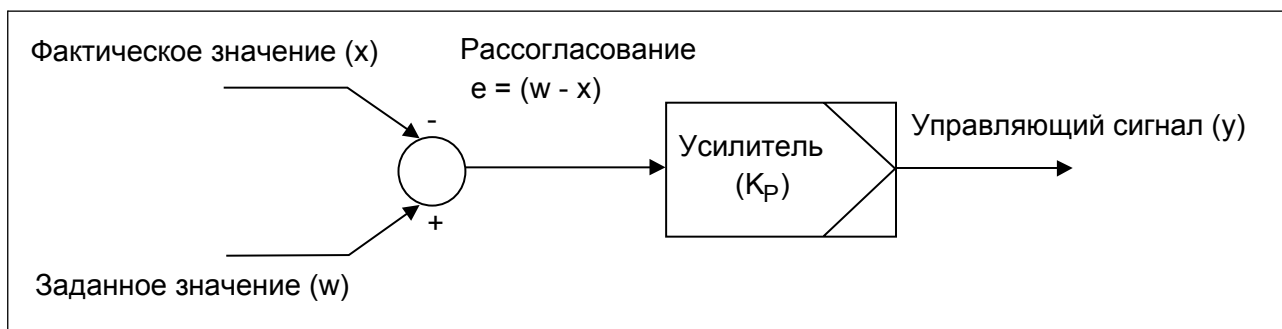
## 3 Регуляторы непрерывного действия

Данная глава дает наглядное объяснение работы ПИД-регулятора.

Одно за другим следуют рассмотрения пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих на примере регулятора непрерывного действия (0/2... 10 В, 0/4... 20 мА). Этот же принцип действия может быть применен и к регулятору с двоичными выходами. Необходимый дополнительный материал мы дадим в главе 5 «Регуляторы дискретного действия».

### 3.1 П-регулятор

П-регулятор (пропорциональный регулятор) вычисляет рассогласование из заданного и фактического значения, которое умножается на некоторый множитель. Усиленный сигнал выдается в качестве управляющего сигнала (см. Рисунок 30).



**Рисунок 30: Принцип действия П-регулятора**

Усиление называется пропорциональным передаточным коэффициентом, оно может свободно задаваться на регуляторе. Уравнение регулятора имеет следующий вид:

$$y = K_p \cdot (w - x) \quad (14)$$

Единицей измерения  $K_p$  всегда является %, поделенный на единицу регулируемой величины (Кельвин, бар, об/мин и т.д.).

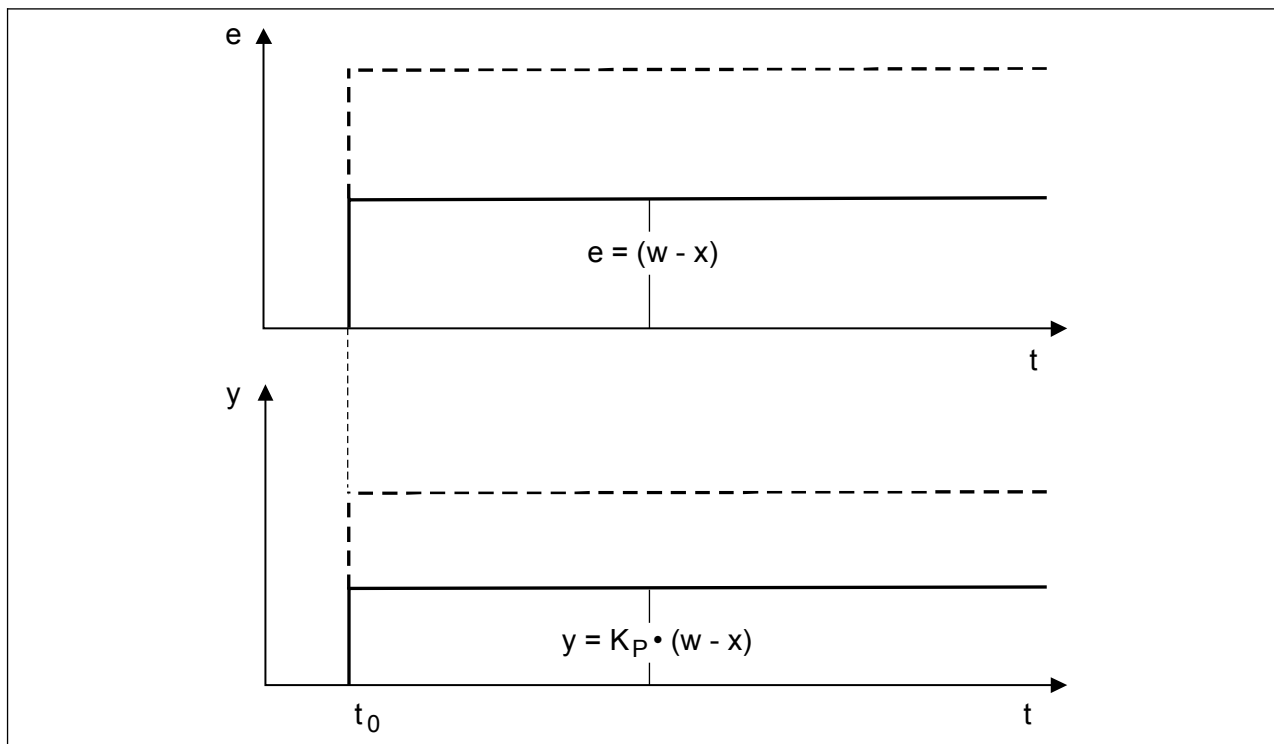
#### Примеры:

П-регулятор для объекта, где регулируется температура, с  $K_p$ , равным 10 %/К, при рассогласовании 5 К выдает управляющий сигнал 50 %.

Еще одним примером является П-регулятор давления с  $K_p$ , равным 4 %/бар. При рассогласовании 20 бар он выдаст управляющий сигнал 80 %.

### 3 Регуляторы непрерывного действия

На Рисунке 31 приводится переходная характеристика П-регулятора. Для ее измерения задают скачок рассогласования (путем повышения заданного значения) и наблюдают за тем, как на выходе меняется управляющий сигнал.

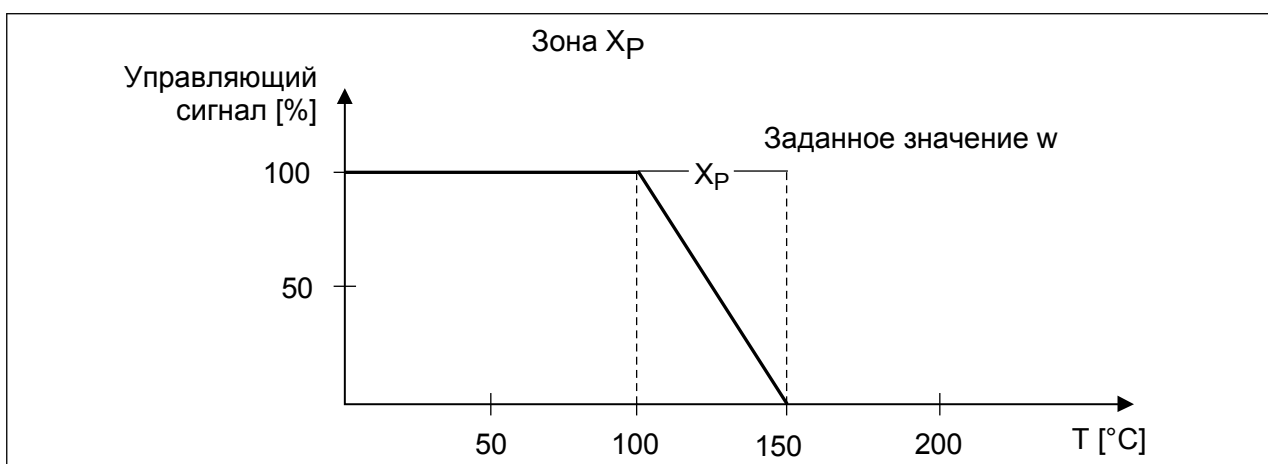


**Рисунок 31: Переходная характеристика П-регулятора**

Рисунок 31 показывает, что П-регулятор изменяет свой выходной сигнал пропорционально рассогласованию регулируемой величины, без задержки.

#### 3.1.1 Зона пропорционального регулирования

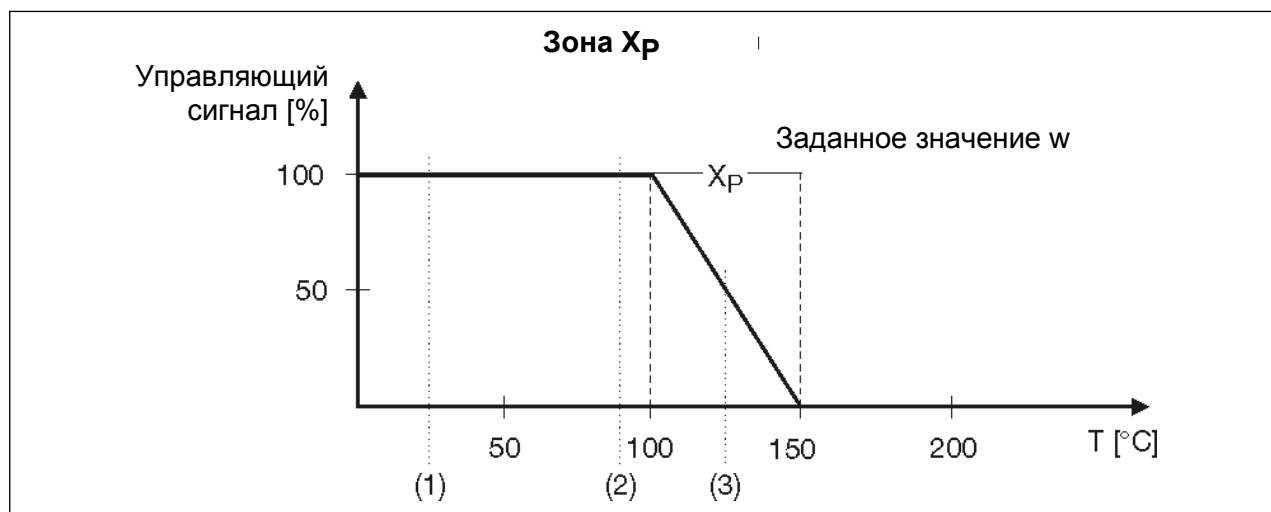
В регуляторах фирмы JUMO пропорциональная составляющая характеризуется не передаточным коэффициентом, а шириной зоны пропорционального регулирования ( $X_P$ ). Зона пропорционального регулирования задает диапазон – по необходимости выше или ниже заданного значения, – в котором управляющий сигнал пропорционален рассогласованию:



**Рисунок 32: Характеристика пропорционального регулятора**

## 3 Регуляторы непрерывного действия

Рисунок 32 показывает характеристику пропорционального регулятора, который, например, используется для нагрева. На оси Y нанесен управляющий сигнал. По оси X отложено заданное значение (здесь характеристика касается оси X). На Рисунке 33 также нанесены фактические значения.



**Рисунок 33:** Характеристика пропорционального регулятора с нанесенными фактическими значениями

В нашем примере зона пропорционального регулирования составляет 50 К. Это означает следующее. При рассогласовании регулируемой величины более 50 К управляющий сигнал равен 100 %. Если рассогласование меньше, чем зона пропорционального регулирования, то управляющий сигнал уменьшается пропорционально рассогласованию.

Если мы рассмотрим фактическое значение около 25 °С (1), то из точки пересечения с характеристикой видно, что в этом случае регулятор выдаст управляющий сигнал 100 %.

Фактическое значение, в виду высокого управляющего сигнала, будет повышаться и через некоторое время будет лежать около 90 °С (2). Управляющий сигнал будет все еще равен 100 % и начнет уменьшаться лишь после достижения температуры 100 °С. С этого момента мы находимся в зоне пропорционального регулирования ( $X_p$ ).

Если температура лежит в середине зоны пропорционального регулирования (125 °С), то управляющий сигнал составляет 50 % (3). Если же фактическое значение равно 150 °С, то рассогласование отсутствует, и управляющий сигнал будет 0 %.

При приближении к заданному значению, зона пропорционального регулирования  $X_p$  позволяет с первого взгляда определить, когда регулятор начнет уменьшать управляющий сигнал.

### Установившаяся погрешность

Если в нашем примере достигнуто заданное значение 150 °С, и мы рассматриваем печь, то в этом случае во внутреннюю область печи мощность нагрева больше не подается. Температура станет меньше 150 °С, и управляющий сигнал возрастет. Процесс достигнет некоторого равновесия (если для этого при фактическом значении 125 °С потребуется управляющий сигнал 50 %, то это соответствует нашему примеру).

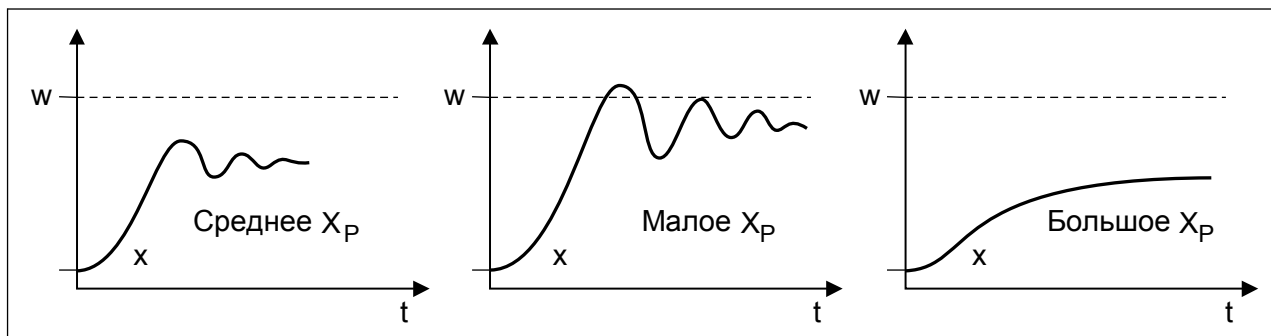
Недостатком П-регулятора является установившаяся погрешность. Поэтому такой регулятор используется крайне редко. Пропорциональная составляющая чаще всего комбинируется с интегральной, а, в дополнение к этому, часто также и с дифференциальной составляющей.

Установившуюся погрешность в нашем случае можно было бы сократить, уменьшая  $X_p$ , и,

### 3 Регуляторы непрерывного действия

следовательно, увеличивая передаточный коэффициент. В нашем примере процесс должен был достигнуть равновесия при фактическом значении 125 °С и управляющем сигнале 50 %. Если задать зону пропорционального регулирования 25 К, то управляющий сигнал составит 100 %, и фактическое значение начнет увеличиваться в сторону заданного значения.

При задании меньших значений  $X_P$  фактическое значение, однако, будет все больше проявлять склонность к осцилляциям:



**Рисунок 34:      Переходная характеристика при различных  $X_P$**

Сильные осцилляции при малом  $X_P$  объясняются тем, что в нашем случае при попадании фактического значения в зону пропорционального регулирования мощность будет очень быстро уменьшаться, и поэтому будет невозможно немедленно достичь состояния равновесия.

#### **Соотношение между передаточным коэффициентом и зоной пропорционального регулирования**

Между передаточным коэффициентом и зоной пропорционального регулирования имеется следующее соотношение:

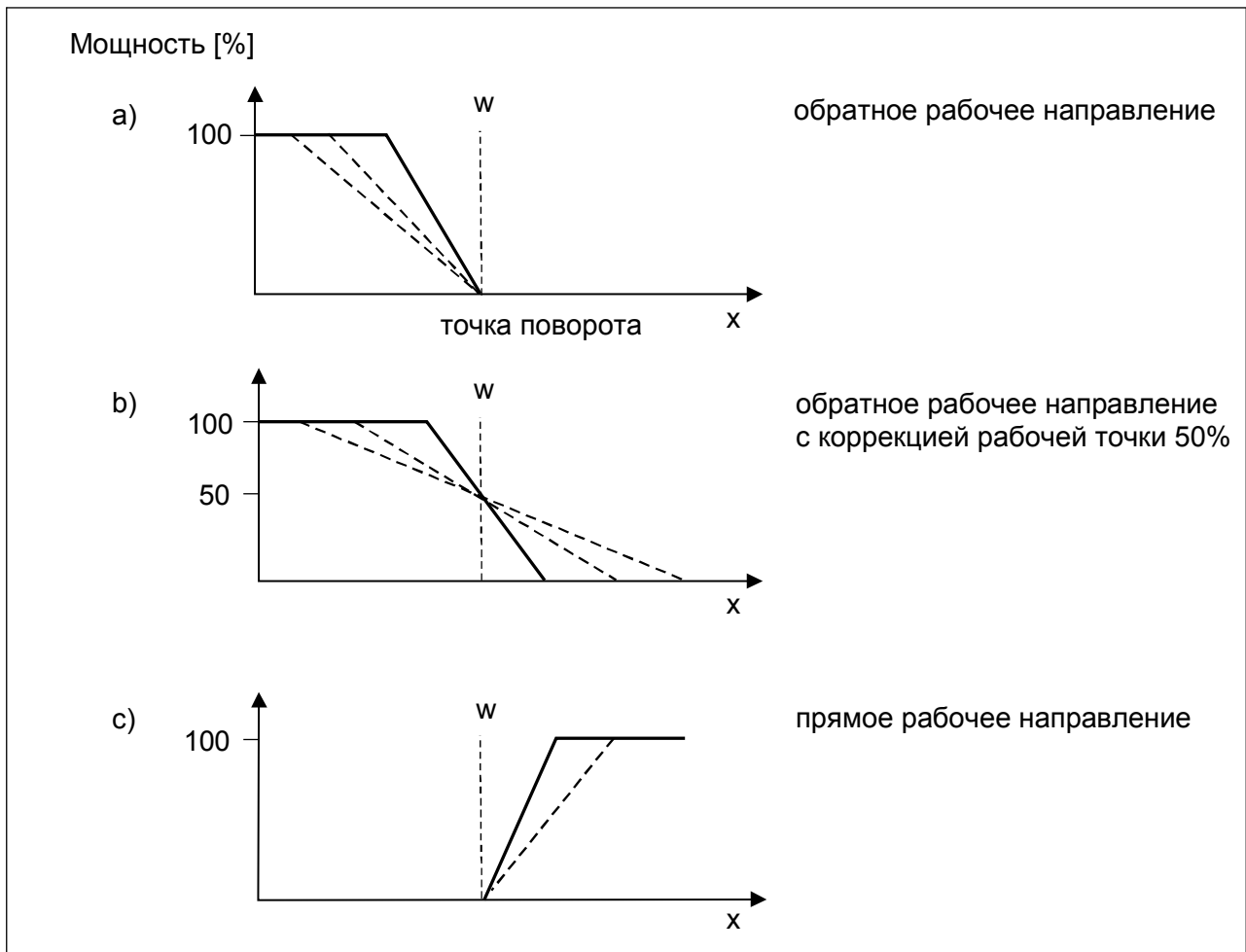
$$K_P = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \text{ или } X_P = \frac{1}{K_P} \cdot 100\% \quad (15)$$

Регулятор, изображенный на Рисунке 32 с  $X_P$ , равным 50 К, будет, таким образом, соответствовать регулятору с  $K_P$ , равным 2 %/К.



## 3 Регуляторы непрерывного действия

### Прямое и обратное рабочее направление, коррекция рабочей точки



**Рисунок 35: Различные характеристики для П-регуляторов**

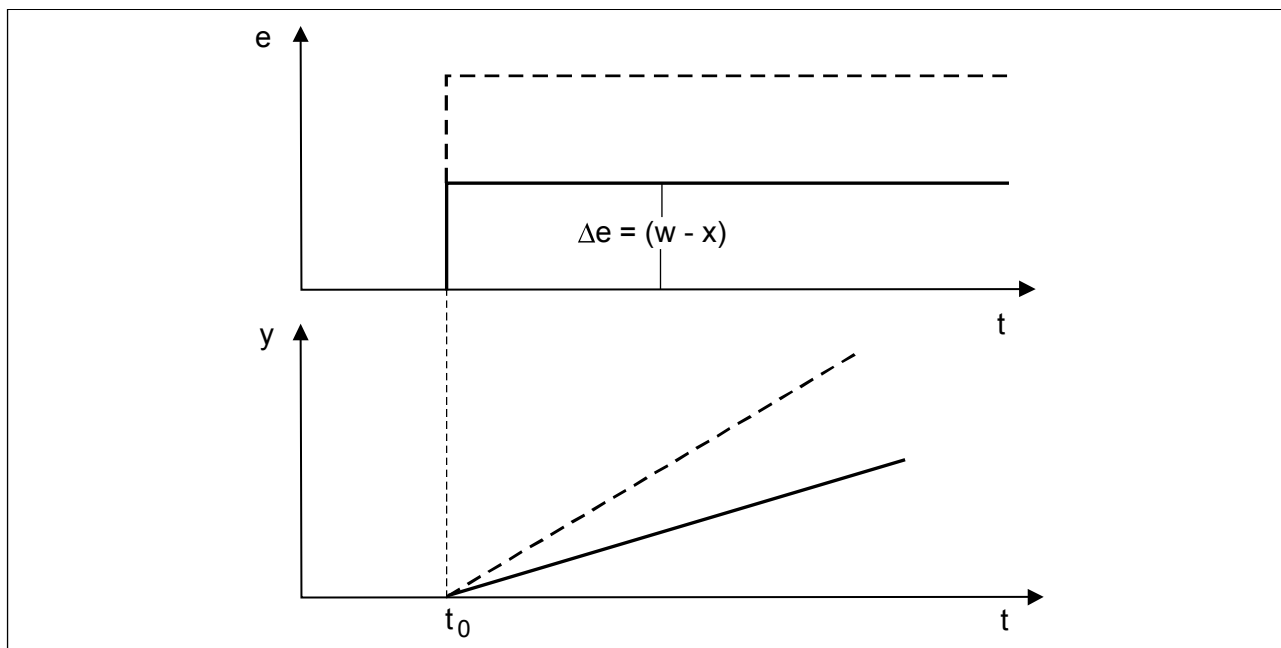
- a) На рисунке показана характеристика П-регулятора, как мы с ней уже познакомились. Если фактическое значение находится ниже зоны пропорционального регулирования, управляющий сигнал равен 100 %. Если же фактическое значение попадает в зону пропорционального регулирования, управляющий сигнал уменьшается, пока при достижении заданного значения он не составит 0 %. Если управляющий сигнал требуется тогда, когда фактическое значение лежит ниже заданного, то следует активировать обратное рабочее направление. Примером такой ситуации является нагрев или увлажнение.
- b) В этом случае при помощи так называемой коррекции рабочей точки было введено смещение управляющего сигнала. Это значение в регуляторах фирмы JUMO обозначается  $Y_0$ , и в данном примере оно составляет 50 %. При рассогласовании 0 К управляющий сигнал составляет, следовательно, 50 %. Меняя значение  $Y_0$  можно добиться для П-регулятора равенства установившейся погрешности 0. Это относится, однако, только к одной рабочей точке и исключительно к тому случаю, когда условия в контуре регулирования не меняются. На практике за устранение рассогласования отвечает интегральная составляющая, рассмотрением которой мы займемся ниже в этой главе. По этой причине коррекция рабочей точки используется очень редко.
- c) Если управляющий сигнал требуется тогда, когда фактическое значение лежит выше заданного, то регулятор работает в прямом рабочем направлении. Такой режим реализуется при охлаждении или удалении влаги. При больших фактических значениях управляющий

## 3 Регуляторы непрерывного действия

сигнал остается равным 100 %, пока фактическое значение не попадет в зону пропорционального регулирования. После этого управляющий сигнал будет уменьшаться, пока рассогласование не станет равным 0.

### 3.2 И-регулятор

С математической точки зрения, характеристика И-регулятора образует поверхности, ограниченные осями рассогласования и времени:

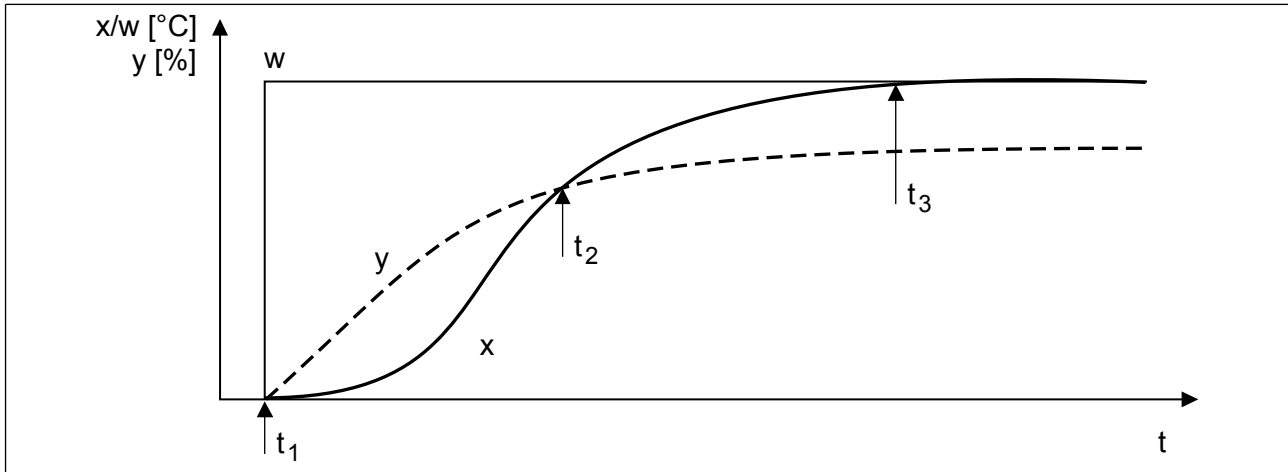


**Рисунок 36: Переходная характеристика И-регулятора**

На Рисунке 36 показана переходная характеристика И-регулятора. Перед скачком рассогласование равно 0, в этом случае И-регулятор сохраняет текущее значение управляющего сигнала. Если управляющий сигнал был перед этим равен 0 %, он продолжает оставаться на этом уровне. Если рассогласование скачком изменяется до некоторого положительного значения, то регулятор образует упомянутые выше поверхности, которым следует его управляющий сигнал. Иными словами регулятор увеличивает управляющий сигнал, пока не будет достигнуто положительное рассогласование. Если рассогласование остается постоянным, то управляющий сигнал, аналогично функции ramпы, возрастает до 100 % и остается на этом уровне. Если имеющееся рассогласование вдвое больше, то регулятор будет наращивать управляющий сигнал вдвое быстрее (штриховая линия на Рисунке 36). Если фактическое значение больше, чем заданное (отрицательное рассогласование), то, соответственно этому, управляющий сигнал будет уменьшаться.

Рассмотрим И-регулятор в замкнутом контуре регулирования:

## 3 Регуляторы непрерывного действия



**Рисунок 37: И-регулятор в замкнутом контуре регулирования**

На Рисунке 37 показано заданное значение, фактическое значение и управляющий сигнал для И-регулятора в замкнутом контуре управления:

- $t_1$ : Происходит переход к новому заданному значению, И-регулятор немедленно начинает увеличивать управляющий сигнал, изменение фактического значения происходит лишь через некоторое время.
- $t_2$ : Фактическое значение становится все больше, и, следовательно, рассогласование, становится все меньше. Поэтому кривая изменения управляющего сигнала становится все более полой.
- $t_3$ : Регулятор довел рассогласование до 0. И-регулятор сохраняет уровень управляющего сигнала, которого он достиг.

Общим преимуществом И-регуляторов является то, что они устраняют рассогласование. Отрицательное воздействие оказывает их инерционность.

### Постоянная времени интегрирования ( $T_I$ )

При помощи постоянной времени интегрирования можно менять скорость И-регулятора. Для остающегося постоянным рассогласования уравнение регулятора имеет следующий вид:

$$\Delta y = \frac{1}{T_I} \cdot \Delta e \cdot t + y_{t_0} \quad (16)$$

$y_{t_0}$ : управляющий сигнал к началу рассмотрения

Это означает, что чем меньше  $T_I$ , тем быстрее И-регулятор меняет свой управляющий сигнал.

Из формулы видно, что  $T_I$  является как раз тем временем, которое требуется регулятору, чтобы увеличить управляющий сигнал на величину имеющегося рассогласования (мы не рассматриваем размерность).

### Пример:

Представим себе И-регулятор для печи. Пусть  $T_I$  составляет 60 с, и рассогласование равно 2 К. Для увеличения управляющего сигнала на 2 % регулятору требуется 60 с.

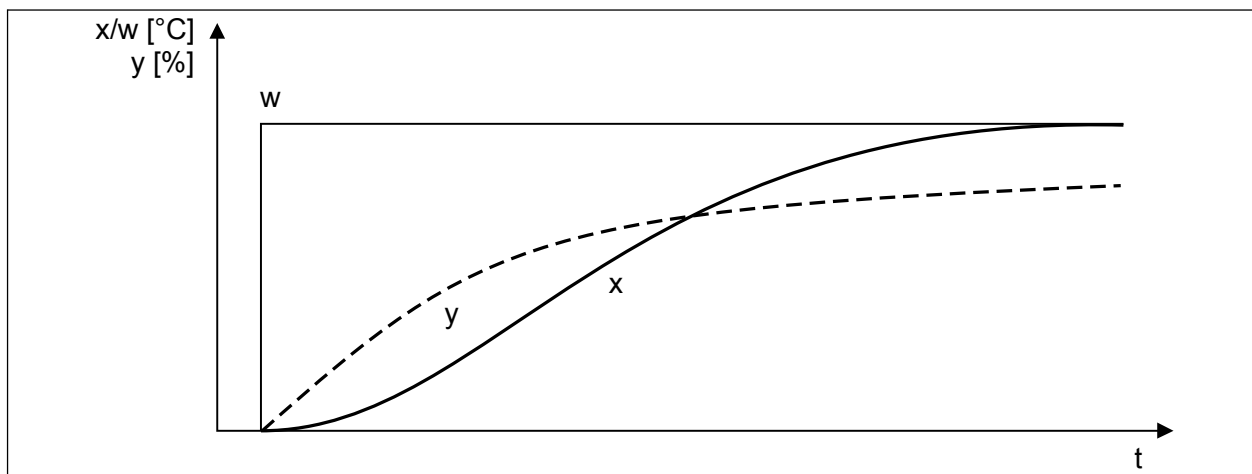
При меняющемся рассогласовании управляющий сигнал будет образован в соответствии со следующим уравнением:

### 3 Регуляторы непрерывного действия

$$y = \frac{1}{T_I} \cdot \int_{t_0}^t e \cdot dt + y_{t_0} \quad (17)$$

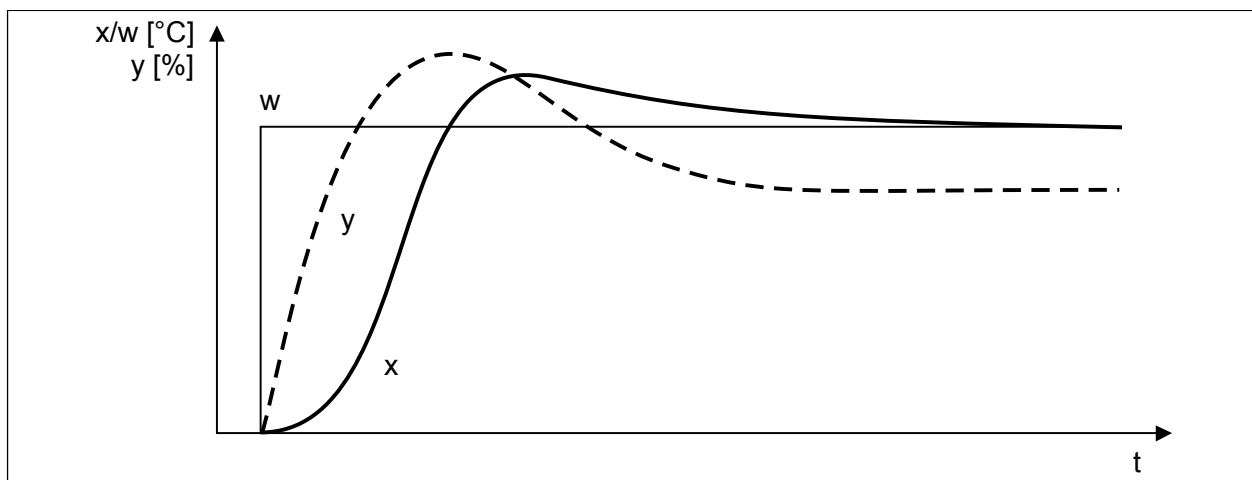
$t_0$ : Время в начале рассмотрения

При другой величине постоянной времени интегрирования И-регулятор ведет себя следующим образом:



**Рисунок 38:** И-регулятор с большим  $T_I$

Как видно из Рисунка 38, при задании большой постоянной времени интегрирования И-регулятор медленно меняет управляющий сигнал. Фактическое значение движется устойчиво, но очень медленно, в направлении заданного значения.



**Рисунок 39:** И-регулятор с малым  $T_I$

Рисунок 39 показывает, что регулятор при задании малой постоянной времени интегрирования слишком быстро меняет управляющий сигнал. Когда фактическое значение оказывается равным заданному, регулятор успел сформировать слишком большой управляющий сигнал, и фактическое значение продолжает расти и превышает заданное.

#### $T_I$ и $T_n$

Если, как описано в следующей главе, интегральная составляющая комбинируется с

## 3 Регуляторы непрерывного действия

пропорциональной, то, чтобы охарактеризовать интегрирующее поведение, говорят о времени отставания ( $T_n$ ). Для интегрирующего поведения интегральной составляющей для И-, ПИ- или ПИД-регулятора должен быть только один параметр. Поэтому у регуляторов фирмы JUMO с интегрирующей структурой описанная выше постоянная времени интегрирования определяется через время отставания. Сам параметр  $T_I$  не используется.

### Применение И-регуляторов

И-регуляторы применяются для пульсирующих величин (регулировки давления) и объектов, которые обладают небольшим временем выравнивания относительно времени задержки ( $T_g/T_u < 3$ ). Чтобы добиться того, чтобы регулятор реагировал быстрее, при управлении быстро реагирующими объектами задаются малые величины для времени отставания.

### 3.3 ПИ-регулятор

ПИ-регулятор можно представлять как комбинацию пропорциональной (П) и интегральной (И) составляющих. Он объединяет в себе преимущества обеих составляющих: Быстрота (П) и отсутствие рассогласования (И). Если при использовании ПИ-регулятора возникает большое рассогласование, пропорциональная составляющая усиливает его и выдает относительно большой управляющий сигнал. Интегральная составляющая в течение времени положительного рассогласования увеличивает свой управляющий сигнал и обеспечивает, чтобы рассогласование стало равно 0.

На Рисунке 40 показана переходная характеристика ПИ-регулятора.

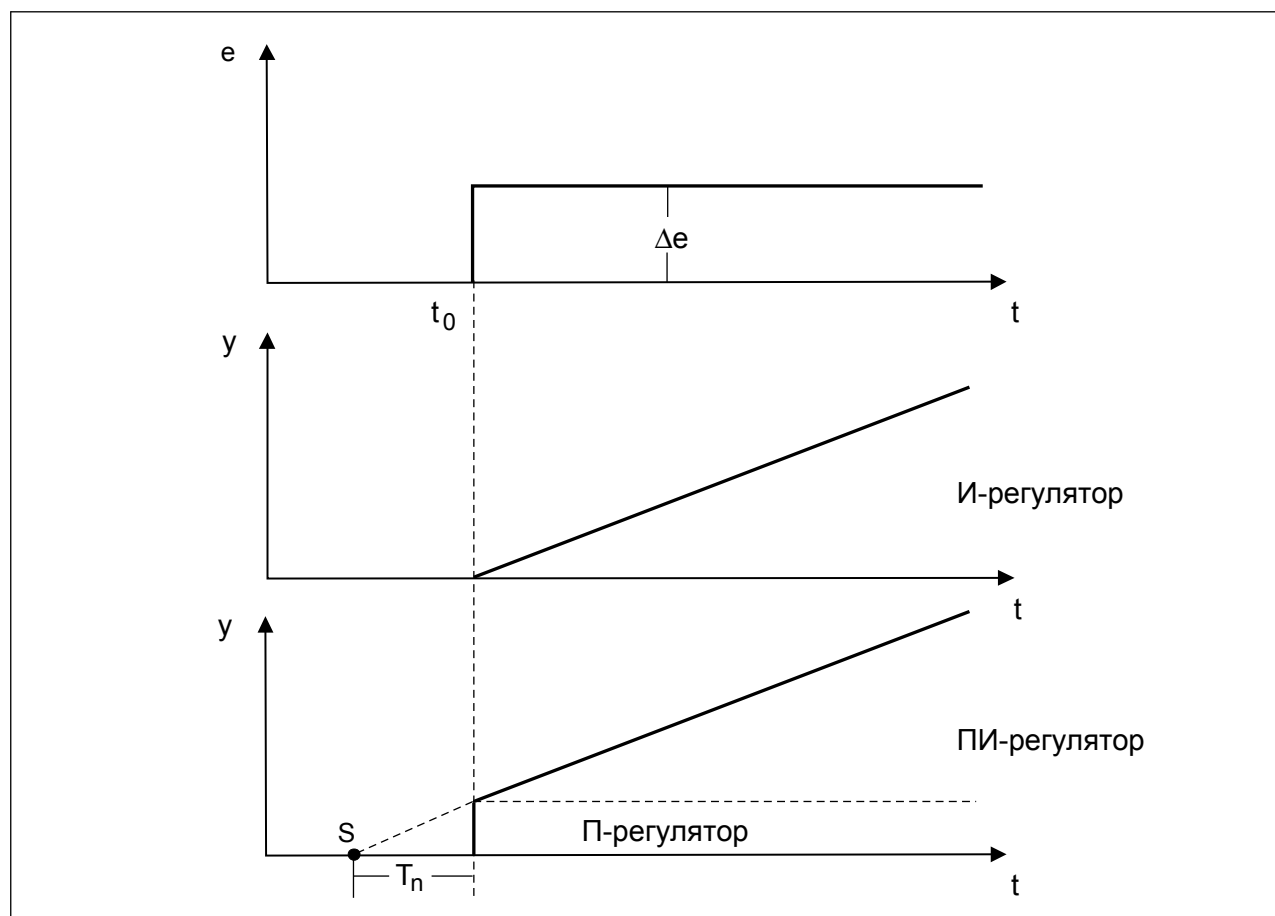


Рисунок 40: Переходная характеристика ПИ-регулятора

У ПИ-регулятора можно настраивать два параметра: Чем меньше  $X_p$ , тем больше вклад пропорциональной составляющей. Вклад интегральной составляющей также становится

### 3 Регуляторы непрерывного действия

больше, если задавать меньшие значения  $T_n$ .

Если записать переходную характеристику ПИ-регулятора (Рисунок 40), то по графику управляющего сигнала можно определить заданное на регуляторе  $T_n$ . Линейный ход управляющего сигнала следует продолжить влево. Время от точки пересечения с временной осью до скачка является временем отставания.

При постоянном рассогласовании управляющий сигнал меняется в соответствии со следующим уравнением:

$$\Delta y = \frac{1}{X_p} \cdot 100\% \cdot \left( \Delta e + \frac{1}{T_n} \cdot \Delta e \cdot t \right) \quad (18)$$

или, раскрывая скобки:

$$\Delta y = \underbrace{\frac{100\%}{X_p} \cdot \Delta e}_{\text{пропорциональная составляющая}} + \underbrace{\frac{100\%}{X_p} \cdot \frac{1}{T_n} \cdot \Delta e \cdot t}_{\text{интегральная составляющая}} \quad (19)$$

Как можно увидеть из уравнения, задание параметра  $X_p$  также влияет на интегрирующее поведение: Если уменьшить  $X_p$ , то интегральная составляющая будет также работать быстрее. Эта тема будет рассмотрена более детально в главе 3.5.1 «Блок-схема ПИД-регулятора».

Для практиков здесь важно следующее. Чем меньше задаются  $X_p$  и  $T_n$ , тем больше передаточный коэффициент (уменьшение  $X_p$ ), и тем быстрее работает интегральная составляющая (уменьшение  $T_n$ ).

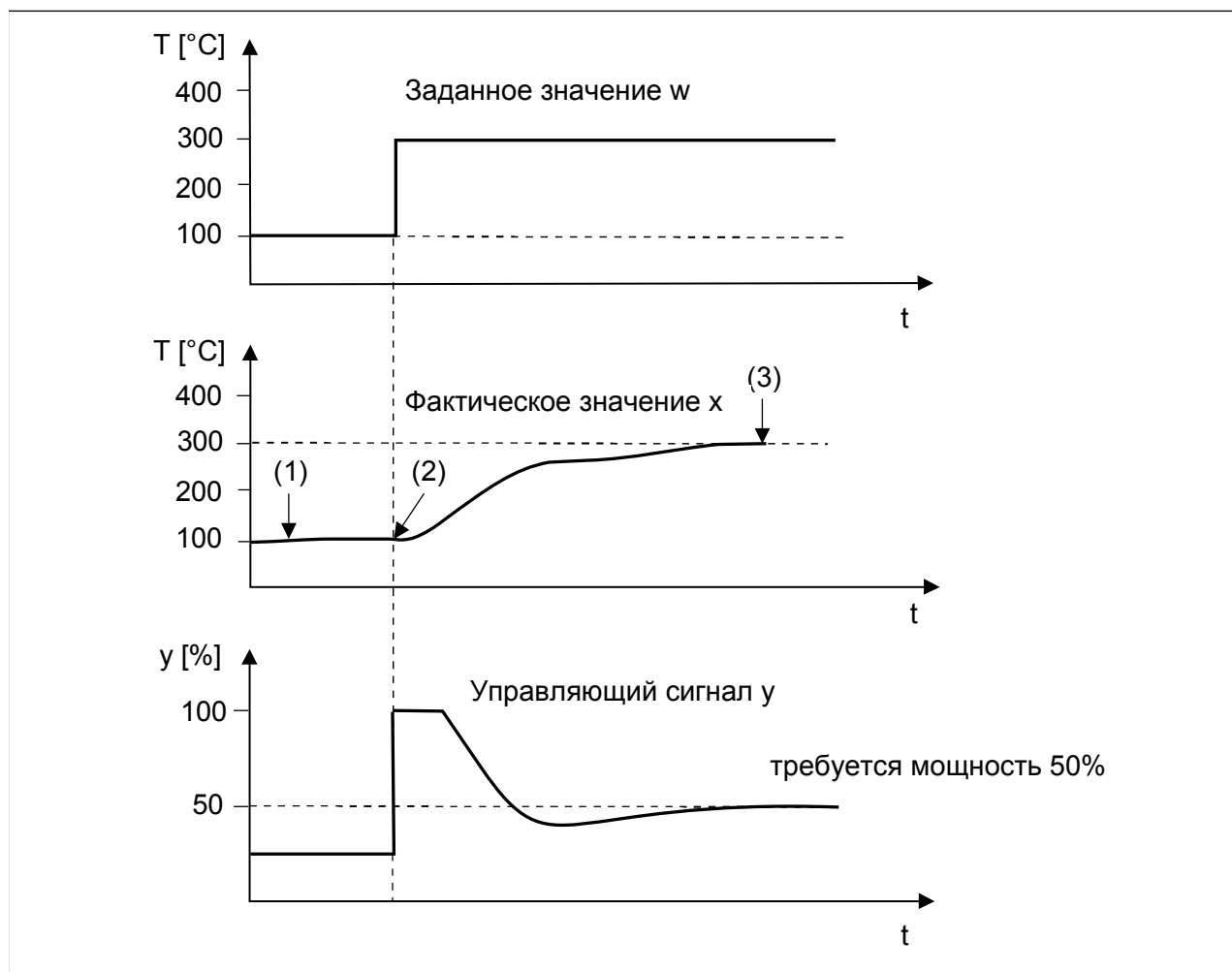
Если рассогласование не остается постоянным, то регулятор работает в соответствии со следующим уравнением:

$$\Delta y = \frac{100\%}{X_p} \cdot \left( e + \frac{1}{T_n} \cdot \int_{t_0}^t e \cdot dt \right) \quad (20)$$

#### ПИ-регулятор в замкнутом контуре регулирования

На Рисунке 41 показано поведение ПИ-регулятора в замкнутом контуре регулирования:

### 3 Регуляторы непрерывного действия



**Рисунок 41: ПИ-регулятор в замкнутом контуре регулирования**

На Рисунке 41 показаны фактическая величина, заданная величина и управляющий сигнал для ПИ-регулятора, используемого для регулирования температуры:

- (1) Заданная величина составляет 100  $^{\circ}\text{C}$ , регулятор довел рассогласование до 0 и выдает управляющий сигнал 25 %. Управляющий сигнал может выдаваться только интегральной составляющей, так как пропорциональная составляющая не работает (рассогласование равно 0).
- (2) Заданное значение меняется до 300  $^{\circ}\text{C}$ , управляющий сигнал подскакивает до 100 %. Изменение управляющего сигнала в первый момент задается пропорциональной составляющей, которая усиливает большое рассогласование. Управляющий сигнал пропорциональной составляющей уменьшается, поскольку рассогласование становится все меньше. Одновременно интегральная составляющая продолжает интегрировать рассогласование и увеличивает свой управляющий сигнал до тех пор, пока рассогласование не будет равно 0.
- (3) В отрегулированном состоянии интегральная составляющая продолжает выдавать накопленный управляющий сигнал (в данном примере 50 %).

## 3 Регуляторы непрерывного действия

---

### 3.4 ПД-регулятор

Дифференциальная составляющая реагирует на изменения регулируемой величины и противодействует им.

По этой причине дифференциальная составляющая никогда не используется сама по себе, а только в комбинации пропорциональной или пропорционально-интегральной составляющей. В этой главе мы рассмотрим, как действует регулятор вместе с дифференциальной составляющей.



### 3 Регуляторы непрерывного действия

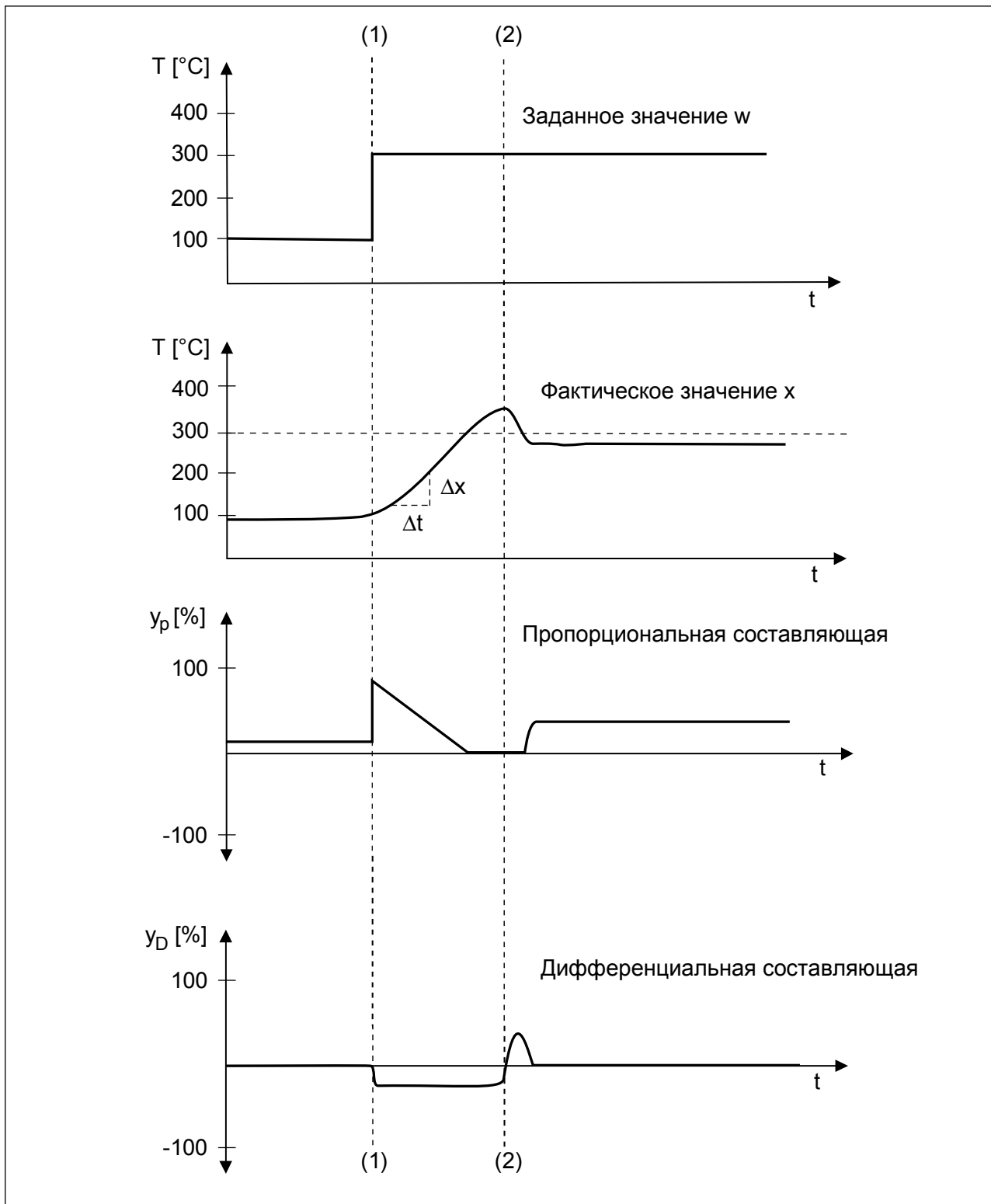


Рисунок 42: ПД-регулятор в замкнутом контуре регулирования

### 3 Регуляторы непрерывного действия

---

В отношении действия дифференциальной составляющей следует рассмотреть две ситуации:

- В контуре регулирования фактическое значение достигло устойчивого конечного значения. Из-за возмущения фактическое значение становится меньше. Тогда дифференциальная составляющая дает дополнительный положительный вклад в управляющий сигнал, который помогает изменить фактическое значение в сторону больших значений.
- Если же происходит увеличение заданного значения, то фактическое значение в контуре регулирования также увеличивается. Дифференциальная составляющая распознает увеличение фактического значения и при помощи отрицательного управляющего сигнала тормозит изменение в направлении нового конечного значения. Этот случай показан на Рисунке 42.

На Рисунке 42 показаны фактическое и заданное значение для ПД-регулятора в замкнутом контуре регулирования. Кроме этого, приведены графики управляющих сигналов, формируемых пропорциональной и дифференциальной составляющими.

#### **Пропорциональная составляющая**

В начале графика установлено заданное значение  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , фактическое значение лежит немного ниже  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этим определяются рассогласование и управляющий сигнал пропорциональной составляющей.

Если теперь в момент (1) установлено заданное значение  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то сначала возникает большое рассогласование, из-за чего формируется большой пропорциональный управляющий сигнал. Через небольшое время рассогласование становится меньше, и, следовательно, уменьшается также пропорциональный управляющий сигнал. Когда фактическое значение становится больше заданного, то пропорциональный управляющий сигнал становится равным  $0\%$ . Когда через некоторое время фактическое значение оказывается лежащим ниже заданного значения, то снова устанавливается пропорциональный управляющий сигнал  $> 0\%$ .

#### **Рассмотрим теперь дифференциальную составляющую:**

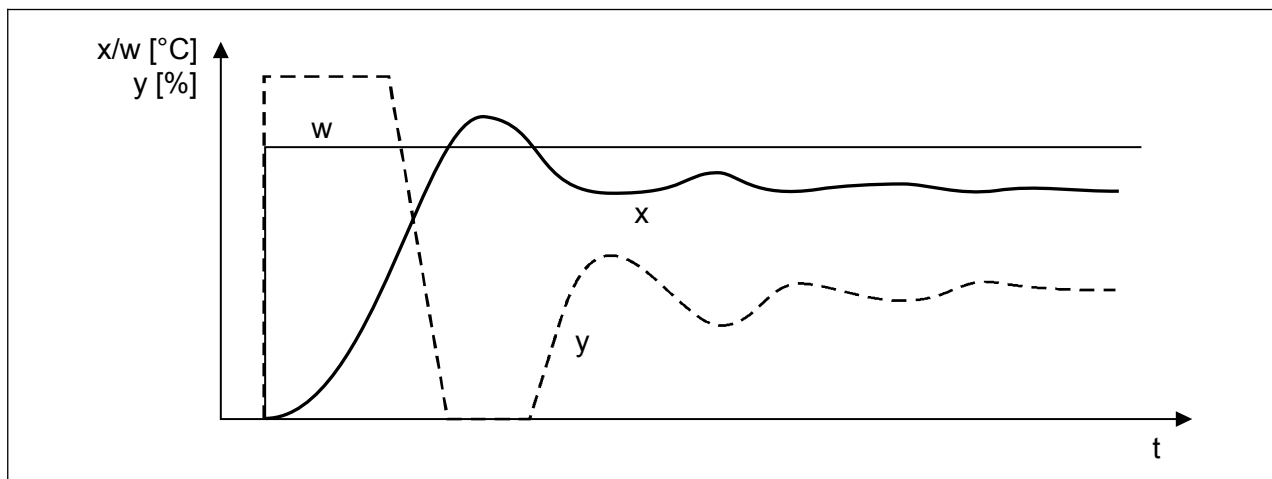
В начале графика фактическое значение остается постоянным. Поэтому дифференциальная составляющая не формирует никакого управляющего сигнала. Начиная с момента времени (1) фактическое значение возрастает: Дифференциальная составляющая распознает возрастающее фактическое значение и формирует отрицательный управляющий сигнал. Этот управляющий сигнал вычитается из пропорционального сигнала, и суммарный управляющий сигнал становится меньше, а возрастание фактического значения – медленнее.

Дифференциальная составляющая постоянно следит за фактическим значением и определяет его крутизну. Чем круче изменяется фактическое значение, тем выше становится сигнал дифференциальной составляющей. В момент (2) наклон фактического значения равен  $0$ . Это означает, что дифференциальная составляющая также равна  $0\%$ . После момента (2) фактическое значение начинает падать. Здесь дифференциальная составляющая также противодействует изменению, формируя положительный управляющий сигнал, который добавляется к пропорциональной составляющей.

Пользователь может менять силу дифференциальной составляющей. Чем больше постоянная дифференцирования  $T_V$ , тем интенсивнее описанное действие.

Поясним еще раз действие дифференциальной составляющей в замкнутом контуре регулирования. Сначала рассмотрим поведение ПД-регулятора, в котором дифференциальная составляющая отключена ( $T_V = 0\text{ с}$ ), см. Рисунок 43:

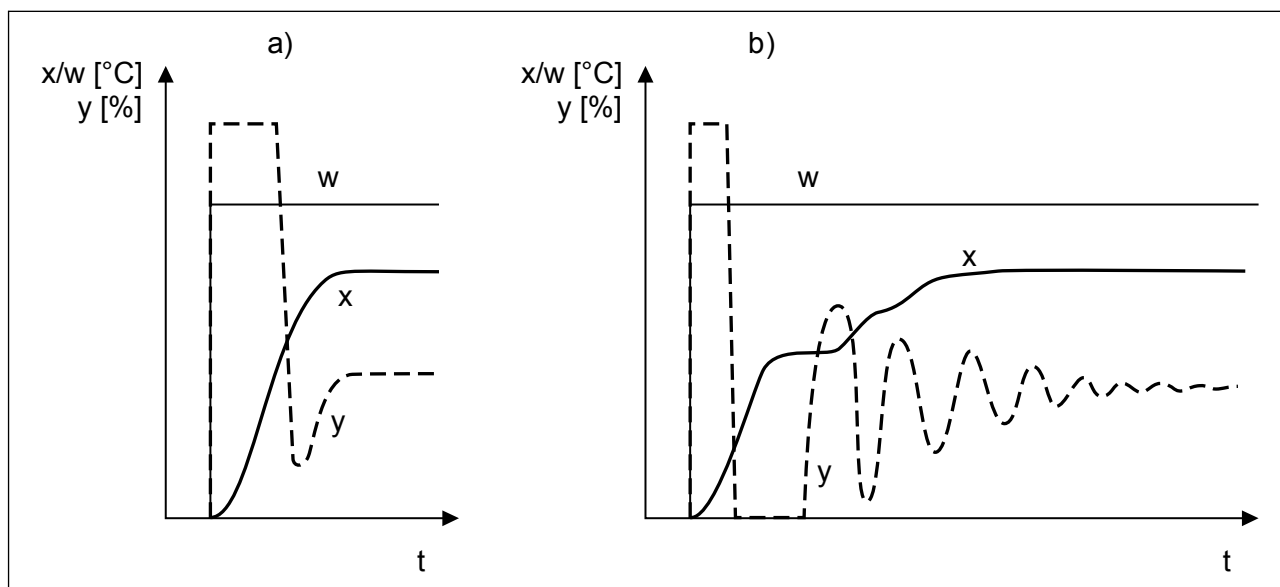
### 3 Регуляторы непрерывного действия



**Рисунок 43:** ПД-регулятор с  $T_V = 0$  с (дифференциальная составляющая отключена), П-регулятор

На Рисунке 43 показано, что поведение контура регулирования носит осциллирующий характер (причина: задано относительно маленькое значение  $X_p$ , а  $T_V$  равно 0 с).

При помощи Рисунка 44 а) мы хотим продемонстрировать, как, выбирая хорошее значение  $T_V$ , обеспечивающее демпфирование, можно добиться гораздо более спокойного поведения:



**Рисунок 44:** ПД-регулятор а) с оптимальным значением  $T_V$  и б) со слишком большим значением  $T_V$

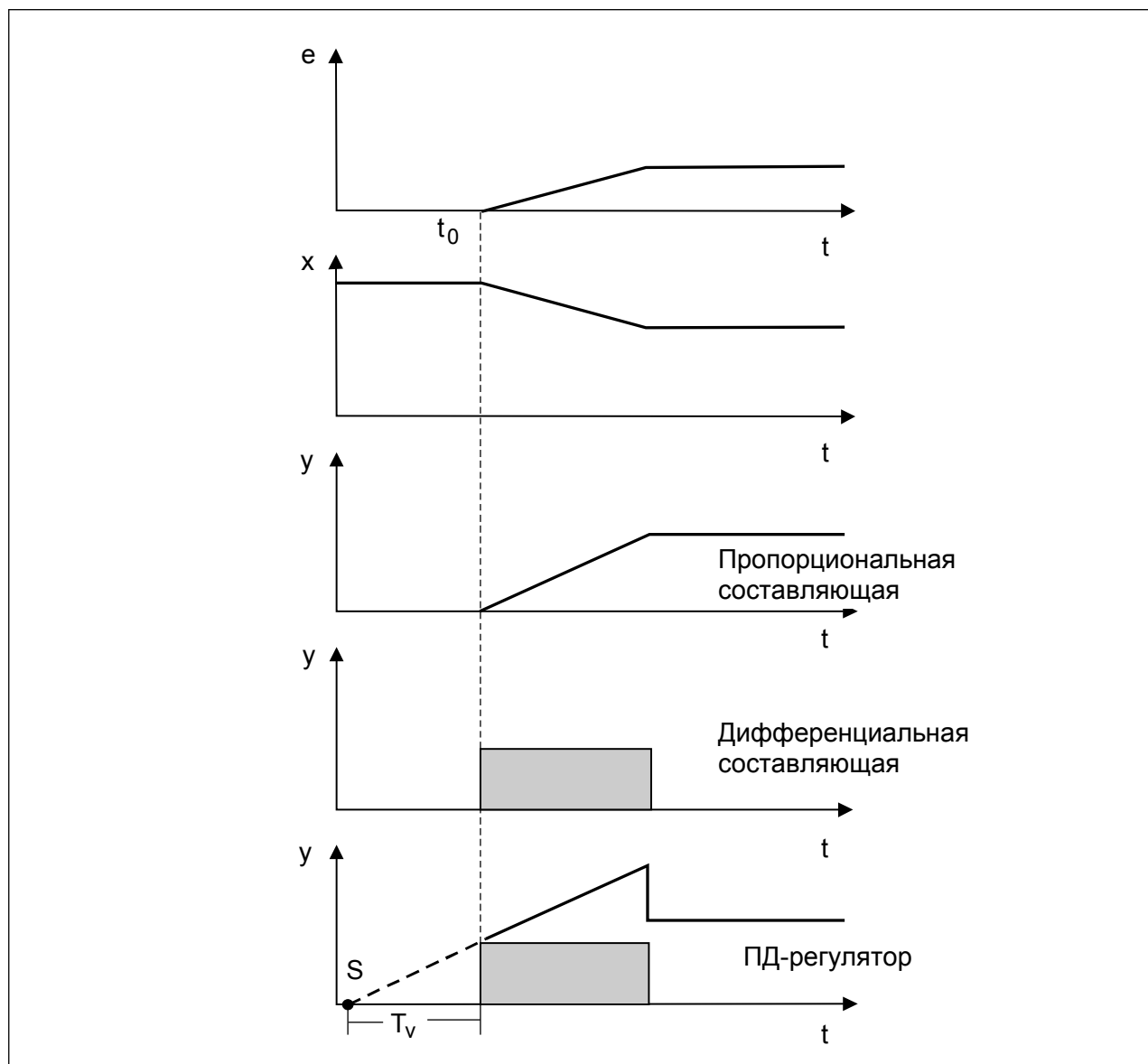
Дифференциальная составляющая следит за фактическим значением (Рисунок 44 а) и уменьшает суммарный управляющий сигнал тем больше, чем быстрее меняется фактическое значение (демпфирующее действие).

На Рисунке 44 б) задано слишком большое значение  $T_V$ : После изменения заданного значения пропорциональная компонента формирует управляющий сигнал 100 %. Когда дифференциальная составляющая распознает возрастание фактического значения, она уменьшает суммарный управляющий сигнал (в данном примере до 0 %), в результате чего график фактического значения приближается к горизонтальному. Ввиду меньшей скорости

### 3 Регуляторы непрерывного действия

изменения фактического значения дифференциальная составляющая снижает свой отрицательный управляющий сигнал, и в результате фактическое значение снова начинает нарастать быстрее. Ввиду увеличения скорости роста фактического значения дифференциальная составляющая снова начинает менять суммарный управляющий сигнал...

На Рисунке 44 показана реакция ПД-регулятора на линейно нарастающее воздействие, по которой можно определить заданное  $T_V$ :



**Рисунок 45: Реакция ПД-регулятора на линейно нарастающее воздействие**

На Рисунке 45 сверху показано рассогласование (оно непрерывно возрастает). Чтобы вызвать реакцию дифференциальной составляющей, изменение рассогласование должно происходить за счет изменения фактического значения. Поэтому здесь показан график фактического значения. Далее следуют пропорциональная составляющая, дифференциальная составляющая и результирующий суммарный управляющий сигнал.

Пропорциональная составляющая в каждый момент времени усиливает текущее рассогласование. Как только фактическое значение падает, дифференциальная составляющая формирует положительный управляющий сигнал, который способствует тому, чтобы нулевое рассогласование было достигнуто как можно быстрее. Управляющий сигнал дифференциальной

## 3 Регуляторы непрерывного действия

составляющей пропорционален наклону графика фактического значения ( $\Delta x / \Delta t$ ) и, кроме этого, заданному  $T_V$ .

Если рассмотреть суммарный управляющий сигнал и продолжить линейный ход влево, то можно по расстоянию от точки пересечения с временной осью до начала линейного хода определить  $T_V$  данного регулятора.

Для ПД-регулятора, например, для регулирования нагрева, уравнение при линейном ходе с постоянным наклоном имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \left( e - T_V \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \quad (21)$$

При меняющемся фактическом значении управляющий сигнал ведет себя в соответствии со следующим уравнением:

$$y = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \left( e - T_V \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (22)$$

$\frac{dx}{dt}$  задает наклон графика фактического значения (например, при регулировании температуры в К/с).

### 3.4.1 Практическая дифференциальная составляющая – $DT_1$ -элемент

В принципе, можно также рассмотреть переходную характеристику ПД-регулятора, как это делалось ранее для П- или ПИ-регулятора. Однако скорость изменения сигнала при скачке будет бесконечно большой. Поэтому дифференциальный сигнал, являющийся производной скачка, теоретически должен быть бесконечно высокой и бесконечно узкой импульсной функцией (Рисунок 46).

Это означает, что теоретически управляющий сигнал должен был бы на бесконечно короткое время принять бесконечно большое значение, а затем немедленно снова вернуться к управляющему сигналу, сформированному пропорциональной составляющей. Но, с одной стороны, как по механическим, так и по электрическим причинам, это невозможно, а с другой стороны, столь короткий импульс не оказал бы почти никакого влияния на объект регулирования. На практике избегают немедленного падения сигнала, строя дифференциальную составляющую при помощи  $DT_1$ -звена. Это звено состоит из дифференциальной составляющей, уже знакомой нам по этой главе, последовательно соединенной с  $T_1$ -звеном.

На Рисунке 46 показана переходная характеристика «практической дифференциальной составляющей».  $T_1$  является постоянной времени  $T_1$ -звена. На практике значение этой постоянной задается равным  $T_V / 4$ , и при изменении  $T_V$  она меняется в этом соотношении. Из переходной характеристики «практической дифференциальной составляющей» можно, пользуясь соотношением  $T_1 = T_V / 4$ , из  $T_1$  определить постоянную дифференцирования  $T_V$ .  $T_1$  задается производителем, и пользователь не может ее менять.

### 3 Регуляторы непрерывного действия

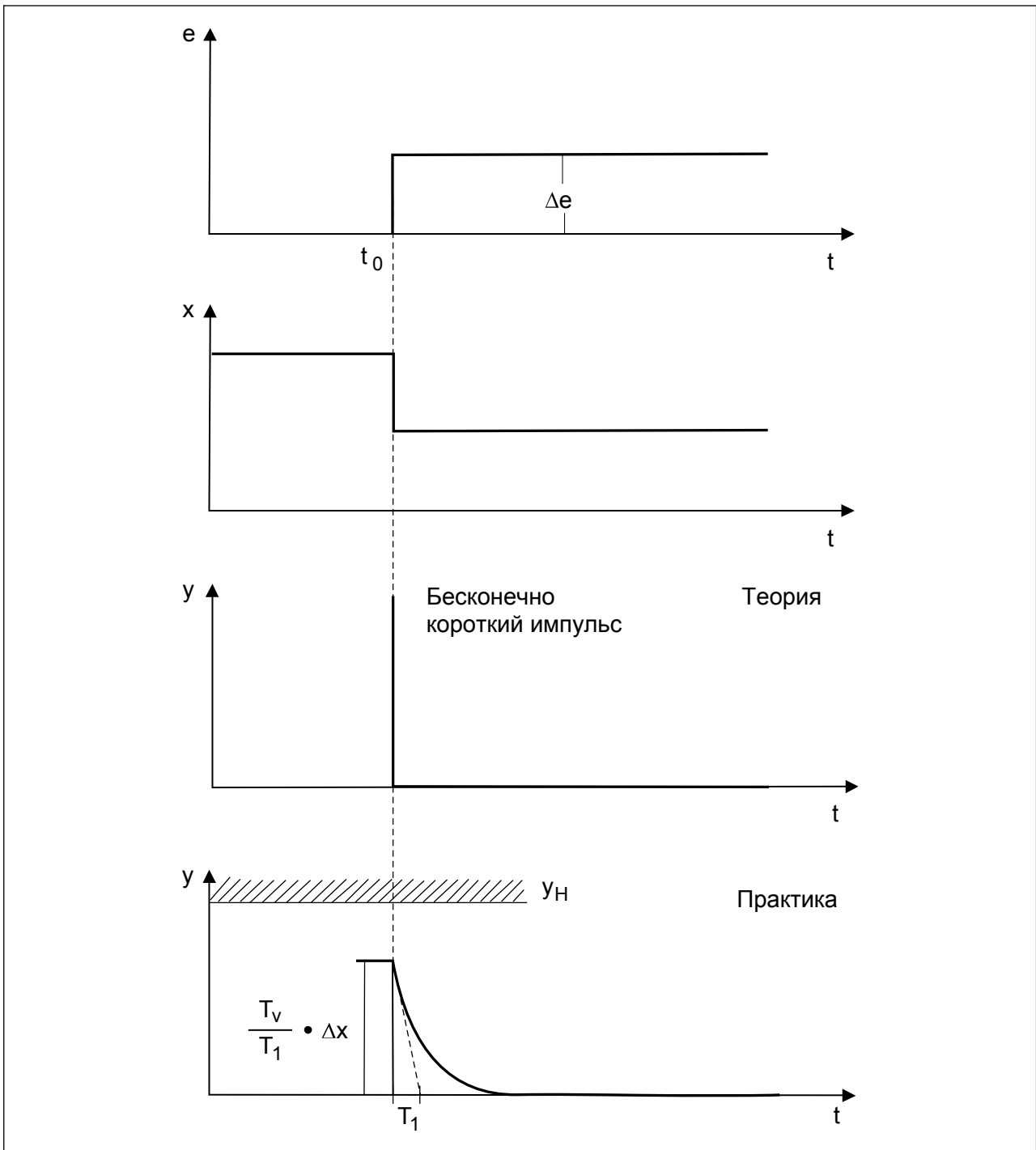
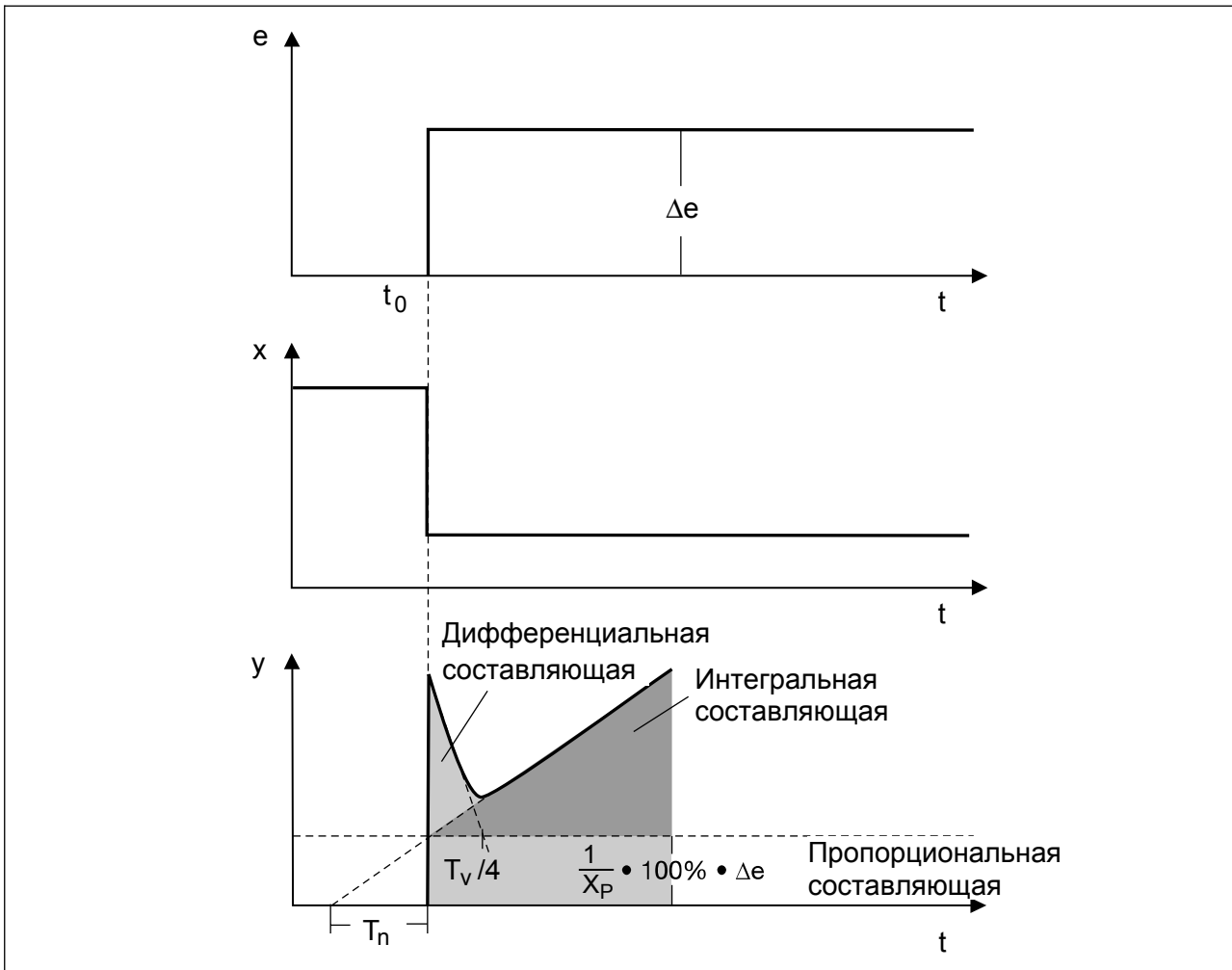


Рисунок 46: Переходная характеристика  $DT_1$ -звена

### 3.5 ПИД-регулятор

Из всех регуляторов самое широкое применение получил ПИД-регулятор. У этого типа регуляторов необходимо настраивать параметры  $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$ , которые можно определить из переходной характеристики:



**Рисунок 47:** Переходная характеристика ПИД-регулятора

Пропорциональная и интегральная составляющие берут за основу рассогласование, тогда как дифференциальная составляющая реагирует на изменение фактической величины. Поэтому изменение рассогласования (Рисунок 47) должно быть результатом изменения фактического значения. Фактическое значение также нанесено на график.

Если фактическое значение неожиданно уменьшается, дифференциальная составляющая немедленно формирует положительный управляющий сигнал, чтобы противодействовать динамике фактического значения. Пропорциональная составляющая вначале также образует положительный управляющий сигнал, так как она усиливает рассогласование. В дополнение к этому, интегральная составляющая наращивает свой управляющий сигнал в соответствии с рассогласованием, однако линейный ход интегральной составляющей становится заметным лишь тогда, когда она достигает уровня дифференциальной составляющей.

Уравнение для этого регулятора имеет следующий вид:

### 3 Регуляторы непрерывного действия

$$\Delta y = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \cdot \left( e + \frac{1}{T_n} \cdot \int e \cdot dt - T_v \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (23)$$

Параметры регулирования оказывают разное влияние на отдельные составляющие:

**Большее  $X_P$  соответствует меньшей пропорциональной составляющей**

→ меньший коэффициент усиления: более устойчивое, но и более инерционное поведение

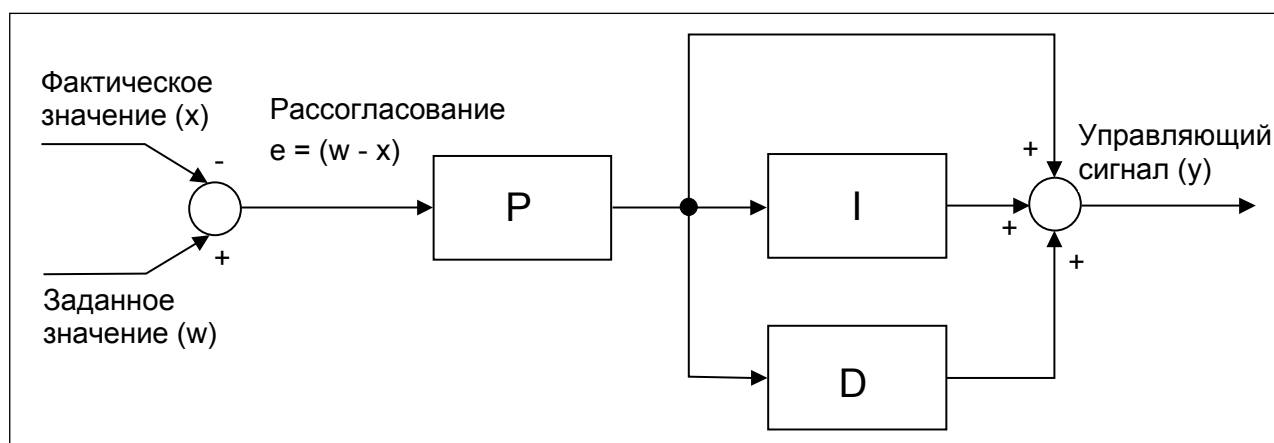
**Большее  $T_n$  соответствует меньшей интегральной составляющей**

→ более медленное интегрирование: более устойчивое, но и более инерционное поведение

**Большее  $T_v$  соответствует большей дифференциальной составляющей**

→ более сильное противодействие изменению фактического значения: более устойчивое поведение, однако  $T_v$  следует выбирать не слишком большим

#### 3.5.1 Блок-схема ПИД-регулятора



**Рисунок 48: Блок-схема ПИД-регулятора**

Как можно было увидеть в этой главе из уравнений, описывающих поведение ПИ-, ПД- и ПИД-регулятор, на поведение интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора влияют не только значения параметров  $T_n$  и  $T_v$ , но передаточный коэффициент пропорциональной составляющей, определяемый величиной  $X_P$ .

Если у ПИД-регулятора вдвое увеличить передаточный коэффициент пропорциональной составляющей (вдвое уменьшив  $X_P$ ), то удвоится не только сигнал пропорциональной составляющей, но также и сигналы интегральной и дифференциальной составляющих.

#### **Пример:**

Пусть показанный на Рисунке 48 ПИД-регулятор имеет значения  $T_n = 10$  с и  $X_P = 100$  (дифференциальная составляющая в этом примере не учитывается). Допустим, что рассогласование равно 2.

В безразмерном рассмотрении пропорциональная составляющая обладает коэффициентом усиления 1  $\left( K_P = \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \right)$ .

Следовательно, рассогласование подается напрямую на интегральную составляющую. Из главы 3.2 «И-регулятор» мы уже знаем, что И-регулятору как раз требуется время  $T_n$ , чтобы в безразмерном отношении воспроизвести на выходе входной сигнал. Интегральной



### 3 Регуляторы непрерывного действия

---

составляющей понадобится, таким образом, 10 с на то, чтобы увеличить свой сигнал на 2 %. Теперь зададим  $X_p$  равным 50, усиление пропорциональной составляющей составляет 2.

Значит, рассогласование сначала усиливается с коэффициентом 2, а затем подается на интегральную составляющую. Через 10 с интегральная составляющая увеличит свой управляющий сигнал на 4 %. Действие интегральной составляющей также было усилено с коэффициентом 2. Преимуществом такой блок-схемы является то, что, уменьшая параметр  $X_p$ , можно добиться усиления работы всех составляющих регулятора.

**Изменение передаточного коэффициента пропорциональной составляющей в равной мере изменяет поведение интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора.**

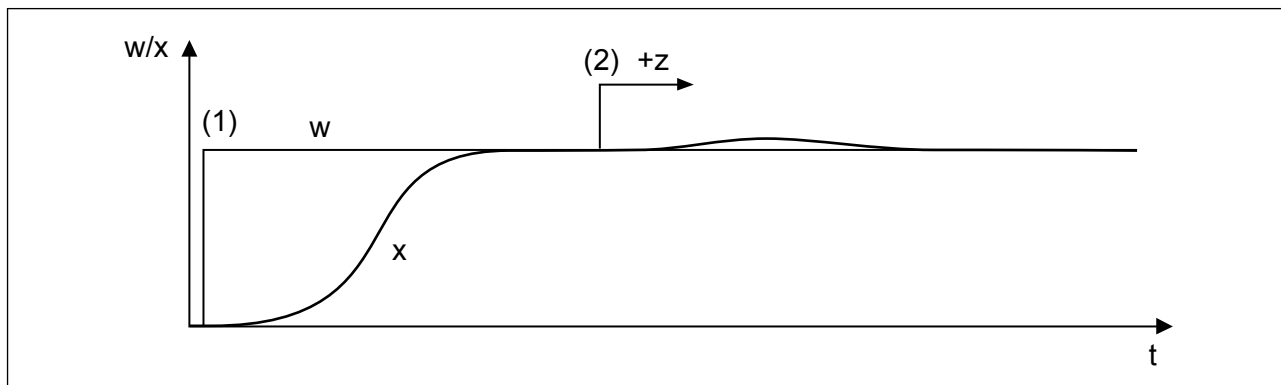
## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

### 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

Из этой главы вы узнаете, как в контуре регулирования определяется поведение при задающем и возмущающем воздействии и как выбираются параметры для стабильного поведения системы при регулировании.

Разбираемые ниже методы оптимизации помогают определить оптимальные параметры регулятора. В заключение мы укажем типы структур регуляторов, которые применяются для регулирования различных величин.

#### 4.1 Поведение при задающем / возмущающем воздействии



**Рисунок 49: Поведение контура регулирования при задающем и возмущающем воздействии**

На Рисунке 49 в момент времени (1) происходит переход к новому заданному значению. Показанное поведение системы является достаточно хорошим: фактическое значение относительно быстро стремится в направлении заданного и достигает его без перерегулирования.

В момент (2) меняется возмущающее воздействие, что приводит к появлению рассогласования. Регулятор противодействует этому, меняя управляющий сигнал (в нашем примере выходной сигнал уменьшается), пока фактическое значение снова не достигнет заданного.

При описании поведения системы при регулировании различают поведение при задающем и возмущающем воздействии.

При изучении поведения при задающем воздействии исследуют, как после перехода к новому заданному значению происходит доведение рассогласования до 0. Поведением при возмущающем воздействии называют поведение контура регулирования после появления возмущения.

Регулятор может быть оптимизирован для задающего воздействия, в этом случае заданное значение достигается максимально быстро, без перерегулирования. Если на этот регулятор воздействуют возмущения (на Рисунке «+z»), то они устраняются не с максимальной возможной скоростью, так как регулятор, оптимизированный для управляющего воздействия, настроен не на максимальную скорость реакции ( $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$  имеют тенденцию к увеличению).

Чтобы добиться хорошего поведения при возмущающем воздействии, регулятор должен работать быстрее (должны быть заданы меньшие значения  $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$ ). Однако в этом случае, когда происходит переход к новому заданному значению, у фактического значения возникает пик перерегулирования.

Таким образом, регулятор, в зависимости от применения, должен быть оптимизирован либо для задающего, либо для возмущающего воздействия. На практике часто приходят к компромиссу:

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

Выбирают такие параметры, при которых возмущения устраняются как можно быстрее, но чтобы при переходе к новому заданному значению не возникало перерегулирования, или, по крайней мере, пик перерегулирования лежал в допустимых пределах.

Если один из регуляторов фирмы JUMO должен оптимально работать и при задающем, и при возмущающем воздействии, можно определить и сохранить два набора соответствующих параметры. Они будут активироваться при соответствующих условиях. Если фактическое значение находится вне некоторого заданного диапазона вокруг заданного значения, то активируется набор параметров для оптимального поведения при задающем воздействии. Когда фактическое значение попадает в этот диапазон, включается набор параметров для оптимального поведения при возмущающем воздействии.

### 4.2 Устойчивое и неустойчивое поведение при регулировании

Почти всякий контур регулирования можно заставить работать неустойчиво, неправильно задавая параметры регулятора:

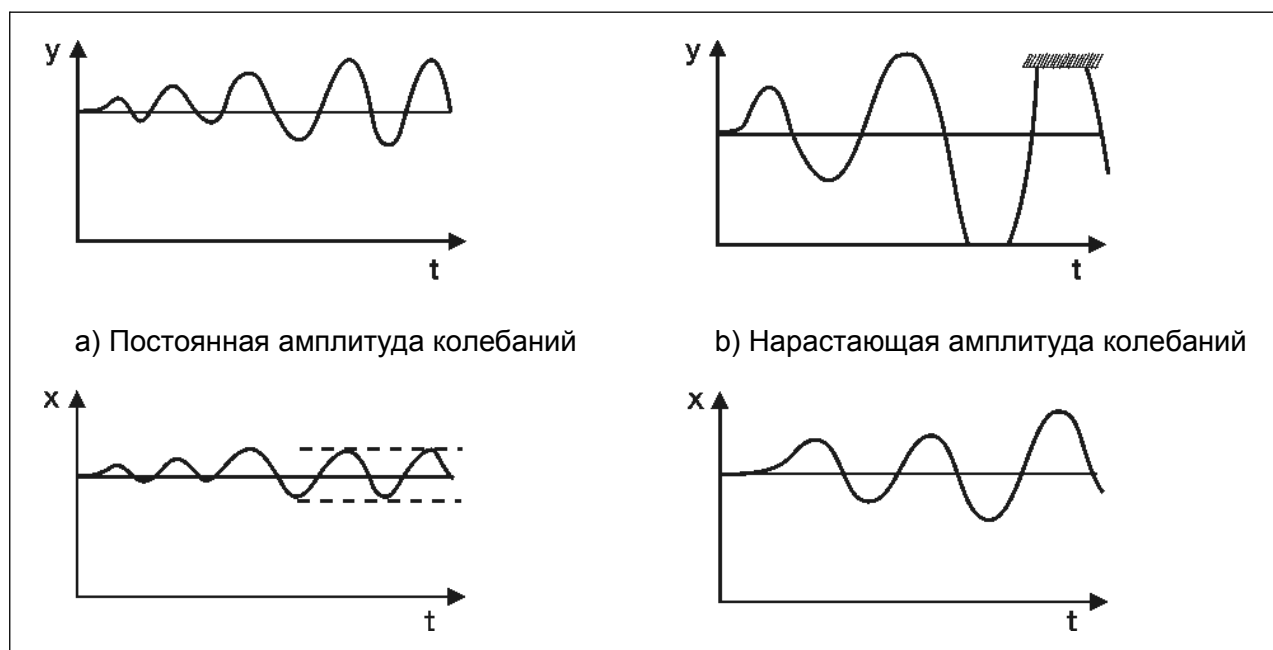


Рисунок 50: Неустойчивый контур регулирования

Неправильная настройка регулятора может привести к тому, что возникнут осцилляции управляющего сигнала (Рисунок 50, а). Управляющий сигнал возбуждается и, в конце концов, начинает совершать колебания между минимальным и максимальным значением. Осциллирующий управляющий сигнал приводит к неустойчивому фактическому значению.

Периодические колебания управляющего сигнала могут стать настолько сильными, что он будет колебаться между 0 и 100 % (Рисунок 50, б). Соответственно этому, будет возникать высокая амплитуда колебаний фактического значения. Контур регулирования становится неустойчивым, когда  $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$  слишком малы (передаточный коэффициент пропорциональной составляющей слишком велик, интегральная составляющая интегрирует слишком быстро, демпфирование слишком слабо). Чтобы добиться устойчивости, можно, например, начать с увеличения  $X_p$ . Если не достигнуто более спокойное поведение управляющего сигнала и фактического значения, можно увеличить пару значений  $T_n$  и  $T_v$  (рекомендуется сначала проверить, соответствует ли  $T_v$  примерно  $T_n / 4$ , так как это соотношение является близким к оптимальному в большинстве случаев). Следует задать соответствующее значение  $T_v$ . Затем пару значений  $T_v$  и  $T_n$  можно увеличивать, сохраняя указанное соотношение.

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

### 4.3 Методы оптимизации

В этом разделе мы опишем четыре различных метода оптимизации, которые применимы исключительно в случае объектов с выравниванием.

Общим у этих методов является то, что оптимизацию необходимо проводить при реальных условиях (например, оптимизация не должна проводиться для пустой печи, если необходимо найти параметры для печи, заправленной материалом).

#### Методы включают:

Метод незатухающих колебаний (Циглер и Николс) – для быстрых объектов регулирования

Метод переходной характеристики (Чин, Хронес и Ресвик) – для медленных объектов

Метод скорости нарастания – для медленных объектов

Эмпирический метод – для быстрых объектов

Прежде чем начать оптимизацию одним из указанных методов, необходимо проверить, нельзя ли добиться хорошего результата при помощи самооптимизации, встроенной в регуляторы фирмы JUMO (Глава 7.1 «Самооптимизация»). В большинстве случаев она приводит к очень хорошему или, по крайней мере, удовлетворительному результату.

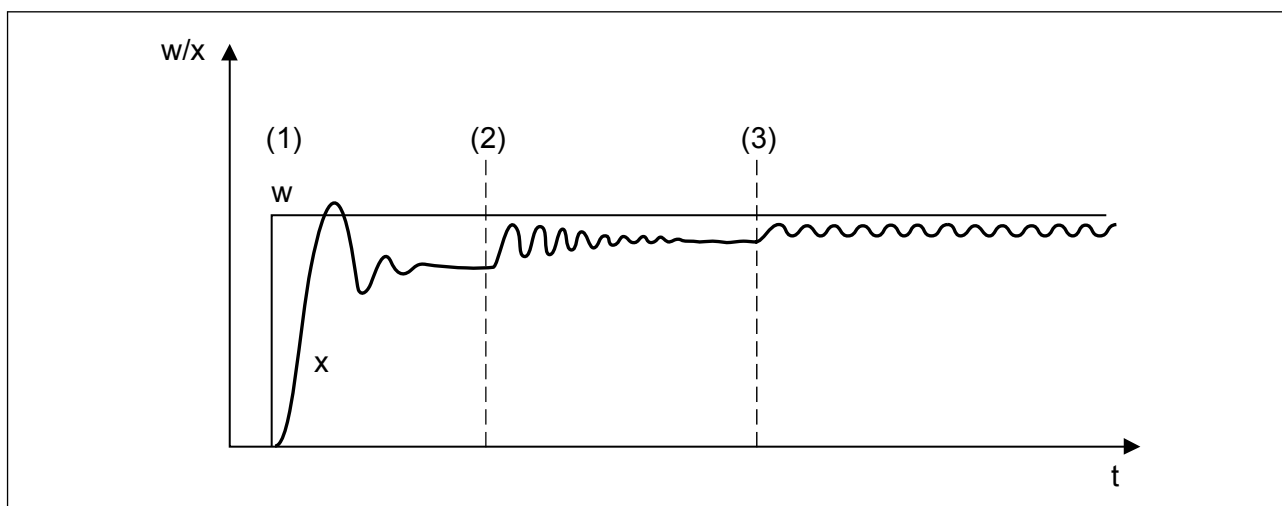
#### 4.3.1 Метод незатухающих колебаний по Циглеру и Николсу

Метод незатухающих колебаний по Циглеру и Николсу может применяться для относительно быстрых объектов регулирования (например, регуляторов скорости вращения).

Этот метод позволяет определить хорошие параметры для П-, ПИ- и ПИД-регуляторов.

При использовании метода контур регулирования намеренно делают неустойчивым:

Контур включается по схеме с П-регулятором, и задается относительно большое значение  $X_p$ , которое еще не приводит к неустойчивому поведению. Затем устанавливается заданное значение, лежащее в предполагаемой рабочей области (Рисунок 51 (1)).



**Рисунок 51:** Заданное и фактическое значение при использовании метода незатухающих колебаний

На Рисунке 51 (1) показано, как фактическое значение после нескольких колебаний приближается к заданному значению. Фактическое значение лежит ниже заданного, что понятно, так как речь идет о П-регуляторе.

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

Значение  $X_p$  уменьшают (Рисунок 51 (2)): Фактическое значение возрастает, и ему требуется уже большее время, чтобы достичь заданного значения. Зону пропорционального регулирования уменьшают по необходимости несколько раз, пока фактическое значение не войдет в режим периодических колебаний. Получающаяся кривая показана на Рисунке 51 (3). Критическое значение  $X_p$  ( $X_{pK}$ , начиная с которого возникают незатухающие колебания) следует определять как можно точнее.

Рассмотрим в деталях колебания фактического значения (Рисунок 52):

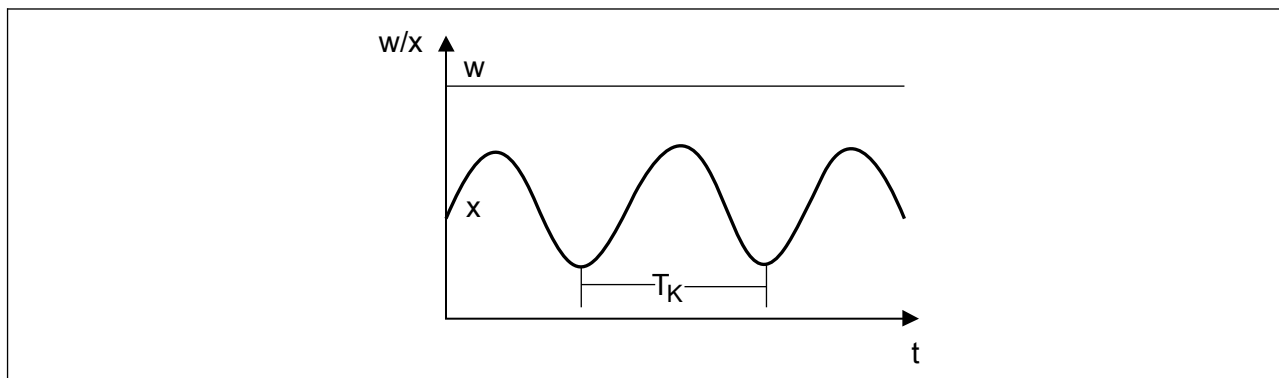


Рисунок 52: Критический период колебаний

Второй параметр, который требуется для этого метода, является критическим периодом колебаний ( $T_K$ ): Из колебаний фактического значения определяют, например, расстояние между двумя минимумами. Это значение (в секундах) вместе с  $X_{pK}$  (последняя настройка регулятора) заносятся в следующую таблицу:

Структура регулятора	Параметры регулирования
П	$X_p = X_{pK} / 0,5$
ПИ	$X_p = X_{pK} / 0,45$ $T_n = 0,83 \cdot T_K$
ПИД	$X_p = X_{pK} / 0,6$ $T_n = 0,5 \cdot T_K$ $T_v = 0,125 \cdot T_K$

Таблица 1: Формулы для настройки регулятора по методу незатухающих колебаний

### 4.3.2 Метод переходной характеристики по Чину, Хронесу и Ресвику

При использовании метода Чина, Хронеса и Ресвика даже для медленных объектов появляется возможность относительно быстрого определения параметров регулирования. Этот метод можно применять для объекта как минимум 2-го порядка.

Особенностью метода является то, что проводится различие между формулами для поведения при задающем и возмущающем воздействии.

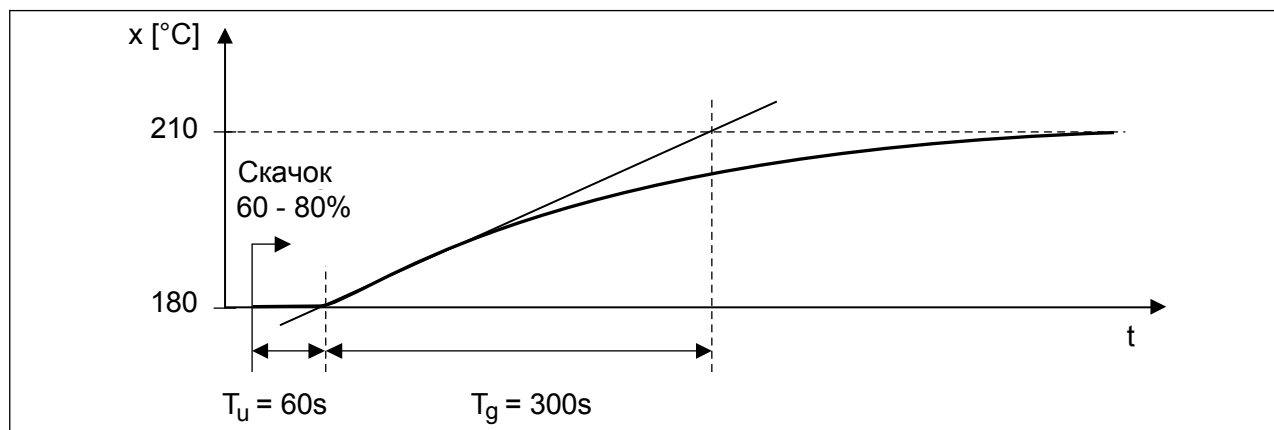
Для приводимой ниже таблицы необходимо из переходной характеристики определить передаточный коэффициент объекта, время задержки и время выравнивания. Глава 2.4 «Регистрация переходной характеристики для объектов с не менее чем двумя задержками и запаздыванием» содержит детальное описание того, как следует действовать в этом случае. Поэтому мы продемонстрируем метод на примере:

Для промышленной печи необходимо использовать ПИД-регулятор.

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

Целью является оптимальное поведение при возмущающем воздействии, типичные заданные значения лежат около 200 °С.

Сначала регулятор включается в ручной режим. Управляющий сигнал постепенно повышают, пока не будет достигнуто фактическое значение, которое лежит ниже того заданного значения, которое должно быть достигнуто в дальнейшем (необходимо выждать, пока установятся процессы выравнивания). Вполне возможно значение управляющего сигнала 60 %, при котором достигается температура 180 °С. Начиная от 60 %, управляющий сигнал повышается скачком до 80 %, после чего при помощи самописца регистрируется фактическое значение (графики нанесены на Рисунке 53).



**Рисунок 53:** Переходная характеристика промышленной печи

Строя касательную в точке перегиба, было найдено, например: время задержки  $T_u = 60$  с, время выравнивания  $T_g = 300$  с

При помощи Таблицы 2 можно найти параметры регулирования, близкие к оптимальным:

Структура регулятора	Задающее воздействие	Возмущающее воздействие
П	$X_P = 3,3 \cdot K_S \cdot (T_u / T_g) \cdot 100 \%$	$X_P = 3,3 \cdot K_S \cdot (T_u / T_g) \cdot 100 \%$
ПИ	$X_P = 2,86 \cdot K_S \cdot (T_u / T_g) \cdot 100 \%$ $T_n = 1,2 \cdot T_g$	$X_P = 1,66 \cdot K_S \cdot (T_u / T_g) \cdot 100 \%$ $T_n = 4 \cdot T_u$
ПИД	$X_P = 1,66 \cdot K_S \cdot (T_u / T_g) \cdot 100 \%$ $T_n = 1 \cdot T_g$ $T_v = 0,5 \cdot T_u$	$X_P = 1,05 \cdot K_S \cdot (T_u / T_g) \cdot 100 \%$ $T_n = 2,4 \cdot T_u$ $T_v = 0,42 \cdot T_u$

**Таблица 2:** Формулы для настройки регулятора по переходной характеристике

Передаточный коэффициент объекта вычисляется как изменение фактического значения, деленное на величину скачка.

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{210 \text{ °С} - 180 \text{ °С}}{80\% - 60\%} = \frac{30 \text{ К}}{20\%} = 1,5 \text{ К/\%}$$

Из найденных значений  $T_u$  и  $T_g$  получаются следующие параметры:

$$X_P = 1,05 \cdot K_S \cdot \frac{T_u}{T_g} \cdot 100\% = 1,05 \cdot 1,5 \frac{\text{К}}{\%} \cdot \frac{60 \text{ с}}{300 \text{ с}} \cdot 100\% = 31,5 \text{ К}$$

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

$$T_n = 2,4 \cdot T_u = 2,4 \cdot 60 \text{ с} = 144 \text{ с}$$

$$T_v = 0,42 \cdot T_u = 0,42 \cdot 60 \text{ с} \approx 25 \text{ с}$$

Скачок управляющего сигнала, с одной стороны, следует выбирать настолько большим, чтобы можно было определить переходную характеристику (ход фактического значения). С другой же стороны, следует убедиться, что скачок лежит в области ожидаемых заданных значений.

### Пример:

Типичная рабочая точка рассматриваемой промышленной печи равна 200 °С. Если происходит скачкообразное изменение управляющего сигнала, в результате которого фактическое значение оказывается, например, в области 70 °С, то анализ переходной характеристики, скорее всего, не позволит определить параметры регулирования, пригодные для 200 °С. При более низких температурах условия будут не такими, как при дальнейшей эксплуатации (по меньшей мере, передаточный коэффициент объекта будет здесь отличным от того, который будет наблюдаться в рабочем режиме, а он входит в вычисление  $X_p$ ).

### 4.3.3 Метод скорости нарастания

Метод скорости нарастания может применяться также для медленных объектов регулирования. В этом методе произвольный скачок подается объект регулирования лишь до тех пор, пока изменение фактического значения происходит с максимальной скоростью. Анализ фактического значения происходит, начиная с этого момента (не требуется выждать, пока оно достигнет своей конечной величины). Поэтому этот метод позволяет существенно экономить время. Объект должен быть – как и для метода переходной характеристики – не ниже, чем второго порядка.

Подготовительная работа для оптимизации регулятора печи, указанной в главе 4.3.2 «Метод переходной характеристики по Чину, Хронесу и Ресвику», будет очень сходной:

1. Установка управляющего сигнала, при котором достигается фактическое значение, меньшее дальнейшей рабочей точки (например, 180 °С при управляющем сигнале 60 %, следует дождаться завершения процессов выравнивания!).
2. Подача скачкообразного изменения управляющего сигнала 80 % и регистрация фактического значения.

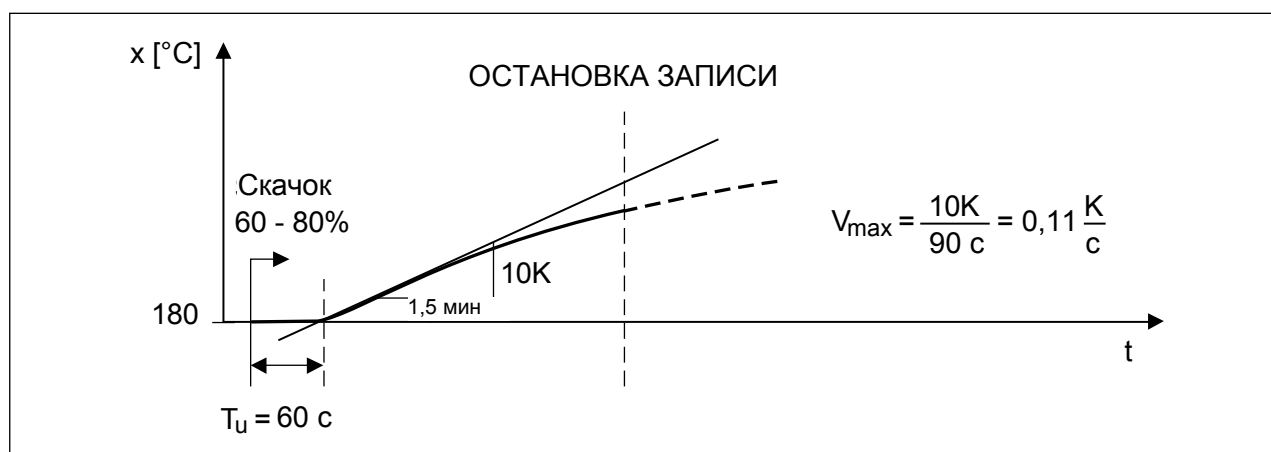


Рисунок 54: Поведение фактического значения в методе по скорости нарастания

После подачи скачка фактическое значение через некоторое время начинает нарастать. Запись можно остановить, когда скорость изменения фактического значения максимальна.

Также и при использовании этого метода необходимо построить касательную в точке перегиба и

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

определить время задержки. Для определения второго параметра на касательной строится треугольник нарастания сигнала. По нему определяется максимальная скорость нарастания:

$$V_{\max} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (24)$$

Полученное значение  $V_{\max}$  (в нашем примере около 0,11 К/с) вместе с найденным  $T_u$  (60 с) подставляется в следующие формулы:

Структура регулятора	Параметры регулирования	
П	$X_P = V_{\max} \cdot T_u \cdot y_H / \Delta y$	$y_H$ = максимальный управляющий сигнал (обычно 100 %) $\Delta y$ = скачок управляющего сигнала (в нашем примере 20 %)
ПИ	$X_P = 1,2 \cdot V_{\max} \cdot T_u \cdot y_H / \Delta y$ $T_n = 3,3 \cdot T_u$	
ПД	$X_P = 0,83 \cdot V_{\max} \cdot T_u \cdot y_H / \Delta y$ $T_v = 0,25 \cdot T_u$	
ПИД	$X_P = 0,83 \cdot V_{\max} \cdot T_u \cdot y_H / \Delta y$ $T_n = 2 \cdot T_u$ $T_v = 0,5 \cdot T_u$	

**Таблица 3: Формулы для оптимизации по скорости нарастания для объекта с выравниванием**

Для ПИД-регулятора в нашем примере получатся следующие значения:

$$X_P = 0,83 \cdot V_{\max} \cdot T_u \cdot \frac{y_H}{\Delta y} = 0,83 \cdot 0,11 \frac{\text{К}}{\text{С}} \cdot 60 \text{ с} \cdot \frac{100\%}{20\%} \approx 27,4 \text{ К} \quad (25)$$

$$T_n = 2 \cdot T_u = 2 \cdot 60 \text{ с} = 120 \text{ с} \quad (26)$$

$$T_v = 0,5 \cdot T_u = 0,5 \cdot 60 \text{ с} = 30 \text{ с} \quad (27)$$

### 4.3.4 Эмпирический метод определения параметров регулирования

При использовании этой процедуры определяются одна за другой настройки для пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющей, близкие к оптимальным. Начиная с исходного состояния, раз за разом производится переход к типичному заданному значению; поэтому этот метод применим только для относительно быстрых объектов (например, при регулировании скорости вращения или расхода жидкости).

Хотя в конечном итоге следует найти хорошие параметры для ПИД-структуры, начинают с режима П-регулятора. Мы задаем относительно большую зону пропорционального регулирования (ее величина зависит от объекта) и устанавливаем заданное значение, лежащее в предполагаемой рабочей области).

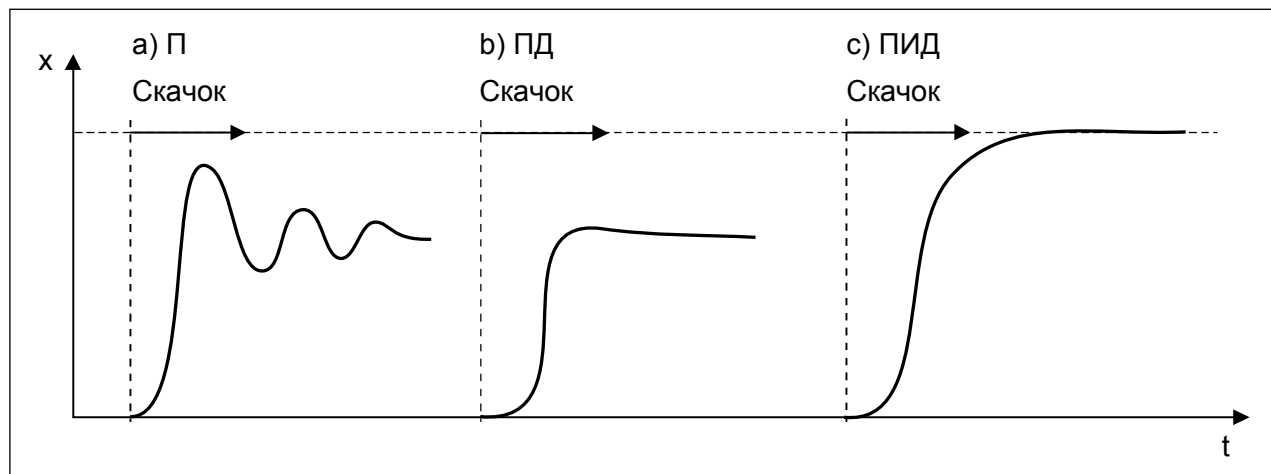
При этом мы увидим, что регулировка работает очень инерционно, и фактическое значение



## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

лежит существенно ниже заданного. Затем мы уменьшаем  $X_p$  и раз за разом подаем скачок заданного значения.

Мы уменьшаем зону пропорционального регулирования до тех пор, пока фактическое значение не станет достигать устойчивого значения после не более, чем двух-трех периодов колебаний. Мы получим устойчивое регулирование с остаточной погрешностью. Результат может выглядеть как на Рисунке 55 а).



**Рисунок 55: Настройка ПИД-регулятора эмпирическим методом**

Для демпфирования колебаний фактического значения мы активируем дифференциальную составляющую (теперь мы работаем с ПД-структурой регулятора). Начиная с очень маленького  $T_V$ , мы снова подаем скачок заданного значения, задавая все большее  $T_V$ . Значение  $T_V$ , близкое к оптимальному, найдено тогда, когда фактическое значение достигает своей конечной величины с минимальными возможными колебаниями.

**Если при подаче скачка заданного значения регулятор один или несколько раз формирует управляющий сигнал 0 %, то это означает, задано слишком большое  $T_V$ .**

Результат регулирования может выглядеть, как показано на Рисунке 55 б).

Затем регулятор переводится в режим ПИД, и активируется интегральная составляющая. Мы задаем  $T_I$  равным  $T_V \times 4$ . Результат регулирования может соответствовать примеру на Рисунке 55 в).

### **Примечание:**

Для некоторых объектов можно активировать не все составляющие (см. главу 4.4 «Какая структура регулятора используется для различных регулируемых величин?»). Если при использовании эмпирического метода оказывается, что на начальном этапе оптимизации П-структуры невозможно добиться устойчивого регулирования, то возможна только оптимизация И-регулятора.

Если для другого объекта регулирования выясняется, что при подключении дифференциальной составляющей (переключение с П- на ПД-структуру) контур регулирования становится неустойчивым, то выполняется оптимизация ПИ-регулятора.

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

### 4.3.5 Контроль настройки регулятора для ПИД-структуры

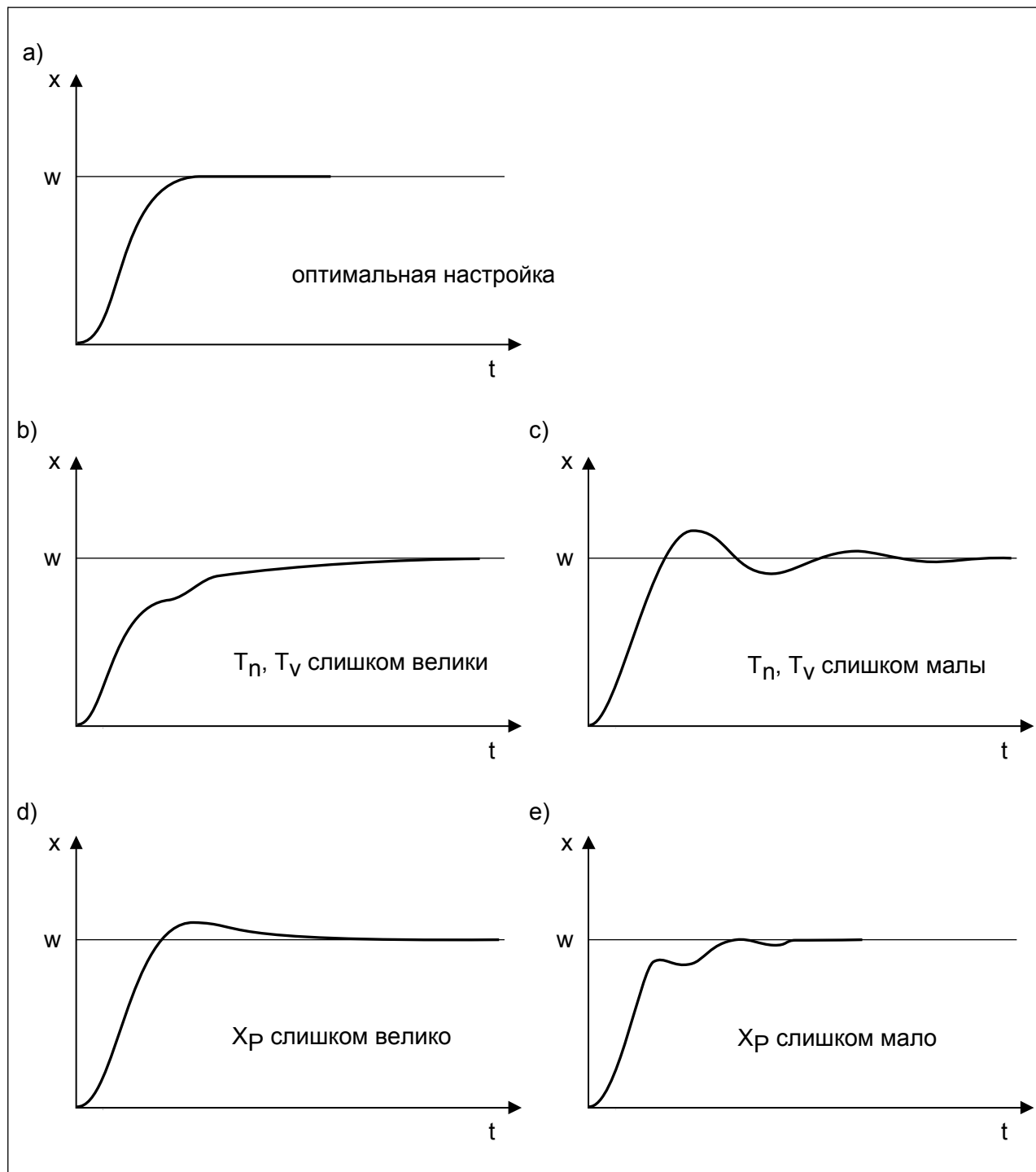


Рисунок 56: Указания на возможные ошибки

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

---

Рассмотрим графики более детально:

- a) Такого поведения при регулировании достигают при оптимальных настройках.
- b) При скачке заданного значения фактическое значение возрастает относительно круто, по-видимому, найдена хорошая настройка зоны пропорционального регулирования. Когда рассогласование становится меньше, уменьшается и скорость роста фактического значения. При уменьшении рассогласования управляющий сигнал, формируемый пропорциональной составляющей, становится все меньше: здесь, прежде всего, рассматривается интегральная составляющая. В нашем случае интегральная составляющая интегрирует медленно (задано слишком большое  $T_n$ , его следует уменьшить). В силу соотношения  $T_v = T_n / 4$  следует также уменьшить постоянную дифференцирования.
- c) В рассматриваемом случае задана слишком большая интегральная составляющая ( $T_n$  слишком мало): Интегральная составляющая интегрирует рассогласования, пока оно не станет равным 0. Интегральная составляющая формирует свой управляющий сигнал слишком быстро: Выходной сигнал становится слишком большим раньше, чем фактическое значение достигает заданного. Поэтому возникают осцилляции фактического значения вокруг заданного. В силу соотношения  $T_v = T_n / 4$  следует также увеличить постоянную дифференцирования.
- d) Этот пример поведения при регулировании указывает на задание слишком большой величины  $X_p$ : Когда подан скачок заданного значения, выходной сигнал за счет одной только пропорциональной составляющей доходит до 100 %. Интегральная составляющая на этом этапе еще не может сформировать управляющий сигнал. Если задано большое  $X_p$ , то фактическое значение попадает в зону пропорционального регулирования слишком рано, управляющий сигнал пропорциональной составляющей становится меньше 100 %, и интегральная составляющая может сформировать свой управляющий сигнал. В данном случае интегральной составляющей дается очень большое время на то, чтобы сформировать управляющий сигнал. Прежде, чем фактическое значение достигнет заданного, управляющий сигнал становится слишком большим, и возникает пик перерегулирования. Решением является заданием меньшего  $X_p$ : При скачке заданного значения фактическое значение в течение длительного времени находится ниже зоны пропорционального регулирования. Пропорциональная составляющая будет дольше выдавать сигнал 100 %, и интегральная составляющая начнет формировать свой управляющий сигнал позже – перерегулирование станет менее вероятным.
- e) Если задана слишком маленькая зона пропорционального регулирования, фактическое значение будет очень быстро двигаться в направлении заданного значения. Фактическое значение попадает в зону пропорционального регулирования относительно поздно (незадолго до достижения заданного значения), и управляющий сигнал уменьшает почти скачкообразно. С некоторой задержкой теперь падает и фактическое значение, что, вследствие относительно большого передаточного коэффициента пропорциональной составляющей, приводит к значительному повышению управляющего сигнала пропорциональной составляющей... В течение всего времени, помимо дифференциальной составляющей, действует также и интегральная составляющая, которая сокращает рассогласование. Большее значение  $X_p$  могло бы привести к более спокойному поведению фактического значения.

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

---

### 4.4 Какая структура регулятора используется для различных регулируемых величин?

В целом имеет место следующая ситуация:

Для большинства приложений ПИД-структура позволяет добиться лучшего поведения системы при регулировании. Однако существуют несколько регулируемых величин, требующих деактивации определенных составляющих. Например, дифференциальная составляющая, если регулируемая величина характеризуется беспокойным поведением, может приводить к неустойчивости.

Также и пропорциональная составляющая усиливает это беспокойное поведение, и может оказаться необходимым отключить ее.

Если отношение времени выравнивания к задержке относительно невелико (объект, с трудом поддающийся регулированию), может быть необходимым отключить пропорциональную и дифференциальную составляющую, так как иначе регулирование будет неустойчивым.

Указать структуру регулятора, оптимальную для различных регулируемых величин, непросто, поскольку она зависит также от конфигурации объекта. Для автора было важным ознакомить читателей со структурой, которая приводит к лучшим результатам в большинстве случаев, или является наиболее надежной (контур регулирования работает устойчиво).

#### **Температура**

Такие объекты всегда обладают выравниванием. Время выравнивания часто бывает существенно больше времени задержки. Для этого типа объектов почти всегда наилучшей является ПИД-структура.

#### **Давление**

У этих объектов соотношение время выравнивания / время задержки является относительно малым ( $T_g / T_u < 3$ ). С точки зрения техники автоматического регулирования, с этими объектами следует обращаться примерно так же, как и с объектами с запаздыванием. Кроме этого, фактическое значение часто характеризуется беспокойным поведением. Поэтому здесь в большинстве случаев можно порекомендовать И-структуру.

#### **Уровень pH**

Проводится различие между следующими применениями: Если регулирование осуществляется в потоке (например, в системе труб), то чаще всего применяется ПИД-структура. В случае регулировок в стационарном бассейне применяется П- или ПД-структура (интегральная составляющая будет приводить к перерегулировкам).

#### **Скорость вращения**

Во вращающихся системах часто возникают резонансы и, следовательно, генерируются высшие гармоники. На высшие гармоники особенно сильно реагирует дифференциальная составляющая. Поэтому чаще всего здесь применяется ПИ-структура.

#### **Расход жидкости**

Здесь соотношение время выравнивания / время задержки является малым ( $T_g / T_u < 3$ ). Чаще всего лучший результат дает И-структура.

#### **Уровень**

Такие объекты не обладают выравниванием (пример таких объектов можно найти в главе 2.2.2 «Объекты без выравнивания»). Здесь ПИД-структура всегда позволяет добиться лучших результатов. Однако следует настраивать регулятор так, чтобы интегральная составляющая была не слишком сильной ( $T_I$  не слишком малым), так как иначе регулируемая величина будет проявлять склонность к колебаниям. Такой объект ни в коем случае не следует регулировать при помощи И-структуры, так как она приводит к неустойчивости.

## 4 Замкнутый контур регулирования / оптимизация

### Транспортировка (сыпучие материалы)

Такие объекты регулирования в подавляющем большинстве обладают временем запаздывания (см. также главу 2.3 «Объекты (звенья) статические, с запаздыванием и задержками»). У таких объектов регулирования П-структура всегда вызывает колебания регулируемой величины (а при  $X_p < 100$  даже незатухающие колебания). Также и дифференциальная составляющая часто приводит к неустойчивости. В большинстве случаев И-структура дает лучший результат.

Изложенные выше правила собраны в таблицу:

Регулируемая величина	Чаще всего (!) лучшие результаты дает следующая структура
Температура	ПИД
Давление	И
Уровень рН	Регулировка в потоке ПИД, стационарный бассейн П или ПД
Скорость вращения	ПИ
Расход жидкости	И
Уровень	ПИД
Транспортировка (сыпучие материалы)	И

Таблица 4: Выбор структуры регулятора для регулировок важнейших величин

## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5 Регуляторы дискретного действия

В этой главе рассматривается принцип действия двухточечных, трехточечных, трехточечных ступенчатых и позиционных регуляторов.

#### 5.1 Дискретные и квази-непрерывные регуляторы

Рассматривавшиеся ранее регуляторы непрерывного действия с П-, ПД-, И-, ПИ- и ПИД-структурой могут формировать любое значение управляющего сигнала  $y$  между 0 и 100 %. Это позволяет регулятору поддерживать регулируемую величину  $x$  постоянно на уровне задающей величины  $w$ .

Дискретные и квази-непрерывные регуляторы, в противоположность непрерывным, не обладают непрерывным выходным сигналом, их выход может находиться лишь в состояниях «Вкл» и «Выкл».

Выходы этих регуляторов часто выполнены в виде реле, типовым решением являются также полупроводниковые реле. Иногда такие регуляторы обладают также логическими выходами.

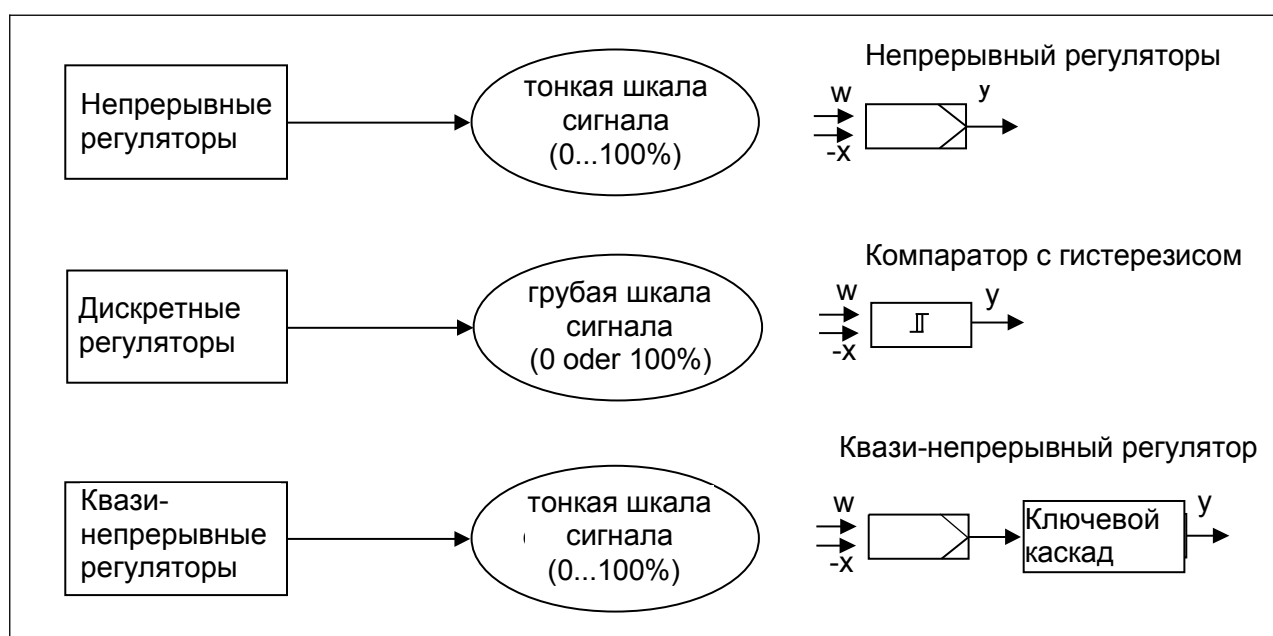


Рисунок 57: Непрерывные, дискретные и квази-непрерывные регуляторы

#### Регуляторы дискретного действия

работают как компаратор с гистерезисом (Рисунок 57): Они замыкают контакт до тех пор, пока не будет достигнуто заданное значение. Затем контакт размыкается, и фактическое значение начинает падать. Когда фактическое значение достигает уровня, равного заданному значению минус установленный гистерезис, на объект снова подается мощность. Примером дискретного регулятора является термостат.

#### Квази-непрерывные регуляторы

можно представить в виде комбинации непрерывного регулятора и ключевого каскада (Рисунок 57): Непрерывный регулятор вычисляет управляющий сигнал, как описано в главе 3 «Регуляторы непрерывного действия». Ключевой каскад варьирует время включения выхода в соответствии с вычисленным управляющим сигналом. Если такие регуляторы достаточно часто переключаются, то достигается поведение при регулировании, практически соответствующее поведению непрерывного регулятора.

В следующей главе мы рассмотрим дискретные и квази-непрерывные регуляторы, обладающие

## 5 Регуляторы дискретного действия

одним двоичным выходом. Так как выход может находиться в двух состояниях, регуляторы этого типа называют двухточечными.

### 5.2 Дискретный двухточечный регулятор

Дискретный двухточечный регулятор работает как термостат: Если фактическое значение лежит ниже заданного, выход замыкается и нагреватель работает на полную мощность. Когда достигнуто заданное значение, мощность устанавливается на уровне 0 %. Когда через некоторое время фактическое значение снова падает ниже уровня заданного значения минус разность уровней включения и выключения ( $X_{Sd}$ ), выход снова включается.

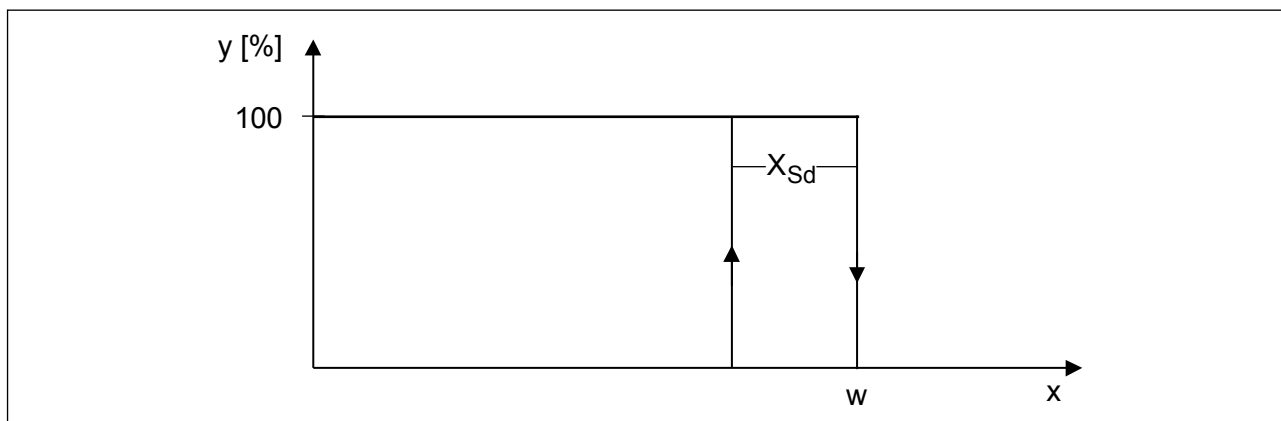


Рисунок 58: Характеристика дискретного двухточечного регулятора

Двухточечный регулятор фирмы JUMO становится дискретным, если задается  $X_p$ , равное 0 (чаще всего, это заводская установка). В этом случае учитывается заданное  $X_{Sd}$ .

Дискретные двухточечные регуляторы часто используются в форме термостата.



Рисунок 59: Комнатный термостат JUMO типа AMFRc-1333

В двух следующих разделах мы рассмотрим, как дискретный двухточечный регулятор ведет себя в случае объектов регулирования первого и более высокого порядка.

## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5.2.1 Дискретный двухточечный регулятор с объектом 1-го порядка

Когда дискретный двухточечный регулятор работает с объектом 1-го порядка, нагрев включается при охлажденной установке. Так как имеется только один накопитель энергии, то температура немедленно начинает расти (Рисунок 60). При достижении заданного значения мощность уменьшается до 0 %, и фактическое значение не успевает превысить заданное. Теоретически, фактическое значение немедленно начинает снижаться, и через некоторое время оно достигает нижней точки включения (заданное значение – разность уровней включения и выключения).

Нагреватель снова включается, и фактическое значение опять начинает возрастать...

При работе с объектом 1-го порядка фактическое значение меняется в диапазоне между уровнями включения и выключения – это лучший результат, которого можно достигнуть при использовании дискретного регулятора.

Частота переключений тем выше, чем меньше разность уровней включения и выключения, и чем быстрее объект регулирования.

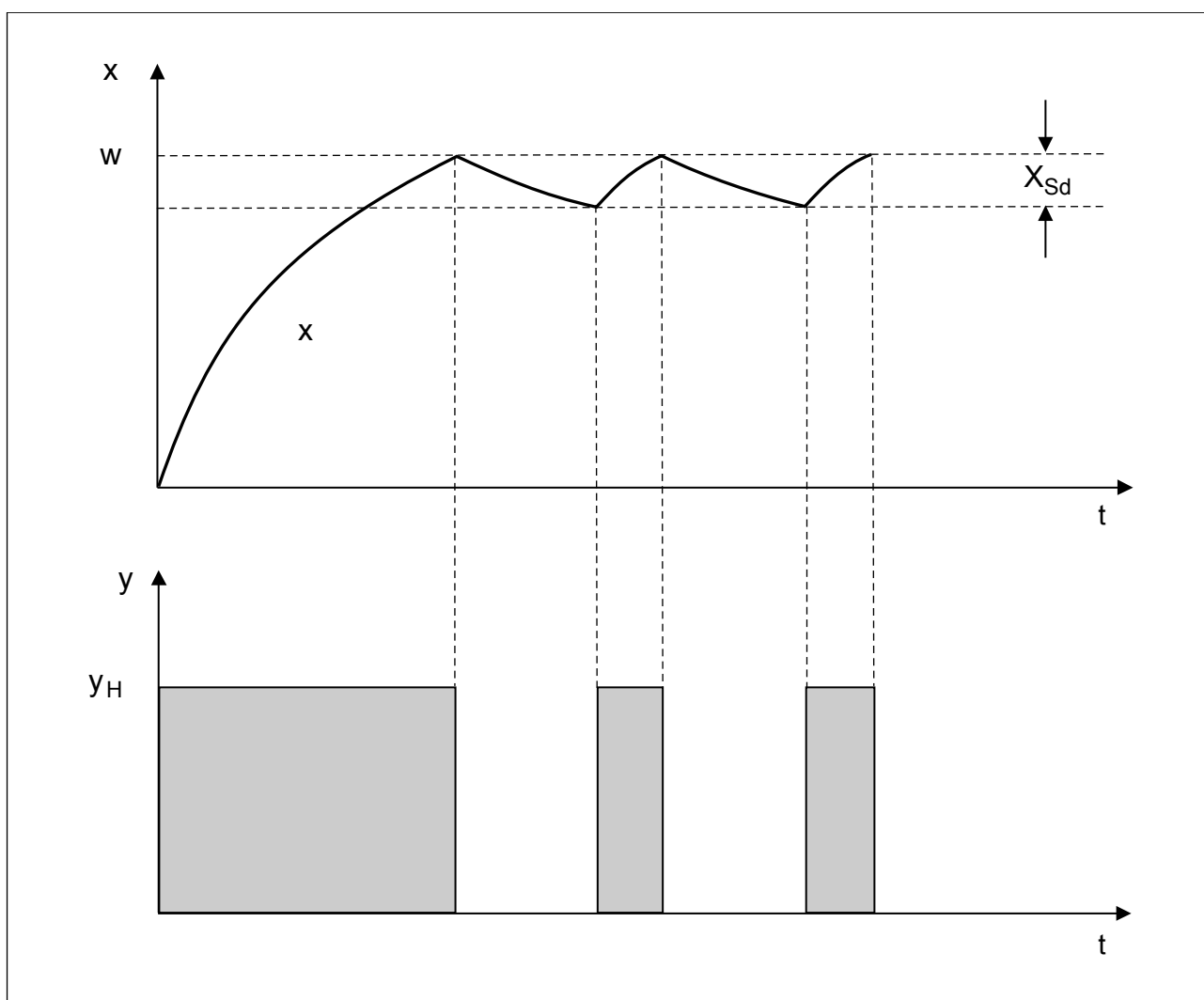


Рисунок 60: Дискретный двухточечный регулятор с объектом 1-го порядка



## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5.2.2 Дискретный двухточечный регулятор с объектом высшего порядка

При работе дискретного двухточечного регулятора с объектом высшего порядка, нагрев включается при охлажденной установке. Поскольку здесь имеется несколько накопителей энергии, регулируемая величина начнет возрастать лишь по прошествии некоторого времени (накопители энергии должны быть сначала заряжены). При достижении заданного значения мощность снижается до 0 %. Ввиду наличия времени задержки фактическое значение успевает превысить заданное. Через некоторое время фактическое значение начнет падать и достигнет нижнего уровня включения. Нагреватель включится, но фактическое значение начнет расти с задержкой (накопители энергии должны снова зарядиться).

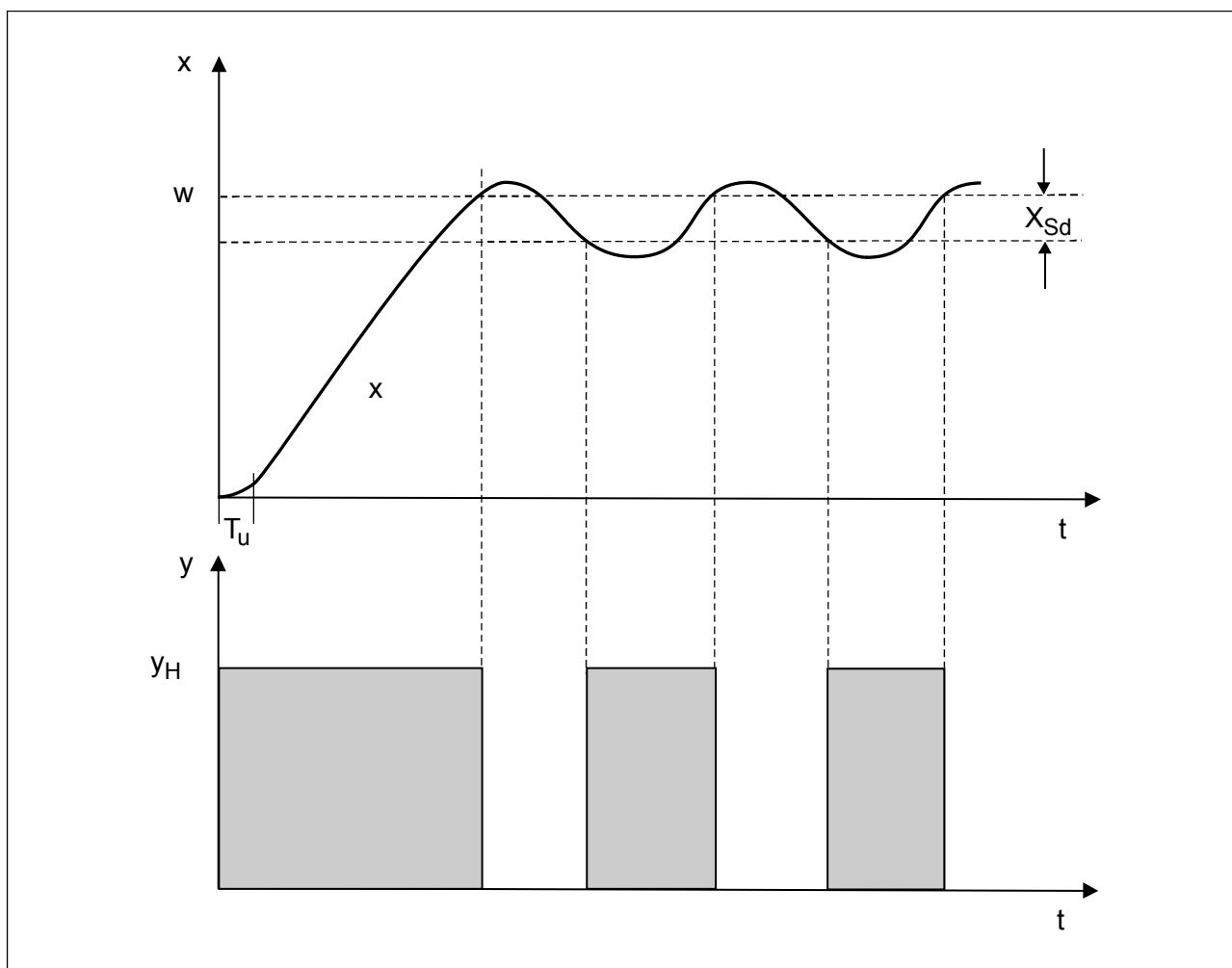


Рисунок 61: Регулятор с объектом высшего порядка

При работе с объектом высшего порядка колебания фактического значения оказываются больше, чем разность уровней включения и выключения. Поэтому, если у термостата задана разность уровней включения и выключения, скажем, 5 К, то фактическое значение может колебаться в диапазоне 10 К.

#### Вывод:

Регулирование при помощи дискретного регулятора, например, в форме термостата не требует больших затрат. Использование этого типа регулирования имеет смысл, когда результирующие колебания фактического значения не являются помехой.

Двухточечные регуляторы в компактном исполнении чаще всего реализуются в форме квазинепрерывных регуляторов (их конфигурация в виде дискретных регуляторов применяется редко, иногда по неосведомленности).

## 5 Регуляторы дискретного действия

Поведение таких регуляторов при работе с относительно инерционными объектами регулирования соответствует поведению непрерывных регуляторов.

### 5.3 Квази-непрерывный двухточечный регулятор: пропорциональный регулятор

Квази-непрерывный регулятор состоит из непрерывного регулятора и ключевого каскада. Если этот регулятор работает в режиме пропорционального регулятора, его характеристика имеет вид, описанный в главе 3.1.1 «Зона пропорционального регулирования».

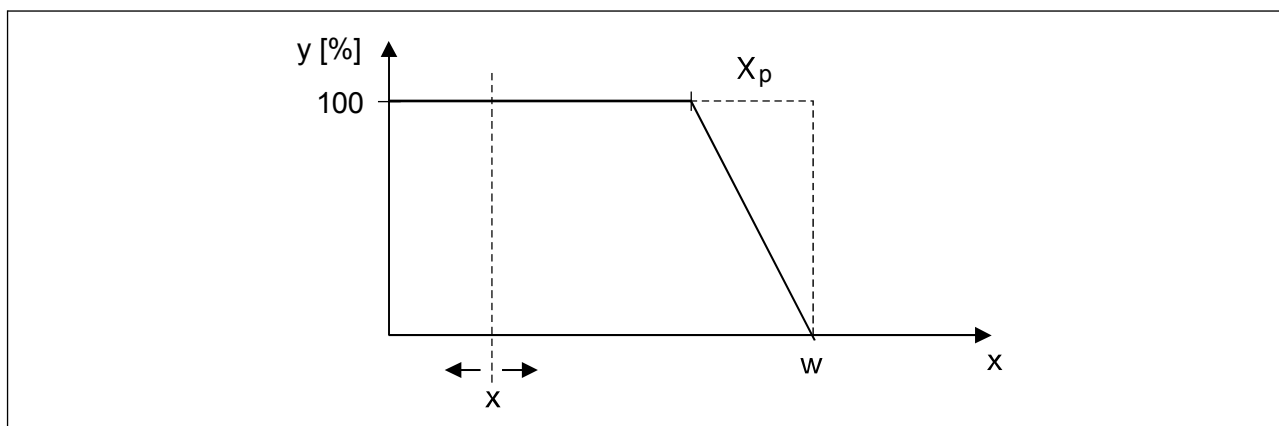


Рисунок 62: Зона пропорционального регулирования квази-непрерывного регулятора

Квази-непрерывный регулятор, характеристика которого показана на Рисунке 62, формирует управляющий сигнал 100 % до тех пор, пока фактическое значение не попадет в зону пропорционального регулирования (контакт реле замкнут все время). Когда фактическое значение находится в зоне пропорционального регулирования и приближается к заданному значению, формируется все меньший управляющий сигнал.

Каким же образом можно почти непрерывно дозировать энергию при помощи дискретного выхода?

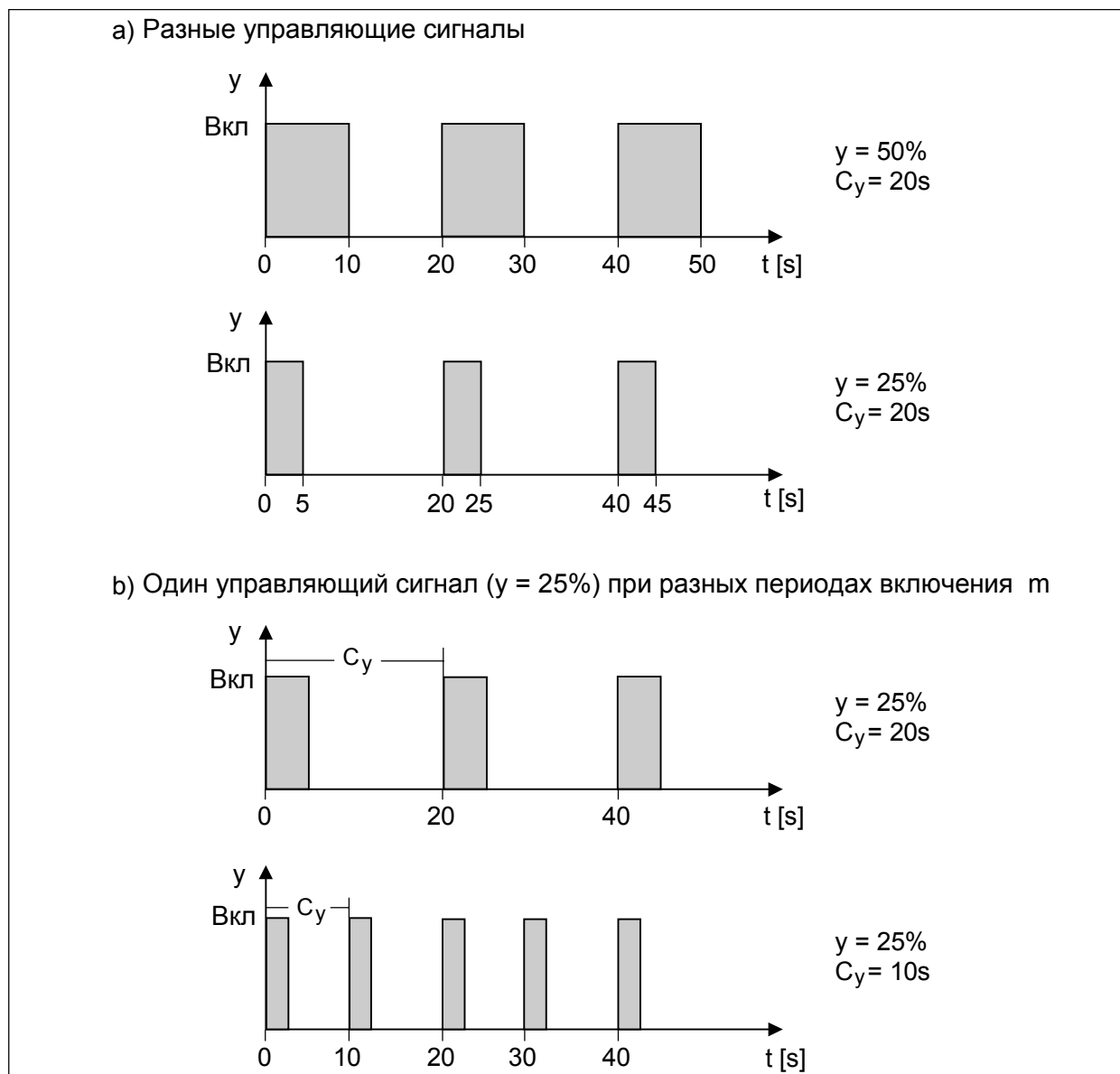
В конечном счете, с временной точки зрения, нет различия между тем, работает ли печь с током нагрева 50 %, или же полный ток течет через нагреватель в течение половины времени. Квази-непрерывный регулятор меняет, вместо величины своего выходного сигнала, его относительную длительность включения, управляющий сигнал соответствует относительному времени включения.

#### Пример:

У квази-непрерывного двухточечного регулятора с управляющим сигналом 43 % выход включен 43 % времени и выключен 57 % времени.

Регулятор вычисляет управляющий сигнал в каждый момент времени. Мы же должны ему сообщить, через какой временной интервал следует производить включения и выключения. Сумма времени включения и выключения называется периодом переключения  $S_y$ .

## 5 Регуляторы дискретного действия



**Рисунок 63: Разные управляющие сигналы и периоды переключения**

На Рисунке 63 в верхней половине показан выходной сигнал регулятора при управляющих сигналах 50 % и 25 %. Соответственно, регулятор включает выход в течение 50 % и 25 % времени.

В нижней половине Рисунка 63 управляющий сигнал неизменен (25 %) при разных периодах переключения. Во втором случае задан меньший период переключения (10 с); энергия дозируется более мелкими порциями и изменения между 0 и 100 % приводят к меньшим колебаниям фактического значения.

Относительно периода переключения действует следующее правило: чем больше период, тем вероятнее возникновение колебаний фактического значения.  $C_y$  следует выбирать настолько малым, чтобы либо не возникало колебаний фактического значения, либо они лежали в допустимых для данного процесса пределах.

При механических переключателях следует задавать  $C_y$  лишь настолько малым, насколько это действительно необходимо, так как уменьшение  $C_y$  негативно сказывается на сроке службы реле и контакторов.

## 5 Регуляторы дискретного действия

При использовании электронных выходов (например, TRIAC, твердотельные реле, выход с открытым коллектором)  $C_Y$  можно задавать сколь угодно малым.

### Пример оценки срока службы реле:

Пусть длительность периода переключения регулятора, используемого для регулирования температуры, составляет  $C_Y = 20$  с. Примененное реле обладает сроком службы контактов 1 млн. переключений.

При заданном  $C_Y$  получается три переключения в минуту, т.е. 180 / ч. Для 1 млн. переключений получается срок службы 5.555 часов = 231 день. Приняв продолжительность эксплуатации 8 ч / день, получаем около 690 дней. Считая, что в году около 230 рабочих дней, мы приходим к сроку службы около 3 лет.

Вычисление периода переключения для двухточечного регулятора должно выполняться до оптимизации: Регулятор включают в ручной режим и задают типичный управляющий сигнал. У регуляторов фирмы JUMO  $C_Y$  чаще всего составляет 20 с. Если при таком периоде переключения обнаруживаются колебания фактического значения, производится уменьшение  $C_Y$  до тех пор, пока не устанавливается устойчивое фактическое значение.

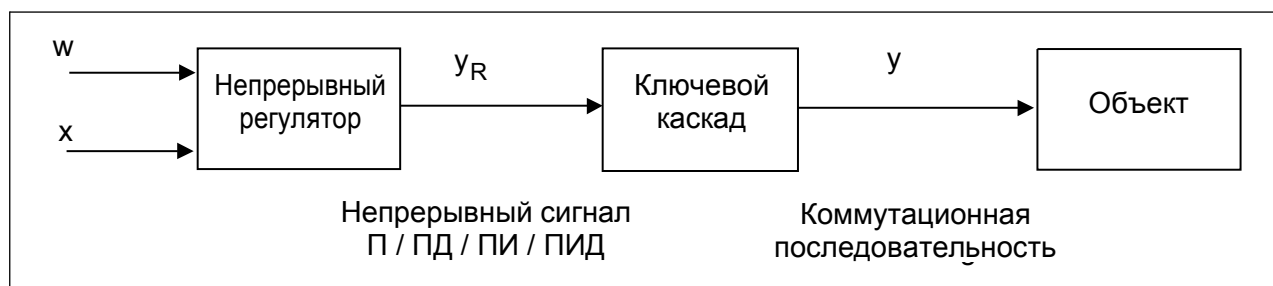
### Указание:

Может оказаться, что и при  $C_Y > 20$  с будет достигнуто устойчивое фактическое значение.

### 5.3.1 Поведение интегральной и дифференциальной составляющих квази-непрерывного двухточечного регулятора

Поведение интегральной и дифференциальной составляющих определяется теми же факторами, что и для непрерывного регулятора. Например, интегральная составляющая увеличивает свой управляющий сигнал в течение времени, когда регистрируется рассогласование. Но, в противоположность увеличению выходного сигнала, интегральная составляющая увеличивает относительное время включения выхода.

Представим еще раз квази-непрерывный двухточечный регулятор как комбинацию непрерывного регулятора и ключевого каскада:



**Рисунок 64:** Квази-непрерывный регулятор как комбинация непрерывного регулятора и ключевого каскада

Структура регулятора может быть выбрана произвольной (П – ПИД). Далее определяются соответствующий период  $C_Y$  параметры регулирования. На основании этих настроек, установленного заданного значения и поведения фактического значения регулятор определяет свой управляющий сигнал  $y_R$  (его обычно можно увидеть на дисплее регулятора). После этого ключевой каскад преобразует управляющий сигнал с учетом установленного  $C_Y$  в коммутационную последовательность.

### Пример:

В показанном квази-непрерывном регуляторе непрерывный регулятор формирует управляющий

## 5 Регуляторы дискретного действия

сигнал 50 %. Для ключевого каскада управляющий сигнал 50 % означает относительную длительность включения, также равную 50 %. Допустим, что  $C_y$  составляет 10 с, тогда ключевой каскад включает и выключает выход на периоды по 5 с. Если у двухточечного регулятора найдена хорошая настройка для  $C_y$ , то к его статической, интегральной и дифференциальной составляющей относятся все утверждения, сделанные в главе 3 «Регуляторы непрерывного действия». Для этого регулятора можно также применять все методы оптимизации, описанные в главе 4 «Замкнутый контур регулирования / оптимизация».

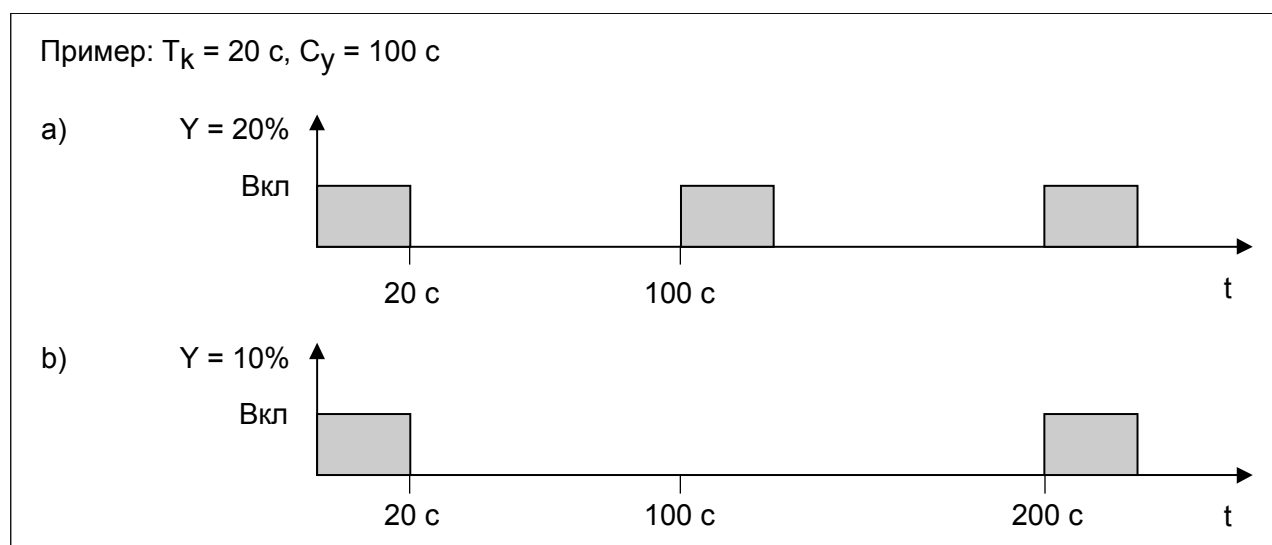
### Минимальная длительность включения ( $T_k$ )

Некоторые исполнительные элементы ожидают, что на них подается управляющий сигнал в течение не менее некоторого минимального времени. Это возможно, например, при управлении газовой печью, где газ должен быть подожжен и затем сожжен без остатка. В качестве другого примера можно упомянуть холодильную машину, у которой есть минимальный период включения.

Для указанных приложений у некоторых регуляторов фирмы JUMO можно воспользоваться параметром «минимальное время включения» ( $T_k$ ). Заводской установкой для него является 0 с.

Если установить  $T_k > 0$  с, то двоичный выход будет включаться не менее чем на это время.

Регулятор старается в дальнейшем придерживаться заданного периода переключения  $C_y$ , но  $T_k$  обладает для него приоритетом (Рисунок 65):



**Рисунок 65:** Выходной сигнал двухточечного регулятора при  $T_k = 20$  с

На Рисунке 65 показан выходной сигнал двухточечного регулятора, когда заданы  $T_k = 20$  с и  $C_y = 100$  с. Даже при самых маленьких управляющих сигналах регулятор включает свой выход не менее чем на 20 с.

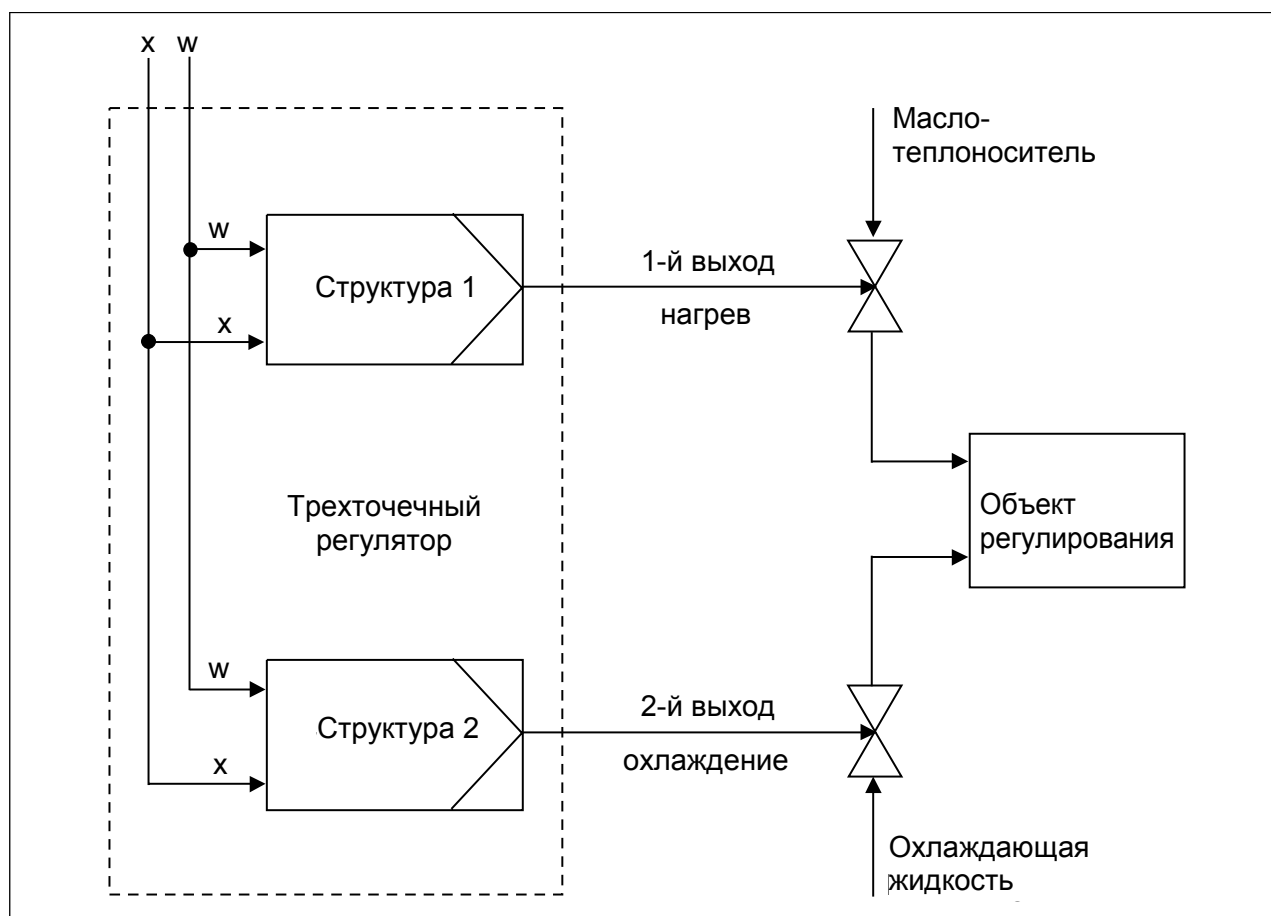
На Рисунке 65 а) регулятор формирует управляющий сигнал 20 %: он замыкает выход на 20 с и размыкает на 80 с (в этом случае удается соблюсти длительность периода переключения 100 с).

На Рисунке 65 б) регулятор формирует управляющий сигнал 10 %: здесь он также замыкает выход на 20 с. Чтобы достичь управляющего сигнала 10 %, ему приходится размыкать выход в девять раз дольше. В этом случае регулятор увеличивает период переключения до 200 с.

## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5.4 Трехточечный регулятор

Трехточечный регулятор можно упрощенно представить как параллельное соединение двух отдельных регуляторов.



**Рисунок 66: Устройство трехточечного регулятора**

С его помощью можно при выходе за нижний предел задающей величины включать нагрев, а при выходе за ее верхний предел – охлаждение. В качестве другого применения можно назвать увлажнение и удаление влаги из климатической камеры. У регулятора каждому управляющему сигналу назначается свой выход: Так, например, для нагревания часто используют 1-й выход, а для охлаждения – 2-й. Все параметры, относящиеся к «регулятору нагревания», обозначаются индексом  $1$ , а для всех параметров «регулятора охлаждения» используется индекс  $2$ .

Рассмотрим сначала, как ведет себя трехточечный регулятор, когда обе структуры работают в дискретном режиме.

## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5.4.1 Дискретный трехточечный регулятор

Обе структуры работают в дискретном режиме, если  $X_{p1}$  и  $X_{p2}$  заданы равными 0.

В этом случае начинают играть роль заданные разности между уровнями включения и выключения ( $X_{Sd1}$ ,  $X_{Sd2}$ ) (Рисунок 67):

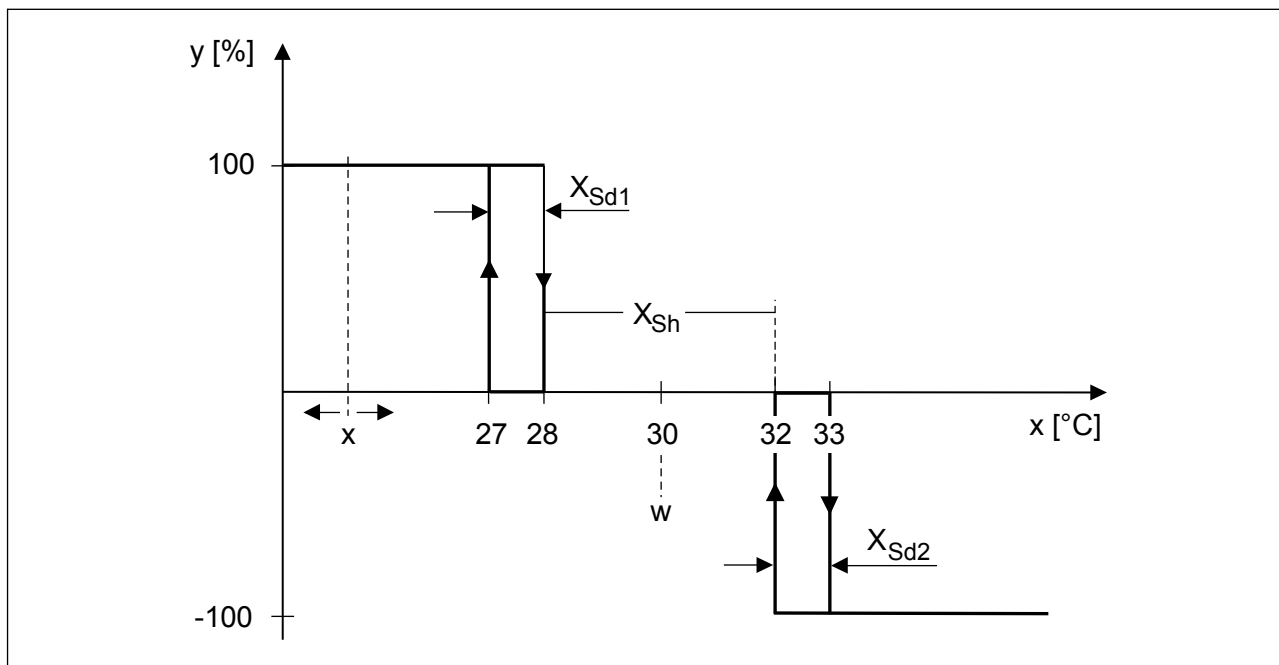


Рисунок 67: Характеристика дискретного регулятора с двумя выходами

Рисунок 67 иллюстрирует принцип работы дискретного трехточечного регулятора на конкретном примере: Для обеих разностей между уровнями включения и выключения ( $X_{Sd1}$  и  $X_{Sd2}$ ) заданы значения 1 К, заданное значение равно 30 °С. У трехточечного регулятора, кроме этого, должен быть задан параметр «контактное расстояние»  $X_{Sh}$  (в примере 4 К). Он предупреждает непрерывное переключение между нагреванием и охлаждением (что было бы бесполезной тратой энергии).

Представим маленькое фактическое значение  $x$  (Рисунок 67): Управляющий сигнал составляет 100 %, и нагревательный контакт замыкается. Фактическое значение увеличивается, пока при 28 °С контакт не разомкнется. Через некоторое время происходит охлаждение. Когда фактическое значение оказывается ниже 27 °С, снова включается нагреватель. При необходимости нагрева и при благоприятных условиях фактическое значение будет удерживаться в диапазоне  $X_{Sd1}$  (обоснование имеет в главе 5.2.1 «Дискретный двухточечный регулятор с объектом 1-го порядка»).

Представим теперь, что ввиду более высокой окружающей температуры фактическое значение будет повышаться. После того, как оно превысит 33 °С, управляющий сигнал будет равен -100 % (замыкает контакт охлаждения). Холодильный агрегат вызывает падение температуры, при 32 °С он выключается. При необходимости охлаждения и при благоприятных условиях фактическое значение будет удерживаться в диапазоне  $X_{Sd2}$ .

Если конфигурируется трехточечный регулятор, то обе структуры должны работать в квази-непрерывном режиме. Принцип действия мы объясним в следующей главе.

## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5.4.2 Квази-непрерывный трехточечный регулятор

Квази-непрерывный трехточечный регулятор, у которого оба выхода управляются своим пропорциональным регулятором, можно также представить как соединение двух связанных между собой квази-непрерывных регуляторов. Обе структуры трехточечного регулятора настраиваются для работы в квази-непрерывном режиме при помощи задания  $X_P > 0$ . После этого разность между уровнями включения и выключения больше не используется. Длительность периода переключения можно свободно конфигурировать для обеих структур. Контактное расстояние продолжает оказывать влияние.

На Рисунке 68 показана характеристика квази-непрерывного трехточечного регулятора, используемого для управления климатической камерой (оба отдельных регулятора имеют П-структуру).

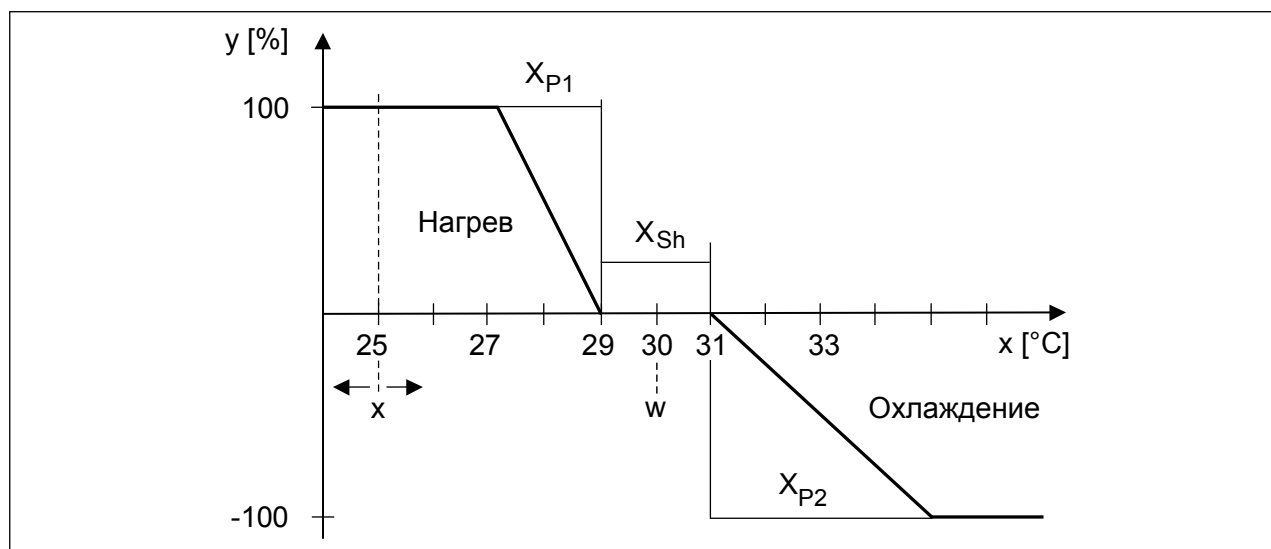


Рисунок 68: Характеристика квази-непрерывного трехточечного регулятора

Как изображено на Рисунке 68,  $X_{P1}$  и  $X_{P2}$  можно настраивать отдельно. Это необходимо, так как передаточный коэффициент объекта управления для двух управляющих сигналов, вообще говоря, будет различным. Так, например, нагревание влияет на процесс совершенно иначе, нежели охлаждение (например, при помощи вентилятора).

Рассмотрим принцип действия этого регулятора. Пусть фактическое значение температуры в климатической камере равно  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , регулирование включается.

#### Нагрев

Реле нагрева замыкает контакт, и начинается нагрев с управляющим сигналом  $100\%$ , после чего фактическое значение возрастает. Управляющий сигнал нагревателя, начиная с фактического значения  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  (достижение зоны пропорционального регулирования), непрерывно уменьшается, реле с учетом заданного периода переключения ( $S_{y1}$ ) начинает замыкать и размыкать контакт, и период включения становится все меньше. Рассогласование, а, следовательно, и управляющий сигнал уменьшаются, пока не установится управляющий сигнал, поддерживающий фактическое значение на постоянном уровне. Мы получим положительный управляющий сигнал (например, управляющий сигнал  $25\%$  при  $28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### Охлаждение

Пусть теперь начинает повышаться температура окружающей среды (возмущающее воздействие), в результате чего внутреннее пространство климатической камеры нагревается. Фактическое значение растет – после его попадания в интервал контактного расстояния ( $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) управляющий сигнал равен  $0\%$ , не происходит ни нагревания, ни охлаждения. Лишь после



## 5 Регуляторы дискретного действия

достижения температуры 31 °С реле начинает замыкать и размыкать контакт охлаждения (управляющий сигнал становится отрицательным). Рассогласование становится настолько большим, что установившийся управляющий сигнал оказывается достаточным, чтобы поддерживать постоянное фактическое значение.

У обоих регуляторов активирована П-структура, поэтому ни при нагреве, ни при охлаждении регулятор не может обеспечить равенства фактического значения заданному.

### 5.4.3 Поведение интегральной и дифференциальной составляющих квази-непрерывного трехточечного регулятора

Если обе структуры регуляторы включены в режиме ПИД, то дополнительно определяется поведение их интегральных и дифференциальных составляющих ( $T_{n1}$ ,  $T_{n2}$ ,  $T_{v1}$  и  $T_{v2}$ ).

Интегральная составляющая добивается равенства фактического значения заданному, а дифференциальная составляющая противодействует изменению фактического значения.

Пропорциональные составляющие активируются только вне интервала контактного расстояния. Контактное расстояние отодвигает зоны пропорционального регулирования друг от друга и предотвращает непрерывное переключение между нагреванием и охлаждением.

Настройка контактного расстояния должна выполняться после оптимизации и таким образом, чтобы не происходило нежелательного переключения между нагреванием и охлаждением.

В Таблице 5 показано, какие параметры следует настраивать для трехточечного регулятора, если обе структуры должны работать в дискретном или квази-непрерывном режиме.

	Структура	Параметры							
		$X_{P1}$	$X_{P2}$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{v1}$	$T_{v2}$	$X_{Sh}$	$X_{d1}; X_{d2}$
Дискретный		0	0	–	–	–	–	$X_{Sh}$	$X_{d1}; X_{d2}$
Квази-непрерывный	П	$X_{P1}; X_{P2}$	–	–	–	$C_{y1}; C_{y2}$	$X_{Sh}$	–	–
	ПИ	$X_{P1}; X_{P2}$	$T_{n1}; T_{n2}$	–	–	$C_{y1}; C_{y2}$	$X_{Sh}$	–	–
	ПИД	$X_{P1}; X_{P2}$	$T_{n1}; T_{n2}$	$T_{v1}; T_{v2}$	–	$C_{y1}; C_{y2}$	$X_{Sh}$	–	–
	ПД	$X_{P1}; X_{P2}$	–	–	$T_{v1}; T_{v2}$	$C_{y1}; C_{y2}$	$X_{Sh}$	–	–
	И	–	–	$T_{n1}; T_{n2}$	–	–	$C_{y1}; C_{y2}$	$X_{Sh}$	–

**Таблица 5: Параметры трехточечного регулятора**

У некоторых регуляторов можно также задавать минимальное время включения ( $T_{k1}$ ,  $T_{k2}$ ).

Разумеется, структуры трехточечного регулятора можно произвольным образом комбинировать. Структура 1 может, например, работать в ПИД-режиме, а структура 2 – в ПИ-режиме. Кроме этого, 1-й выход регулятора может выдавать непрерывный сигнал, а 2-й выход – дискретный. Это возможно, например, когда происходит управление тиристорным силовым исполнительным элементом, и при помощи контакта активируется холодильная установка.

## 5 Регуляторы дискретного действия

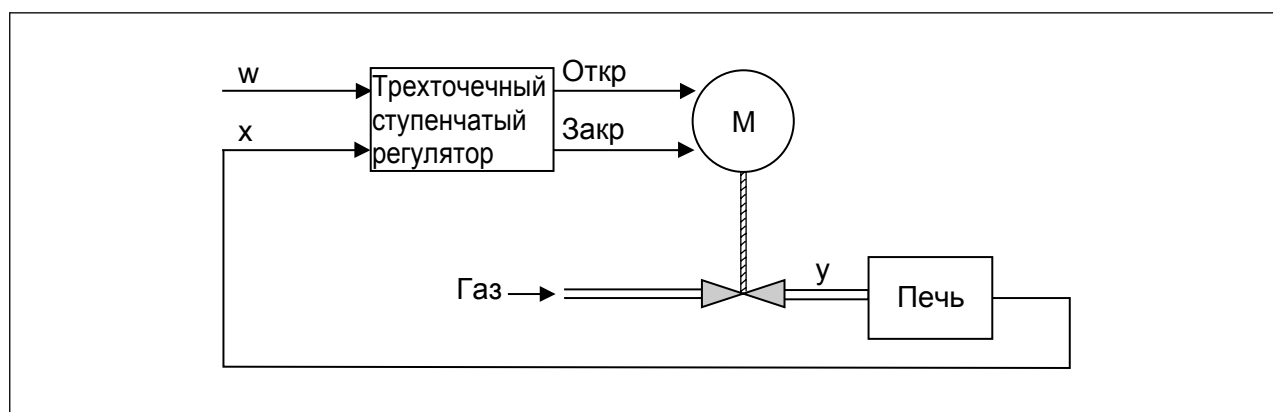
### 5.5 Регуляторы для управления исполнительными элементами с серводвигателями

Такие элементы состоят из серводвигателя и собственно исполнительного элемента, соединенных шпинделем. Исполнительными элементами часто являются клапаны или заслонки. При наличии серводвигателей можно достаточно легко собирать исполнительные элементы с серводвигателями. При помощи двух цепей двигателя можно открывать (левый ход) или закрывать (правый ход) исполнительный элемент.

Для управления исполнительными элементами с серводвигателями имеются позиционные регуляторы, которые мы опишем в этой главе.

#### 5.5.1 Трехточечный ступенчатый регулятор

Трехточечный ступенчатый регулятор имеет два двоичных выхода для управления исполнительным элементом с серводвигателем. На Рисунке 69 показан регулятор и исполнительный элемент с серводвигателем в замкнутом контуре управления.



**Рисунок 69:** Трехточечный ступенчатый регулятор и исполнительный элемент с серводвигателем в замкнутом контуре управления

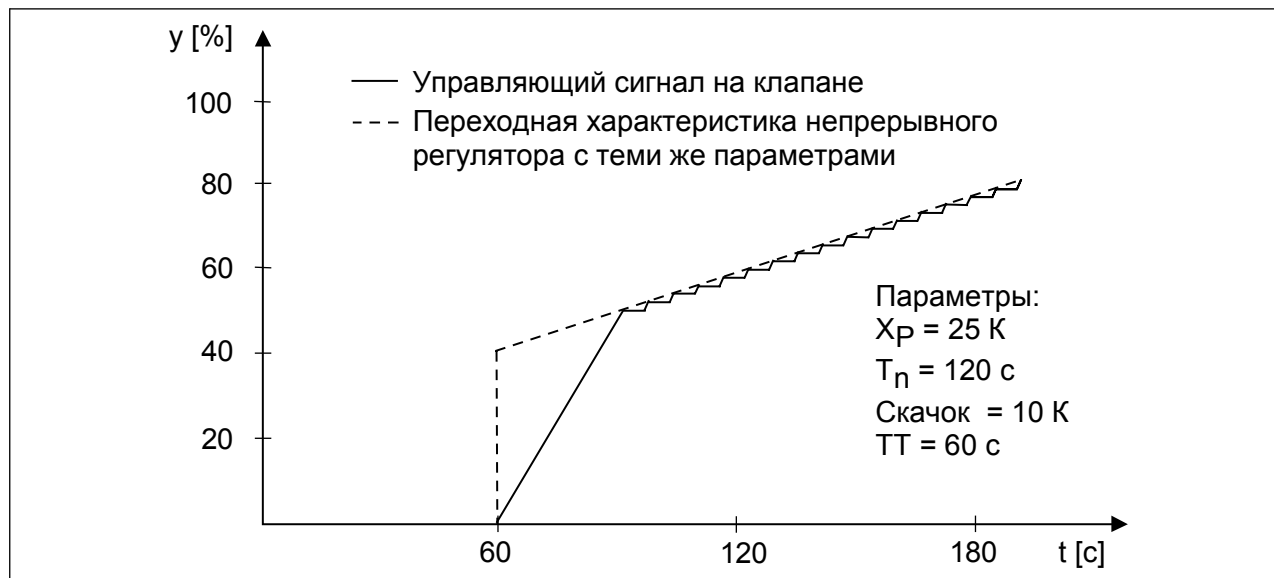
Если реле регулятора замкнуло контакт, то клапан начинает открываться или закрываться. Активация одного выхода блокирует другой выход. Если управления не происходит, то, в отличие от обычного трехточечного регулятора, это не означает, что управляющее воздействие составляет 0 %. В этом случае клапан останавливается в текущем положении и, например, может быть при этом открыт на 60 %. Иногда пытаются управлять исполнительным элементом с серводвигателем при помощи трехточечного регулятора. Это является ошибкой.

У трехточечного ступенчатого регулятора положение клапана соответствует управляющему сигналу, который может находиться в диапазоне 0 ... 100 %. Трехточечный ступенчатый регулятор постоянно контролирует фактическое и заданное значение. На основе параметров регулирования в каждый момент времени он вычисляет, на сколько процентов нужно открыть или закрыть клапан.

## 5 Регуляторы дискретного действия

### Пример:

Трехточечный ступенчатый регулятор работает в режиме ПИ-структуры ( $X_p = 25 \text{ К}$ ,  $T_n = 120 \text{ с}$ ), продолжительность хода исполнительного элемента составляет 60 с. Фактическое и заданное значения равны  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Затем устанавливают заданное значение, равное  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это приводит к рассогласованию, равному 10 К.



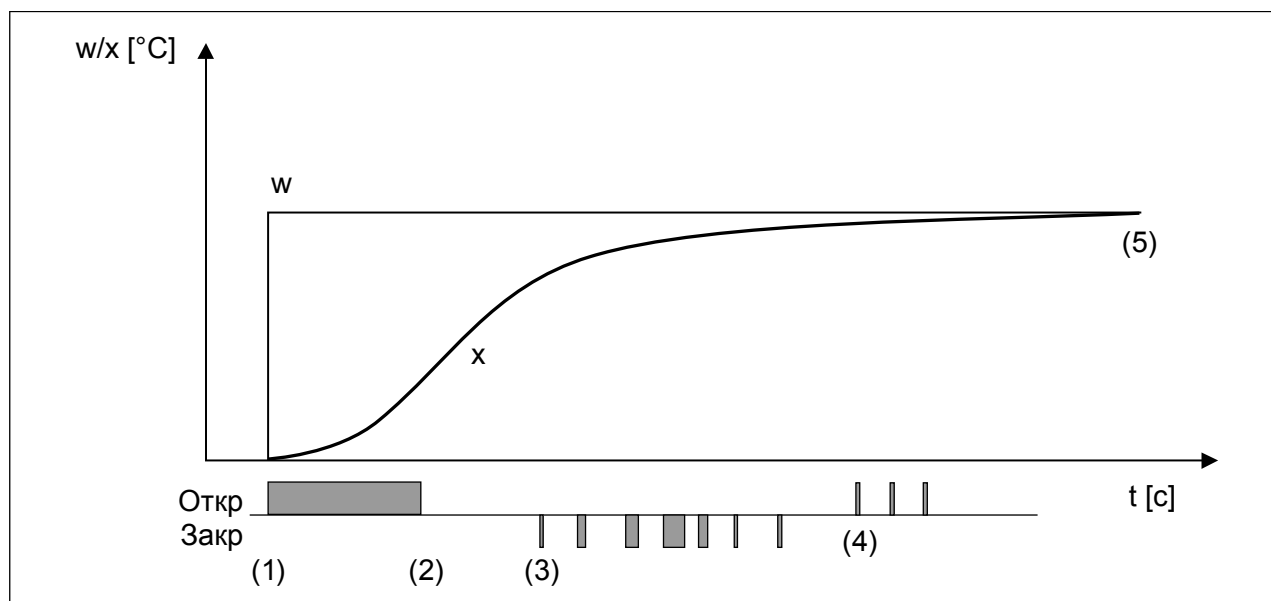
**Рисунок 70:** Переходная характеристика системы из трехточечного ступенчатого регулятора и сервоклапана

В соответствии с параметрами регулирования, непрерывный регулятор скачком увеличил бы управляющий сигнал до 40 % (пропорциональная составляющая, Рисунок 70) и затем повышал бы его на основе времени отставания  $T_n = 120 \text{ с}$  (интегральная составляющая). Трехточечный ступенчатый регулятор тоже стремится к тому, чтобы открыть клапан на 40 % и начать обрабатывать сигнал интегральной составляющей. Однако клапан открывается с задержкой, так как он инерционен. Чтобы сделать управление возможным, трехточечный ступенчатый регулятор должен обладать информацией о том, сколь быстро работает клапан. Для этого служит продолжительность хода исполнительного элемента  $T_T$  (время, которое требуется исполнительному элементу, чтобы из закрытого состояния полностью открыться или наоборот). Продолжительность хода клапана на Рисунке 70 составляет 60 с.

Трехточечный ступенчатый регулятор не обладает информацией о положении исполнительного элемента. Поэтому можно задавать только структуры регулятора, которые обладают интегральной составляющей (ПИ и ПИД).

## 5 Регуляторы дискретного действия

Рассмотрим поведение трехточечного ступенчатого регулятора:



**Рисунок 71: Поведение трехточечного ступенчатого регулятора, структура ПИ**

На Рисунке 71 показаны заданное значение, фактическое значение и оба выхода трехточечного ступенчатого регулятора: В момент времени (1) происходит переход к новому заданному значению. Регулятор обнаруживает, что фактическое значение лежит вне зоны пропорционального регулирования, он активирует выход «Откр», по меньшей мере, до достижения зоны пропорционального регулирования (клапан открыт на 100 %). К моменту (2) фактическое значение достигает зоны пропорционального регулирования. Пропорциональная составляющая уменьшает свой сигнал, а интегральная составляющая увеличивает. Сначала уменьшение пропорциональной составляющей примерно соответствует увеличению интегральной, управляющий сигнал на клапане остается равным 100 %, никаких изменений не происходит. В момент времени (3) регулятор вычисляет, что управляющий сигнал следует уменьшить, и он начинает медленно закрывать клапан. В момент (4) регулятор вычисляет, что необходимо увеличить управляющий сигнал на клапане. В момент (5) фактическое значение достигает заданного, и дальше управление не выполняется.

В отношении поведения при регулировании (П, И и Д) трехточечный ступенчатый регулятор может рассматриваться как непрерывный регулятор.

### Контактное расстояние

Хотя трехточечный ступенчатый регулятор добился равенства фактического и заданного значений, время от времени происходит управление исполнительным элементом (открыть, закрыть, открыть и т.д.).

Если допустить, что фактическое значение лежит несколько ниже заданного, то регулятор на короткое время даст сигнал закрытия исполнительного элемента. Регулятор управляет исполнительным элементом в течение времени не менее периода дискретизации (типичные значения для регуляторов фирмы JUMO составляют 50...250 мс). В результате короткого периода закрывания фактическое значение уменьшается и оказывается ниже заданного. Регулятор снова выдает управляющий сигнал в течение периода дискретизации, и фактическое значение оказывается выше заданного и т.д.

Постоянного открывания и закрывания, сокращающего срок службы исполнительных элементов, можно избежать, увеличивая контактное расстояние ( $X_{SH}$ ). Интервал контактного расстояния располагается симметрично вокруг заданного значения. Если фактическое значение попадает в

## 5 Регуляторы дискретного действия

этот интервал, то управления исполнительным элементом не происходит.  $X_{Sh}$  задается после оптимизации регулятора, и эта величина задается достаточно большой, чтобы не возникало длительного попеременного открывания и закрывания. Но если выбрать слишком большое контактное расстояние, то будет устанавливаться слишком большое рассогласование.

### Ручной режим

Так как трехточечный ступенчатый регулятор не знает фактического положения исполнительного элемента, оказывается невозможным переместить исполнительный элемент в положение, соответствующее управляющему сигналу, заданному в ручном режиме. Когда схема переходит в ручной режим, то в первый момент управления исполнительным элементом не происходит. Вручную можно лишь давать команду на открывание или закрывание.

### Концевой выключатель

Для трехточечного ступенчатого выключателя вполне возможна следующая ситуация: запрашивается такое заданное значение, которое недостижимо на данной установке. Ввиду интегральной составляющей регулятор будет постоянно давать сигнал открывания исполнительного элемента, хотя тот уже открыт на 100 %.

Это приведет к бесполезной нагрузке на обмотку двигателя. Поэтому часто исполнительные элементы с серводвигателем оборудуют концевым выключателем: Если трехточечный ступенчатый выключатель дает команду открывания исполнительного элемента, а тот уже открыт на 100 %, то концевой выключатель прерывает ток. Существуют выключатель для обоих концевых положений. При использовании самодельных исполнительных элементов рекомендуется оснащать их описанными компонентами.

В Таблице 6 показаны регулировочные параметры трехточечного ступенчатого регулятора:

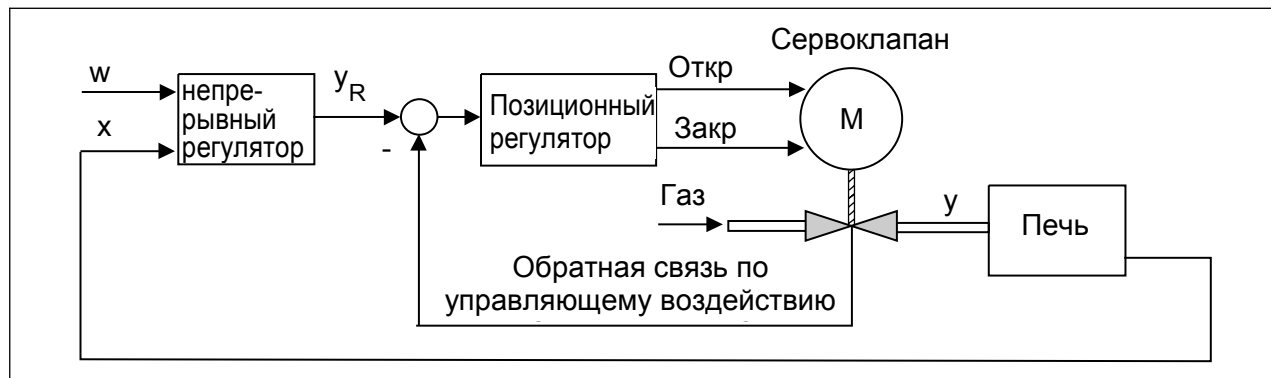
Структура	ПИ	ПИД
Параметры	$X_p$	$X_p$
	$T_n$	$T_n$
	-	$T_v$
	$T_T$	$T_T$
	$X_{Sh}$	$X_{Sh}$

Таблица 6: Регулировочные параметры трехточечного ступенчатого регулятора

## 5 Регуляторы дискретного действия

### 5.5.2 Позиционный регулятор

Для управления исполнительными элементами с серводвигателями еще лучше подходит позиционный регулятор, полное название которого «непрерывный регулятор со встроенным позиционным регулятором для исполнительных элементов с серводвигателем». Если, например, один из регуляторов фирмы JUMO конфигурируется как позиционный регулятор, то он обладает следующей структурой:



**Рисунок 72: Позиционный регулятор с сервоклапаном в контуре регулирования**

Позиционный регулятор состоит из непрерывного регулятора, у которого можно задавать любую из известных структур (П – ПИД). Непрерывный регулятор вычисляет на основе параметров регулирования, заданного и фактического значений свой управляющий сигнал. Собственно позиционный регулятор добивается отработки исполнительным элементом с серводвигателем величины управляющего сигнала, формируемого непрерывным регулятором (например, открывания клапана на 80 % при управляющем сигнале 80 %). Чтобы такая схема работала, необходимо наличие у исполнительного элемента обратной связи по управляющему воздействию. Для этого встраивают потенциометр, три вывода которого подключаются к входу 2 регулятора. На основании положения бегунка потенциометра регулятор становится известным степень открытия клапана. Регулятор следует при этом сконфигурировать так, чтобы, например, вход 2 использовался для обратной связи по управляющему воздействию. Пользуясь сигналом цепи обратной связи по управляющему воздействию, позиционный регулятор добивается отработки заданного управляющего сигнала. Встроенный регулятор не нуждается в оптимизации, параметры регулирования настраиваются при задании продолжительности хода исполнительного элемента.

У позиционного регулятора интервал контактного расстояния располагается симметрично вокруг заданного значения, и пользователь должен задавать достаточно большую величину контактного расстояния, чтобы не возникало продолжительного попеременного открывания и закрывания.

При помощи позиционного регулятора достигается лучшее поведение системы при регулировании, нежели при помощи трехточечного ступенчатого регулятора. Кроме того, в ручном режиме можно задавать произвольную величину управляющего сигнала, исполнительный элемент будет затем правильно позиционирован.

Для позиционного регулятора обратная связь по управляющему воздействию необходима, иначе возможно лишь применение трехточечных ступенчатых регуляторов.

## 5 Регуляторы дискретного действия

Регулировочные параметры позиционного регулятора показаны в Таблице 7:

Структура	П	ПД	И	ПИ	ПИД
Параметры	$X_P$	$X_P$	-	$X_P$	$X_P$
	-	-	$T_n$	$T_n$	$T_n$
	-	$T_v$	-	-	$T_v$
	$T_T$	$T_T$	$T_T$	$T_T$	$T_T$
	$X_{Sh}$	$X_{Sh}$	$X_{Sh}$	$X_{Sh}$	$X_{Sh}$

Таблица 7: Регулировочные параметры позиционного регулятора

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6 Схемы для улучшения качества регулирования

Вплоть до этой главы мы рассматривали неразветвленные контуры регулирования. Влияние на объект оказывает в этом случае только управляющий сигнал регулятора. Методы, рассматриваемые в данной главе, позволяют улучшить качество регулирования или снизить стоимость системы регулирования.

#### 6.1 Базовая нагрузка

При подаче базовой нагрузки регулятор влияет только на часть управляющего сигнала, тогда как его остаток подается на объект постоянно.

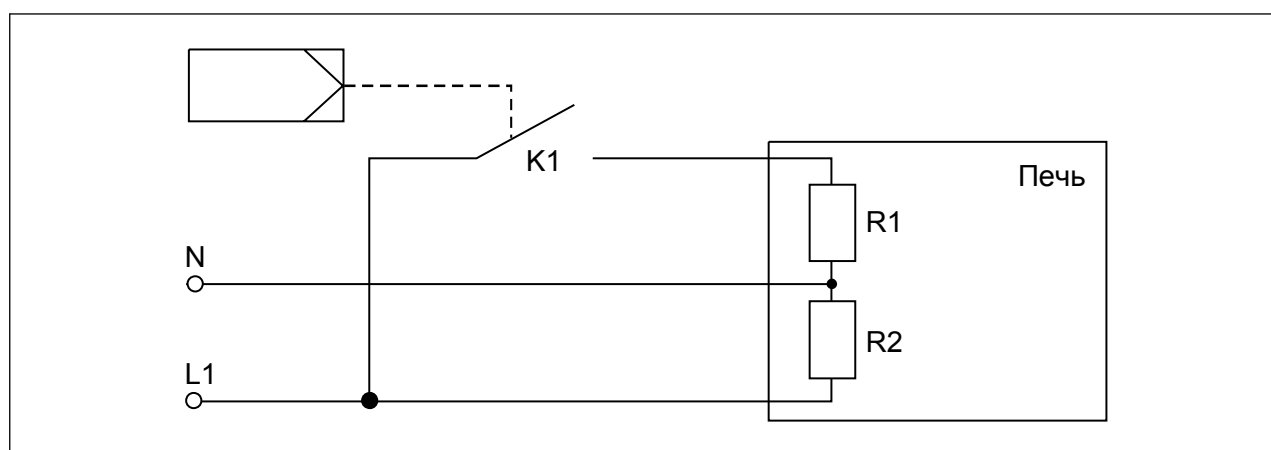


Рисунок 73: Подача базовой нагрузки

В примере на Рисунке 73 нагреватель 2 включен постоянно, а нагревателем 1 управляет регулятор.

При подаче базовой нагрузки исполнительный элемент управляет только частью мощностью (можно выбрать элемент меньшего размера и сэкономить средства). Кроме того, в случае двухточечного регулятора изменения сетевой нагрузки становятся не столько большими.

Подача базовой нагрузки может также применяться, когда заданное значение на объекте регулирования должно лежать в широком диапазоне. В качестве примера можно взять промышленную печь, где заданные значения должны лежать в диапазоне 200 ... 1000 °С. При малых заданных значениях возникает проблема, что нагреватель выбран слишком мощным. При нагреве становится вероятным перерегулирование.

Решение: При малых заданных значениях отключается базовая нагрузка, а, начиная с некоторого значения, она включается. Иногда базовая нагрузка увеличивается ступенчато с ростом заданных значений. Этот метод имеет то преимущество, что можно достигать любой рабочей точки с относительно большим управляющим сигналом регулятора. Качество регулирования улучшается.

В некоторых случаях для нагревания требуется относительно большая мощность. В силу хорошей изоляции для достижения равенства фактического и заданного значений требуется относительно небольшой управляющий сигнал. Избыток подаваемой мощности приводит к перерегулированию. Регуляторы фирмы JUMO при больших рассогласованиях могут активировать дополнительную подачу мощности через второй выход. Она снова отключается, когда рассогласование оказывается ниже некоторого порогового значения. Равенство фактического и заданного значения достигается при помощи первого выхода регулятора при подаче частичной мощности.



## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.2 Режим разделения диапазона

В режиме разделения диапазона управляющий сигнал регулятора распределяется между несколькими исполнительными элементами.

Причина этого может состоять в том, что один исполнительный элемент не обеспечивает достаточную мощность, или же в установке необходимо экономить энергию:

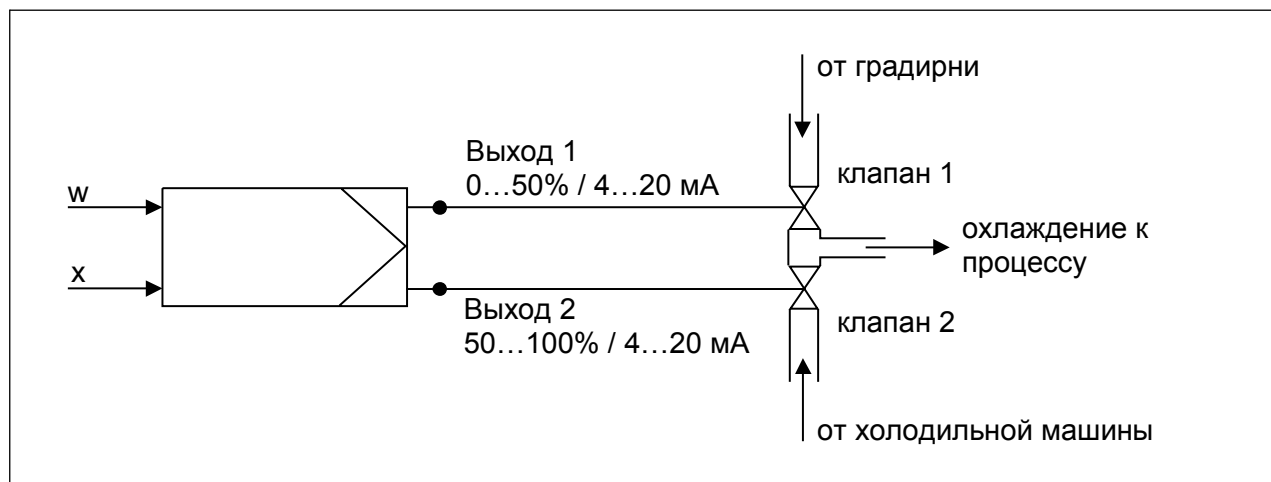


Рисунок 74: Режим разделения диапазона

В показанном фрагменте установки для некоторого процесса обеспечивается теплосъем. В данной установке теплосъем при помощи градирни оказывается дешевле, чем при помощи холодильной машины.

**Управляющий сигнал регулятора (0 ... 100 %) распределяется между двумя аналоговыми выходами:**

Если управляющий сигнал лежит между 0 и 50 %, то происходит управление выходом 1 – 4 ... 20 мА (клапан 1 – 0 ... 100 %). Когда регулятор вычисляет управляющий в диапазоне 50 ... 100 %, то происходит управление выходом 2 – 4 ... 20 мА (на выходе 1 поддерживается ток 20 мА).

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.3 Поддержание возмущения на постоянном уровне

Как было разъяснено в главе 2 «Объект регулирования», возмущения оказывают влияние на регулируемую величину только тогда, когда они меняются. В некоторых приложениях имеется возможность поддерживать возмущение на постоянном уровне:

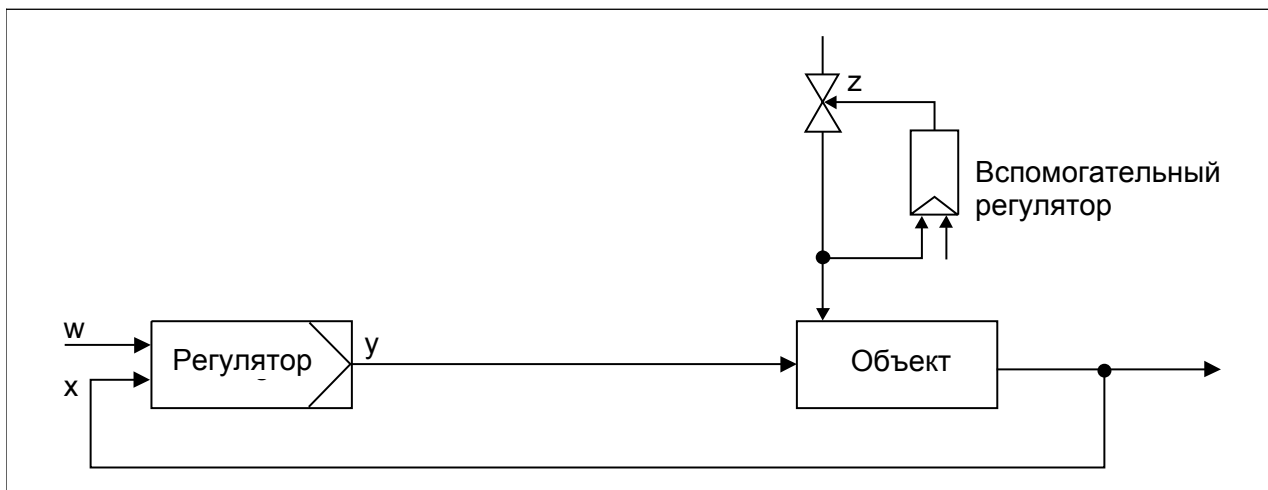


Рисунок 75: Поддержание возмущения на постоянном уровне

На Рисунке 75 схематически показана печь, работающая на газе. Одним из возмущений в этом случае является давление в подводящей магистрали газового клапана. Если регулятор добился равенства фактического и заданного значений, то при падении давления газа при найденном положении клапана произойдет уменьшение фактического значения. Регулятор увеличит управляющий сигнал и снова добьется равенства фактического и заданного значений.

При помощи вспомогательного регулятора можно поддерживать давление в подводящей газовой магистрали на постоянном уровне. На вспомогательном регуляторе устанавливается заданное значение, меньшее, чем минимальное ожидаемое давление в газовой сети, и вспомогательный регулятор компенсирует колебания давления. Поддержание давления на постоянном уровне в данном примере может осуществляться при помощи редуктора.

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.4 Аддитивное и мультипликативное наложение возмущения

Если известно влияние возмущения на фактическое значение, то можно менять управляющий сигнал регулятора в соответствии с возмущением. В принципе, можно формировать дополнительный сигнал, пропорциональный возмущению (аддитивное наложение возмущения) или менять весь управляющий сигнал пропорционально возмущению (мультипликативное наложение возмущения).

При использовании этого метода не дожидаются, пока изменение возмущения окажет свое влияние, а немедленно противодействуют ему изменением управляющего сигнала.

#### 6.4.1 Аддитивное наложение возмущения

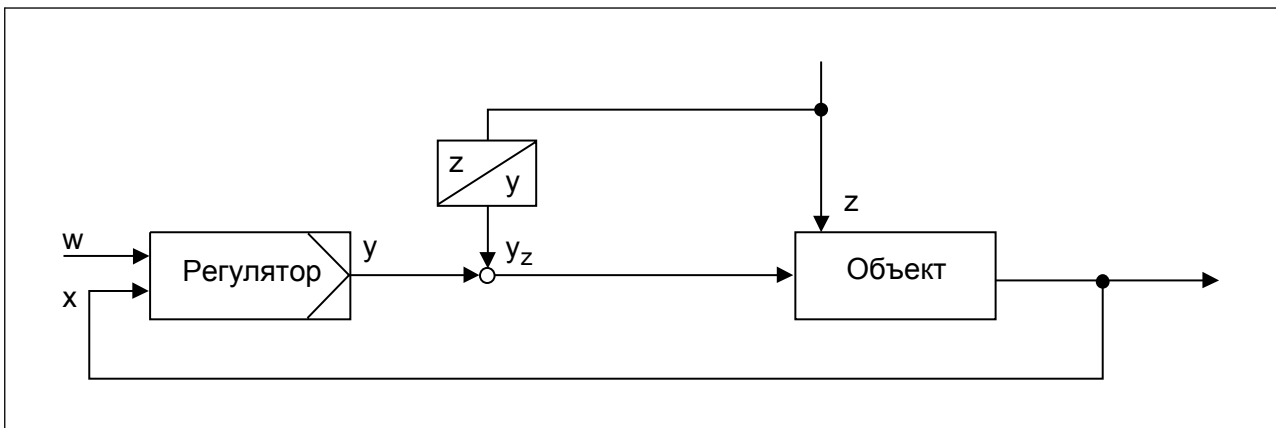


Рисунок 76: Схема с аддитивным наложением возмущения

Этот вид наложения возмущения используется, когда при изменении возмущения должно происходить дополнительное увеличение или уменьшение управляющего сигнала.

Принцип аддитивного наложения возмущения можно пояснить на следующем примере:

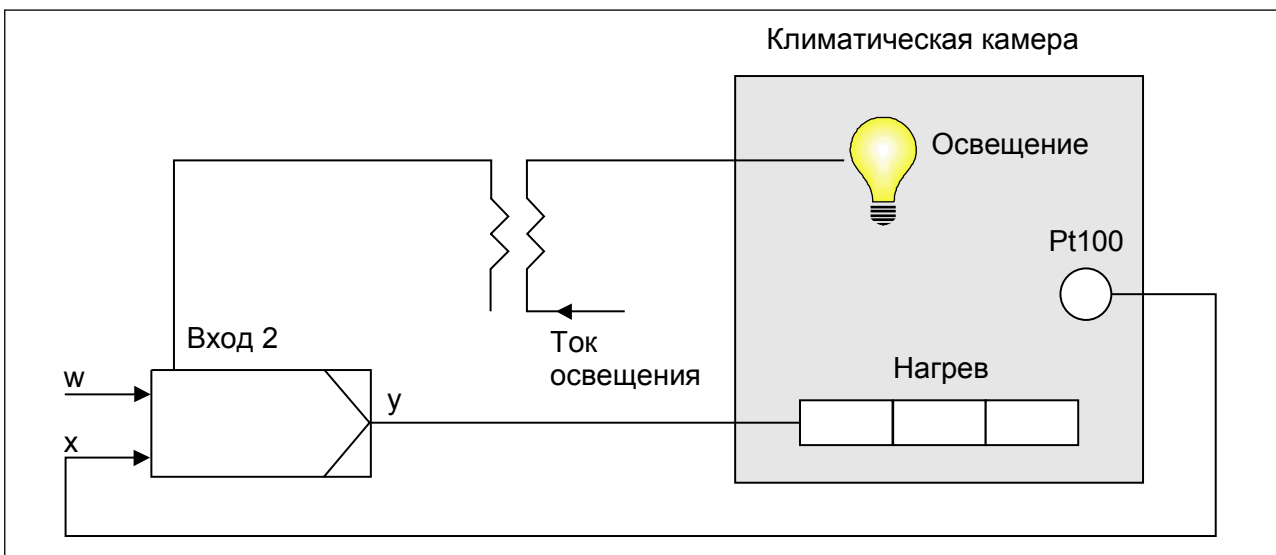


Рисунок 77: Пример аддитивного наложения возмущения

В показанном примере в климатической камере находятся высокочувствительные пробы. Температура должна регулироваться очень точно, кроме того, происходит управление освещением климатической камеры (для этого не используется регулятор).

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

---

Рассмотрим сначала систему без аддитивного наложения возмущения. В климатической камере достигнуто равенство фактической температуры заданной, равной 37 °С. Мощность, выделяемая освещением во внутреннем пространстве камеры, представляет собой возмущение. Если лампа неожиданно включается, то, помимо нагревателя, она выделяет дополнительную энергию. Температура повышается, например, до 40 °С и регулятор уменьшает свой управляющий сигнал, пока температура в камере вновь не достигнет 37 °С.

Выброс фактического значения сокращается при помощи аддитивного наложения возмущения: Ток, который протекает через цепь освещения, измеряется и после преобразования (например, 1000 : 1) подается на выход 2 регулятора. Входной сигнал масштабируется соответствующим образом, и регулятор использует его для аддитивного наложения возмущения. Если происходит повышение тока освещения, то управляющий сигнал регулятора уменьшается. Снижение мощности нагревателя соответствует фактической мощности освещения. Таким образом, мощность системы при включении освещения остается постоянной. Тем не менее, из-за наличия звеньев с задержками, у фактического значения, произойдет выброс, но рассогласование будет значительно меньше.

Необходимо помнить, что аддитивное наложение возмущения не является ограничением управляющего сигнала.

Масштабирование входа 2 должно производиться так, чтобы при включении освещения соответствующая разность вычиталась из управляющего сигнала. Пример: Регулятор формирует управляющий сигнал 0 ... 100 %, соответствующий мощности 0 ... 1000 Вт. Освещение имеет суммарную мощность 100 Вт.

Трансформатор выдает при максимальной мощности освещения 5 мА. Масштабирование выхода 2 в диапазоне 0 ... 5 мА соответствует 0 ... -10 (при 5 мА управляющий сигнал уменьшается на 10 %, при 0 мА не уменьшается).

### **Вывод:**

**Если при изменении возмущения необходимо прибавлять / вычитать дополнительный управляющий сигнал, пропорциональный изменению возмущения, то используется аддитивное наложение возмущения.**

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.4.2 Мультипликативное наложение возмущения

Мультипликативное наложение возмущения влияет на общий передаточный коэффициент  $K_P$  и тем самым на общий управляющий сигнал. Если измеренное возмущение меняет свое значение, то установленный на регуляторе коэффициент  $K_P \left( \frac{1}{X_P} \cdot 100\% \right)$  меняется в том же отношении в диапазоне 0 ... 100 %.

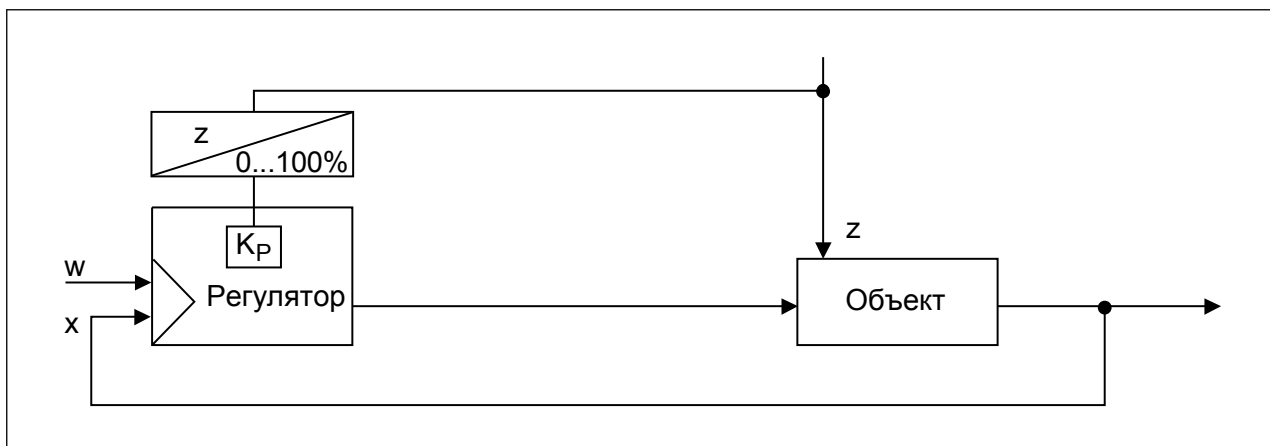


Рисунок 78: Схема с мультипликативным наложением возмущения

Этот метод находит применение, когда при регулировании некоторого процесса управляющий сигнал регулятора должен меняться в той же отношении, что и возникающее возмущение.

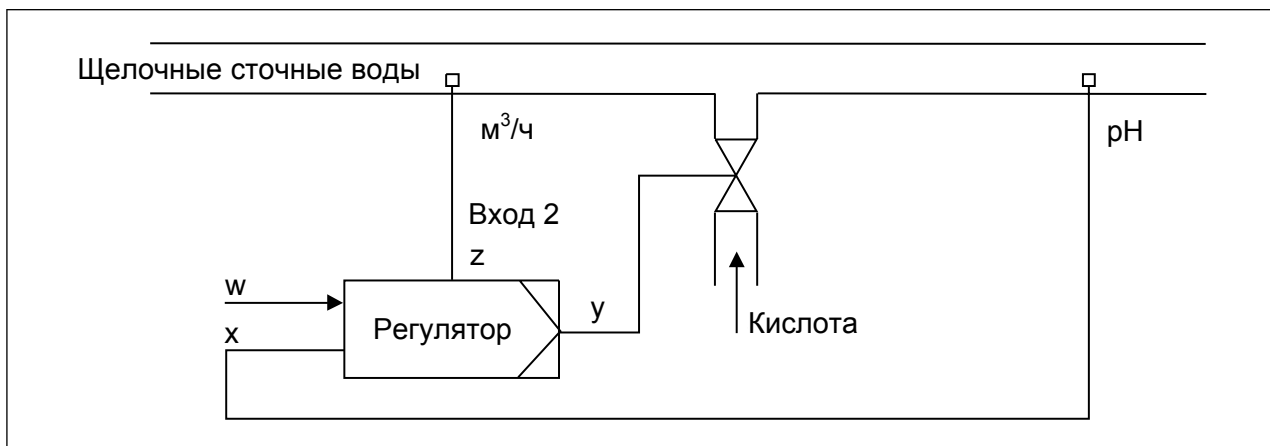


Рисунок 79: Нейтрализационная установка

В качестве примера можно привести нейтрализационную установку (Рисунок 79), в которой сточные воды, содержащие щелочь, должны нейтрализоваться кислотой. Регулируемой величиной является уровень pH, который должен находиться в нейтральной области. Регулятор оказывает влияние на уровень pH, меняя приток кислоты ( $y$ ). Рассмотрим сначала принцип действия без мультипликативного наложения возмущения: Регулятор достиг равенства фактического и заданного значений при заданном расходе жидкости при управляющем сигнале 30 %. Теперь расход, являющийся возмущением, поменялся, и количество сточных вод в единицу времени удвоилось. Уровень pH увеличится, и регулятор должен увеличивать управляющий сигнал до тех пор, пока регулируемая величина снова не достигнет заданного значения. Это произойдет при управляющем сигнале 60 % (удвоенное количество кислоты). Мы видим, что для того, чтобы регулируемая величина при прочих равных условиях оставалась постоянной, управляющий сигнал должен быть пропорционален возмущению.

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### Рассмотрим наш пример с мультипликативным наложением возмущения:

Регулятор добился равенства фактического и заданного значений, например, при управляющем сигнале 30 %. Теперь расход, являющийся возмущением, удваивается. Мультипликативное наложение возмущения приводит к тому, что передаточный коэффициент (соответствующий общему передаточному коэффициенту, Рисунок 48) также удваивается. Новый управляющий сигнал регулятора немедленно становится равным 60 %, и не возникает существенных рассогласований.

Масштабирование выхода 2 должно осуществляться так, чтобы при расходе 0 ... 100 % формировался множитель 0 ... 100 %: Если расходомер выдает сигнал по току 4 ... 20 мА (0 ... 60 м<sup>3</sup>/ч), то масштабирование должно составлять 0 ... 100 %.

Вычисленный регулятором управляющий сигнал должен при 60 м<sup>3</sup>/ч умножаться на 100 %, а, например, при 30 м<sup>3</sup>/ч на 50 %.

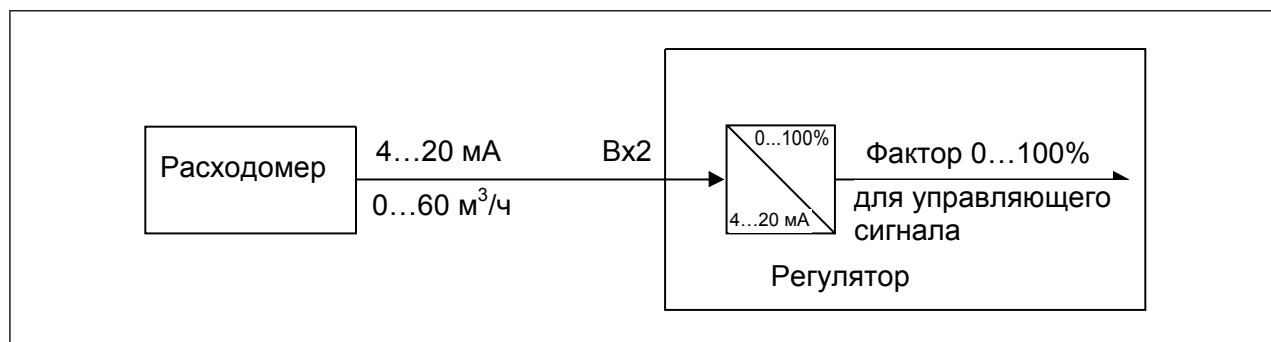


Рисунок 80: Пример масштабирования выхода 2 (наложение возмущения)

### Вывод:

Если управляющий сигнал регулятора должен умножаться на множитель 0 ... 100 % (пропорционально возмущению), то применяется мультипликативное наложение возмущения.

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.5 Грубое / точное регулирование

Если в потоке вещества необходимо регулировать некоторую величину, может оказаться целесообразным при помощи «грубого регулятора» добиваться близости фактического и заданного значений. Затем точный регулятор выполняет функцию окончательного устранения рассогласования.

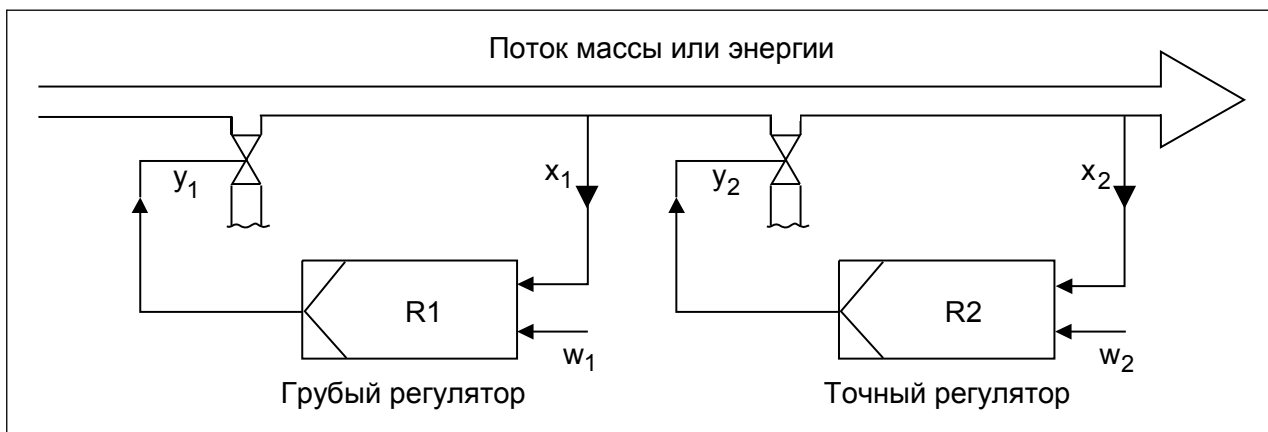


Рисунок 81: Грубое / точное регулирование

Примером может служить снова нейтрализационная установка, которая должна добиться уровня pH в сточных водах, равного pH7.

Грубый регулятор должен работать очень быстро, но не обязательно устранять рассогласование. Поэтому в нем часто используется П- или ПД-структура.

Точный регулятор получает то же самое заданное значение и должен устранять рассогласование, здесь часто применяется ПИД-структура.

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.6 Каскадное регулирование

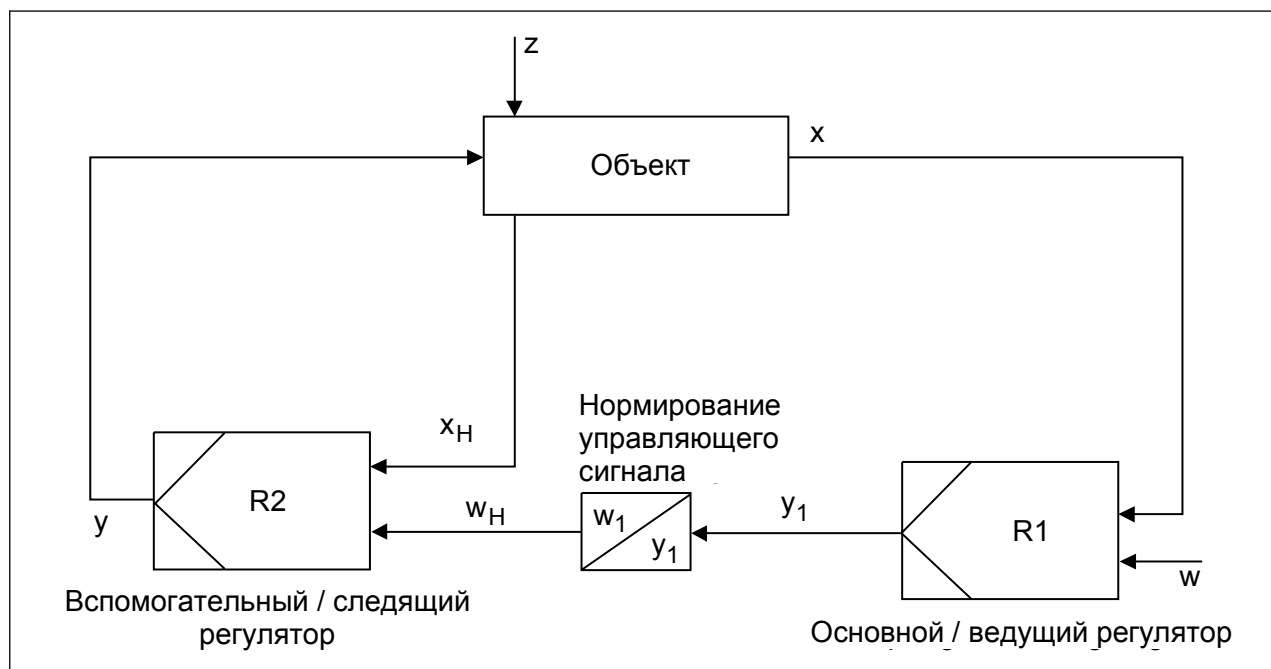


Рисунок 82: Каскадное регулирование

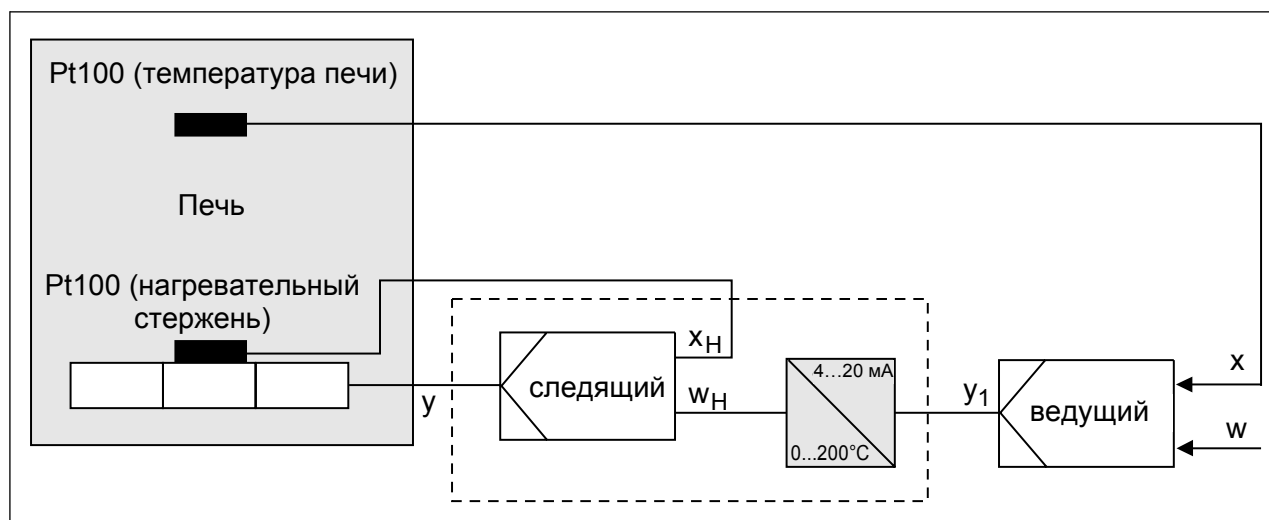
При каскадном регулировании несколько контуров регулирования вкладываются один в другой. Имеются, как минимум, 2 регулятора. Ведущий регулятора является аналоговым регулятором, управляющий сигнал которого ( $y_1$ ) подается на следящий регулятор. Следящий регулятор перенимает управляющий сигнал ведущего регулятора, выполняет его нормирование и использует результат в качестве заданного значения ( $w_H$ ). Своим управляющим сигналом ведущий регулятор указывает следящему регулятору, равенства какому значению он должен добиваться от вспомогательного фактического значения ( $x_H$ ).

На Рисунке 83 показана печь, в которой необходимо добиваться равенства нескольких фактических значений нескольким заданным значениям. Температура нагревательного стержня не должна превосходить  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Причиной этого может являться то, что при более высоких температурах газ, имеющийся в печи, возгорается и происходит взрыв.

Покажем на этом примере, как работает каскадное регулирования, и какие преимущества оно дает.



## 6 Схемы для улучшения качества регулирования



**Рисунок 83: Каскадное регулирование промышленной печи**

В этом примере ведущий регулятор отвечает за то, чтобы внутри печи было обеспечено равенства фактического значения заданному. На этом регуляторе устанавливается заданное значение температуры печи и вычисляется необходимый управляющий сигнал: Выходной сигнал ведущего регулятора (в примере 4 ... 20 мА / 0 ... 100 %) подается на следящий регулятор (чаще всего на вход 2).

В следящем регуляторе выполняется нормирование управляющего сигнала: 4... 20 мА или управляющий сигнал 0 ... 100 % соответствуют заданному значению 0 ... 200 °С для следящего регулятора. Если, например, ведущий регулятор выдает управляющий сигнал 100 %, то для следящего регулятора это означает заданное значение 200 °С (он добивается того, чтобы температура нагревательного стержня была равна 200 °С). Ведущий регулятор своим управляющим сигналом (0 ... 100 %) задает в конечном итоге температуру нагревательного стержня 0 ... 200 °С. Эта температура в данной установке никогда не превзойдет 200 °С.

В показанном примере каскадное регулирование обладает тем преимуществом, что температура нагревательного стержня находится под контролем (никогда не будет температуры > 200 °С). Существуют сходные приложения, в которых необходимо предотвратить ситуацию, когда накопители энергии в процессе регулирования чересчур часто заряжаются, что приводит к перерегулированию.

Кроме того, можно утверждать, что введение каскадного регулирования в целом повышает управляемость системы регулирования, так как время задержки объекта регулирования распределяется, как минимум, между двумя регуляторами.

### Оптимизация

При оптимизации каскадного регулирования необходимо сначала оптимизировать внутренний контур регулирования и только затем – внешний. В нашем примере это означает следующее. Мы переводим ведущий регулятор в ручной режим и задаем средний управляющий сигнал (например, 60 %).

Для следящего регулятора (работающего в автоматическом режиме) управляющий сигнал 60 % означает заданное значение температуры нагревательного стержня 120 °С. Теперь мы можем применить для следящего регулятора процедуру самооптимизации, описанную в главе 7.1.1 «Метод незатухающих колебаний». После этого следящий регулятор будет оптимизирован. Теперь ведущий регулятор можно снова переключить в автоматический режим и выполнить для него также процедуру самооптимизации (следающий регулятор остается также в автоматическом режиме).

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

---

### Структура регулятора

От следящего регулятора требуется быстрое поведение. Поэтому для него чаще всего выбирают П- или ПД-структуру. Будет ли в нашем примере при управляющем сигнале 50 % действительно достигнута температура 100 °С или же, например, 95 °С, не имеет первостепенного значения. За точное регулирование отвечает ведущий регулятор.

При использовании самооптимизации для следящего регулятора необходимо помнить, что эта процедура чаще всего активирует ПИД-структуру. После самооптимизации необходимо вручную переключиться на П- или ПД-структуру.

Для ведущего регулятора в большинстве случаев используется ПИД-структура.

Для следящего регулятора необходимо, чтобы он обладал аналоговым входом (в нашем примере вход должен масштабироваться на 4 ... 20 мА / 0 ... 200 °С). Должна существовать возможность конфигурации этого входа для внешнего заданного значения.

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

### 6.7 Регулирование пропорции

Регуляторы пропорции применяются для управления горелками (регулирование соотношения смеси газ / воздух), в технике аналитических измерений (смешивание реагентов) и в технологии производственных процессов (производство смесей).

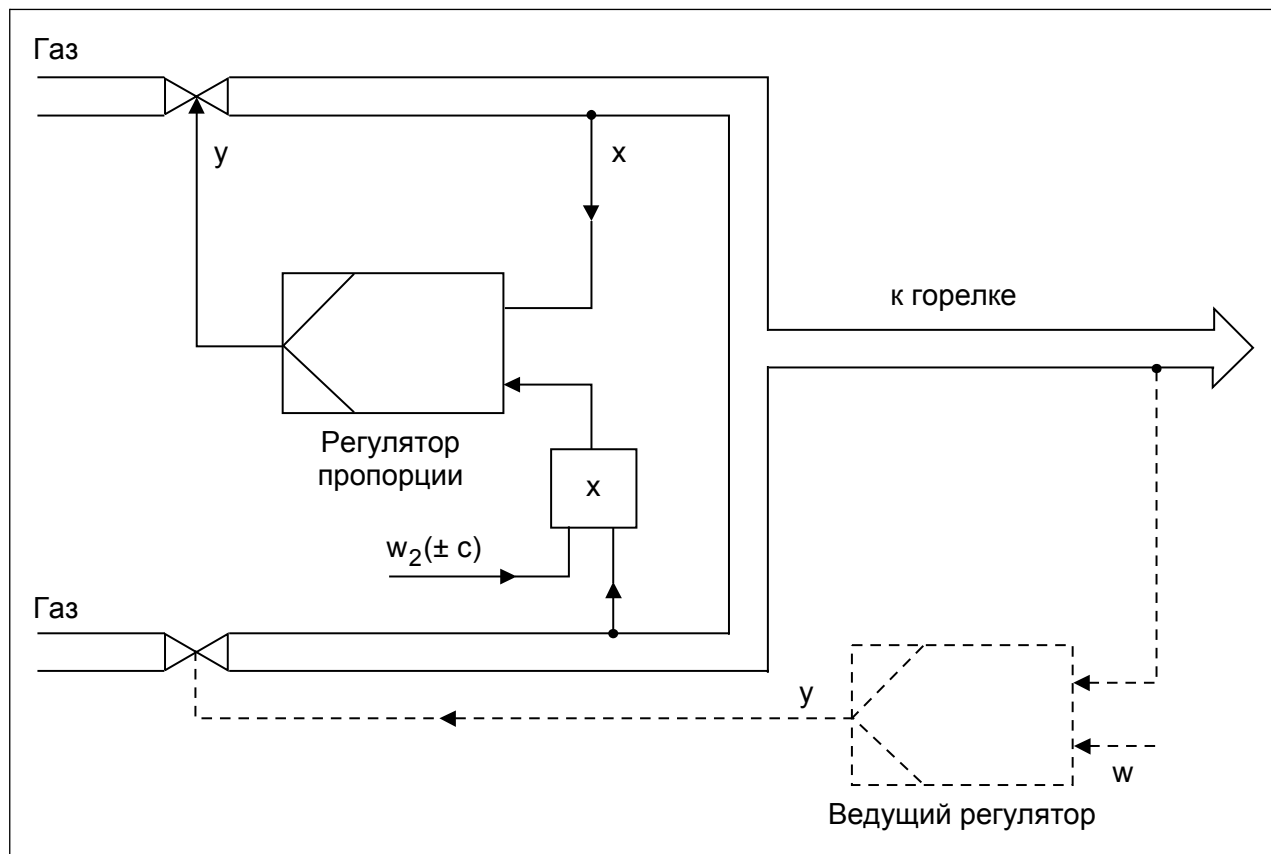


Рисунок 84: Регулирование пропорции

На Рисунке 84 регулятор пропорции измеряет расход воздуха в подающей линии. Измеренный расход воздуха умножается на заданное значение пропорции. В результате получается заданное значение для расхода газа, которого должен добиваться регулятор пропорции.

Чтобы можно было регулировать общий расход смеси, подводимой к горелке, необходим второй регулятор (изображен со штриховкой). У ведущего регулятора задается общий расход. Он, в соответствии с, например, увеличившимся заданным значением, открывает воздушный клапан, регулятор пропорции регулирует подачу газа в заданном соотношении. Цель регулирования достигнута, когда как общий расход, так и пропорция отрегулированы.

Вместо общего расхода смеси ведущий регулятор часто напрямую регулирует температуру печи. Если в данном примере устанавливается более высокое заданное значение для температуры печи, то ведущий регулятор также открывает воздушный клапан, а регулятор пропорции регулирует требуемое соотношение.

#### Оптимизация регулятора пропорции и ведущего регулятора

Сначала выполняется оптимизация регулятора пропорции. Ведущий регулятор переводится в ручной режим, и на нем задается типичный управляющий сигнал (например, 50 %). Воздушный клапан открывается наполовину, после этого можно оптимизировать регулятор пропорции. В конкретном примере может возникнуть трудность, состоящая в том, что при неблагоприятном

## 6 Схемы для улучшения качества регулирования

---

отношении смеси газа и воздуха не сможет произойти воспламенения.

Когда регулятор пропорции оптимизирован, можно снова переключить ведущий регулятор в автоматический режим и выполнить его оптимизацию.

**Примечание:**

Некоторые регуляторы фирмы JUMO можно непосредственно конфигурировать как регуляторы пропорции.

У таких регуляторов требуемое соотношение устанавливается в качестве заданного значения.

Кроме этого, на дисплей выводится фактическое значение отношения смеси.

# 7 Специальные функции регуляторов

## 7 Специальные функции регуляторов

К настоящему моменту мы познакомились с основной регулировочной функцией компактных регуляторов фирмы JUMO, однако они обладают множеством других функций. Эти функции облегчают сервисное обслуживание или позволяют сократить количество периферийных компонентов, снижая тем самым расходы.

В этой главе мы собираемся описать важные функции, часть которых относится исключительно к регуляторам фирмы JUMO.

### 7.1 Самооптимизация

При помощи самооптимизации регуляторы фирмы JUMO определяют, помимо наилучших с их точки зрения параметров регулирования, также дальнейшие величины, например, длительность периода переключения у двух- и трехточечных регуляторов.

Почти во все компактные регуляторы фирмы JUMO встроена самооптимизация методом незатухающих колебаний. Как мы увидим, эта методика неприменима для некоторых особых процессов. Поэтому во многих приборах также реализован метод самооптимизации по переходной характеристике. Оба метода будут описаны в настоящей главе.

В обоих случаях регулятор идентифицирует объект регулирования и по его свойствам вычисляет параметры регулирования. **Поэтому оптимизация должна выполняться при реальных условиях эксплуатации.** Например, нельзя выполнять оптимизацию для пустой закалочной печи, если в дальнейшем в ней должно находиться 2.000 кг стали.

#### 7.1.1 Метод незатухающих колебаний

При использовании метода незатухающих колебаний регулятор выдает попеременно выходной сигнал 0 и 100 %. По реакции фактического значения он находит наилучшие параметры регулирования:

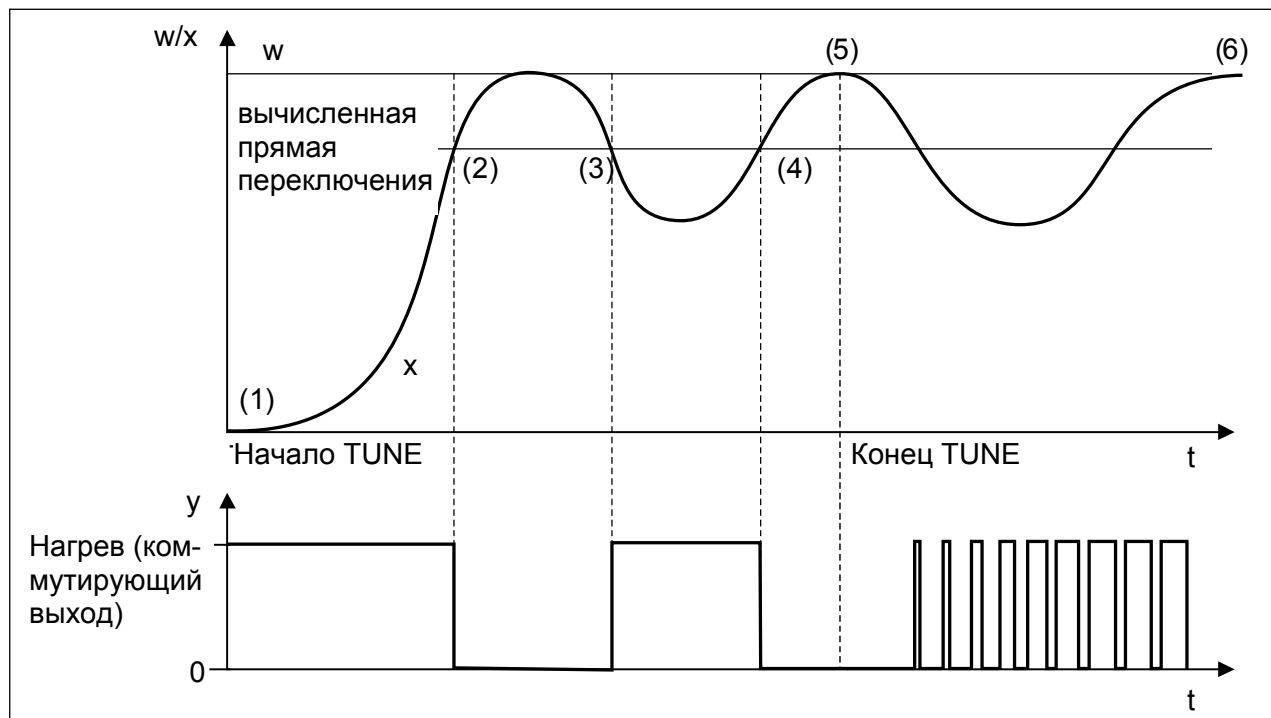


Рисунок 85: Самооптимизация методом незатухающих колебаний

## 7 Специальные функции регуляторов

---

Самооптимизацию в случае объекта, где регулируется температура, можно начать в холодном состоянии. Важно, однако, чтобы было установлено типичное для данной установки заданное значение.

Если, например, предполагаемое в дальнейшем заданное значение составляет 800 °С, то не имеет смысла выполнять самооптимизацию при 200 °С (объекта регулирования при такой рабочей точке будет показывать иное поведение). В данном примере перед началом самооптимизации следует установить заданное значение около 800 °С.

Рассмотрим в деталях принцип действия процедуры самооптимизации (Рисунок 85):

- (1) Установка находится в холодном состоянии, устанавливается типичное заданное значение, и начинается самооптимизация. Регулятор выдает выходной сигнал 100 %, и фактическое значение начинает возрастать.
- (2) Регулятор вычисляет прямую переключения. На ней выходной сигнал изменяется до 0 %. В установке продолжает выделяться накопленное тепло. В идеальном случае фактическое значение достигнет точно заданного значения, прежде чем его направление изменения сменит знак.
- (3) Печь охлаждается, мощность снова меняется до 100 %.
- (4) Выход снова деактивируется.
- (5) Если фактическое значение снова достигает своего максимума, то самооптимизация считается законченной. Регулятор перенимает найденные параметры в активный набор параметров и доводит фактическое значение до установленного заданного значения (6).

### Примечание:

**В целях безопасности следует всегда рассчитывать на то, что фактическое значение в пике превысит заданное. Если это может повлечь за собой повреждение установки или материалов, то при использовании этой процедуры необходима осторожность (при самооптимизации по возможности следует устанавливать небольшое заданное значение).**

Можно также запустить процедуру самооптимизации, когда фактическое значение находится вблизи заданного. В этом случае прямая переключения будет проходить почти на уровне заданного значения, пик фактического значения в любом случае будет превышать заданное значение.

Указанный метод оптимизации является стандартным для регуляторов фирмы JUMO, и в большинстве случаев он дает результаты от очень хороших до удовлетворительных. В следующих случаях этот метод неприменим или дает плохие результаты:

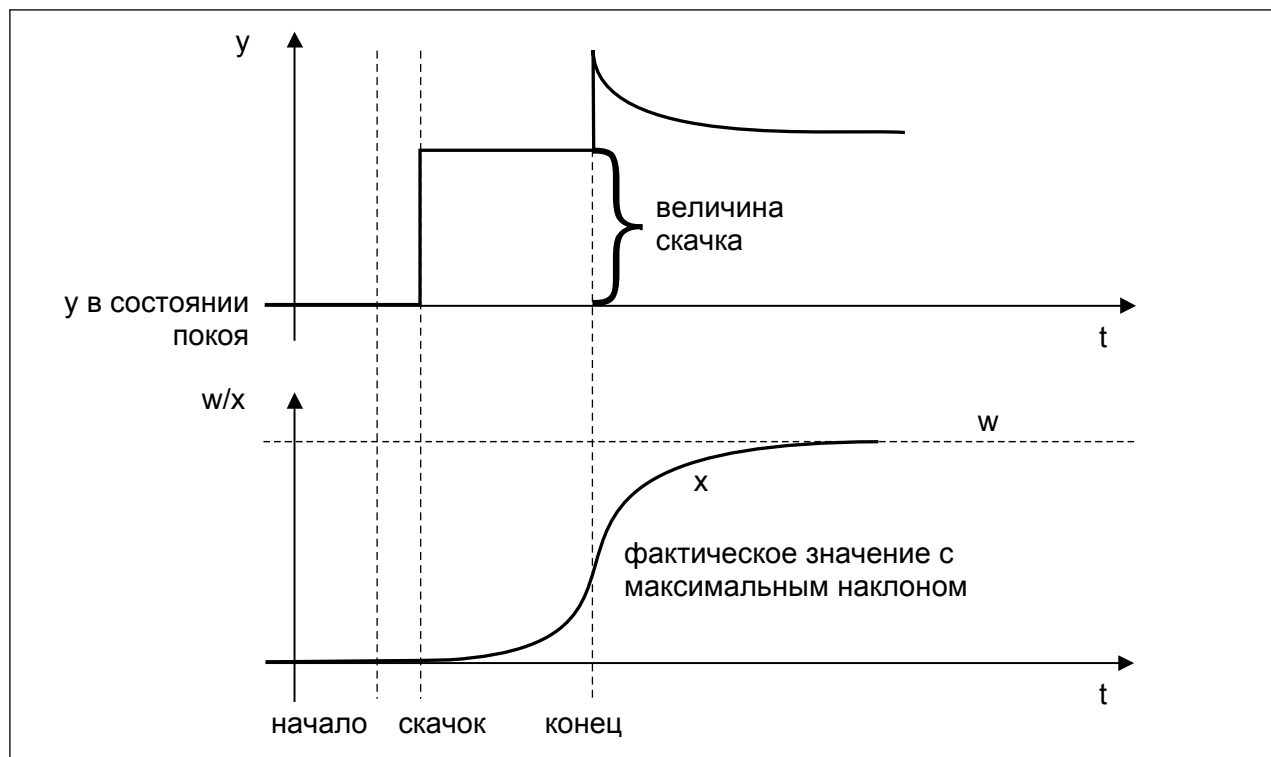
- Скачки управляющего сигнала 0 ↔ 100 % недопустимы для процесса.
- Объект регулирования можно лишь с большим трудом заставить перейти в режим колебаний (например, в случае хорошо изолированной печи).
- Фактическое значение ни в коем случае не должно превышать заданное.

В этих случаях можно воспользоваться методом переходной характеристики.

## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.1.2 Метод переходной характеристики

Для метода переходной характеристики у регулятора задаются управляющий сигнал состояния покоя и величина скачка. По реакции фактического значения на скачок управляющего сигнала регулятор вычисляет наилучшие параметры регулирования:



**Рисунок 86: Самооптимизация по методу переходной характеристики**

На Рисунке 88 показано, как этот метод работает, начиная с холодного состояния. Устанавливается заданное значение для установки, и происходит запуск процедуры самооптимизации. Регулятор формирует управляющий сигнал состояния покоя (в примере 0 %). При беспокойном поведении фактического значения регулятор выжидает, пока оно не примет устойчивое значение. Затем происходит повышение управляющего сигнала на заданную величину скачка, и фактическое значение увеличивается. Регулятор ждет, пока фактическое значение не будет нарастать с максимальной скоростью. В этот момент вычисляются параметры регулирования, и после этого производится регулирование с этими параметрами.

Как указано в главе 7.1.1 «Метод незатухающих колебаний», этот метод может применяться в тех случаях, когда в процессе самооптимизации фактическое значение не должно превышать некоторого порога.

В этом случае регулятор переключается в ручной режим, и задается управляющий сигнал, при котором фактическое значение оказывается ниже критического диапазона (необходимо дождаться завершения процессов выравнивания). Допустим, что мы нашли, что управляющий сигнал должен составлять 65 % при фактическом значении 200 °С.

Минимальная величина скачка равна 10 %. Оптимизация работает тем точнее, чем больший скачок будет выбран. В нашем примере мы задаем управляющий сигнал покоя, равный 45 %, и величину скачка 20 %.

## 7 Специальные функции регуляторов

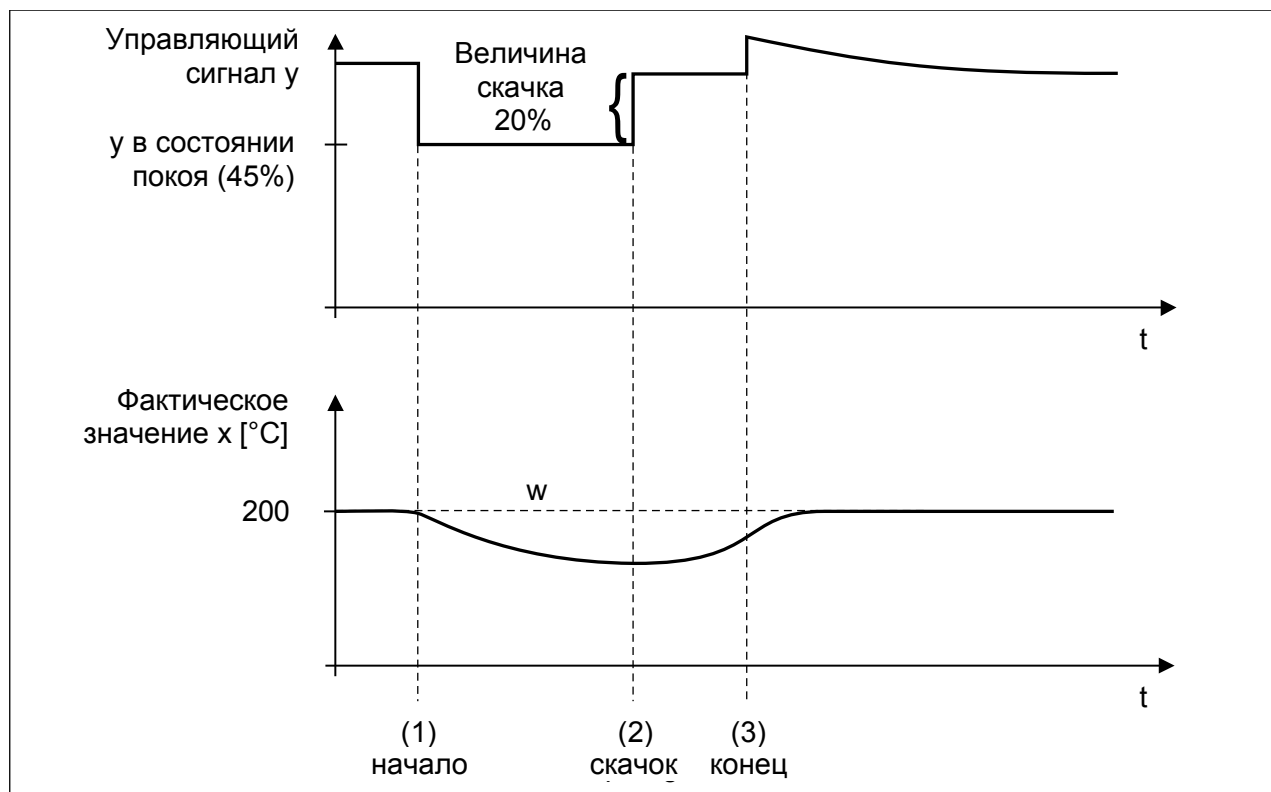


Рисунок 87: Запуск процедуры самооптимизации во время эксплуатации

На Рисунке 87 показаны условия в течение самооптимизации. В момент (1) регулятор переводится в автоматический режим, и происходит запуск самооптимизации. Регулятор меняет управляющий сигнал до уровня 45 %, и фактическое значение начинает убывать. Когда регулируемая величина достигает устойчивого значения, происходит повышение управляющего сигнала на величину скачка (20%) (2). Когда регулятор определяет, что достигнута максимальная скорость изменения фактического значения, он вычисляет параметры регулирования, являющиеся с его точки зрения наилучшими, и с этими параметрами добивается равенства фактического значения заданному (здесь 200 °C).

### 7.1.3 Дальнейшие сведения о методах оптимизации

Метод незатухающих колебаний может применяться для всех регуляторов, допускающих конфигурирование (непрерывные, двухточечные, трехточечные, трехточечные ступенчатые и позиционные регуляторы).

Это относится и к методу переходной характеристики, с той оговоркой, что для трехточечных ступенчатых регуляторов он может применяться лишь при определенных условиях.

Управляющий сигнал покоя может быть задан только равным 0 %, а величина скачка – только 100 %. Это находит свое обоснование в том, что трехточечный ступенчатый регулятор не обладает сведениями о фактическом положении клапана, см. главу 5.5.1 «Трехточечный ступенчатый регулятор».

При использовании обоих методов, какая бы структура регулятора не была задана, он всегда переключается в режим ПИД и, соответственно этому, вычисляет  $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$ .

Имеются два исключения:

Если перед оптимизацией происходит переключение на ПИ-структуру, эта настройка остается, и регулятор выполняет самооптимизацию как ПИ-регулятор. Причина этого состоит в том, что дифференциальная составляющая делает некоторые объекты неустойчивыми. Если об объекте известно, что он подвержен такой неустойчивости (это имеет место, например, для объектов с

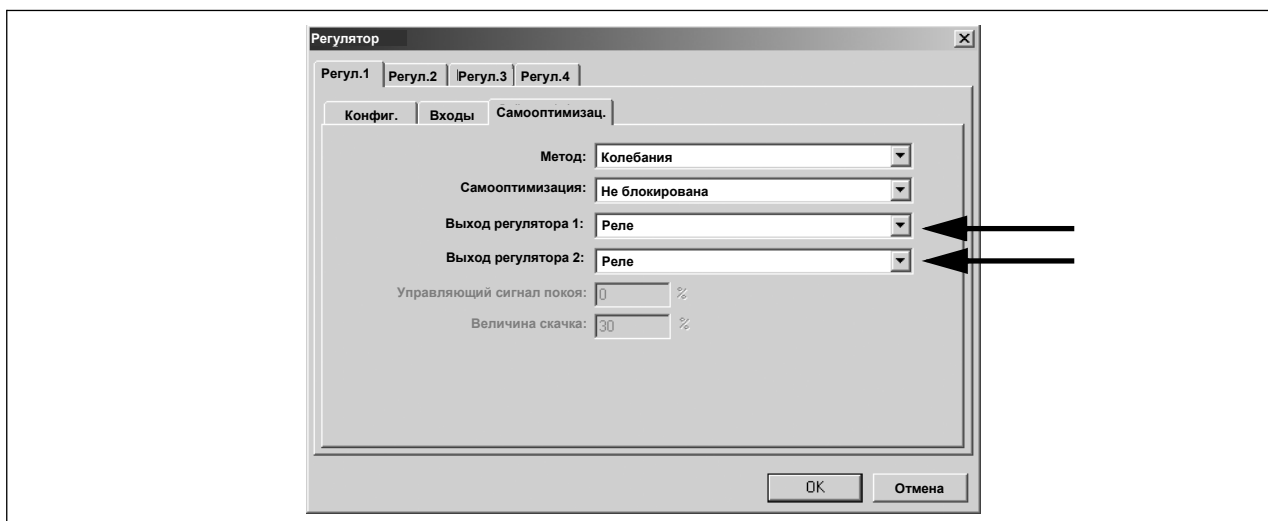


## 7 Специальные функции регуляторов

регулированием давления или расхода жидкости), то перед самооптимизацией можно активировать ПИ-структуру. Если регулятор распознает объект первого порядка, то он также переключается на ПИ-структуру.

Помимо параметров регулирования для ПИД-структуры, регулятор вычисляет период переключения в случае двух- и трехточечных регуляторов. Далее он определяет параметры фильтра для входа фактического значения. В случае трехточечных, трехточечных ступенчатых и позиционных регуляторов пользователю необходимо затем вручную задать контактное расстояние, см. главу 5.4 «Трехточечный регулятор» и следующие страницы.

Чтобы при самооптимизации найти период переключения, близкий к оптимальному, например, для нагревательного и охладительного агрегата, необходимо сконфигурировать у регулятора типы выходов.



**Рисунок 88: Задание типа выходов регулятора для самооптимизации**

Возможны следующие типы выходов регулятора:

- Реле: Период переключения задается столь коротким, сколь это действительно необходимо. Реле должны работать в максимально щадящем режиме.
- Полупроводники + логика: Период переключения задается как можно короче (выход будет переключаться очень часто).
- Аналоговый выход

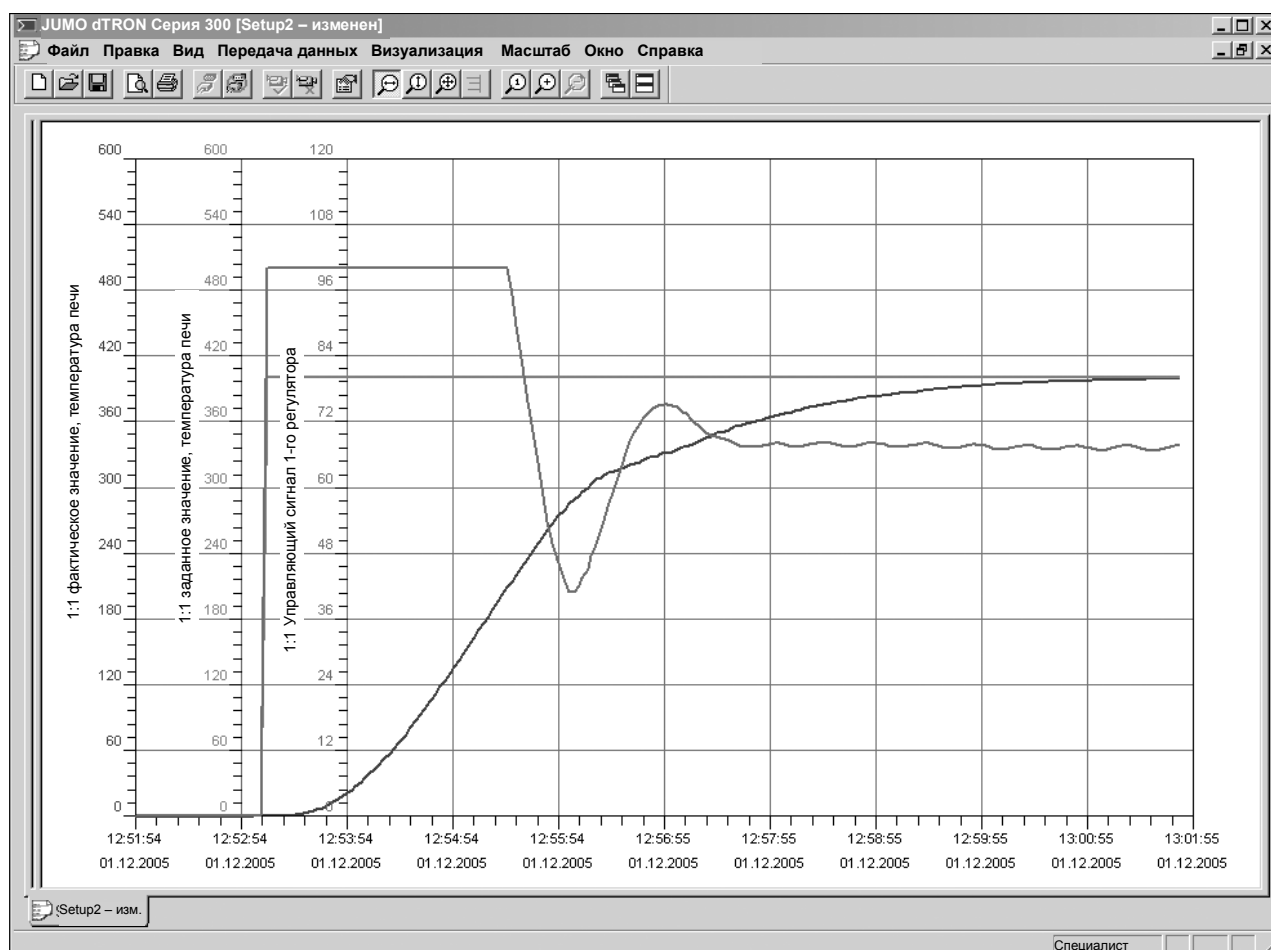
## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.2 Startup и телесервис / диагностика

При вводе в эксплуатацию, сервисном обслуживании и т.д. иногда требуется записывать различные параметры процессов (например, поведение фактического значения при переходе к новому заданному значению).

В таком случае обычно требуется дополнительное оборудование. Самописец должен записывать значения параметра, второй датчик должен быть помещен в области процесса, что требует дополнительных затрат.

Регуляторы фирмы JUMO в большинстве случаев конфигурируются при помощи специальной, предназначенной для этого программы (Setup) через интерфейс. При помощи опции Startup программы конфигурации можно в онлайн-режиме записывать многие параметры процесса, имеющиеся в регуляторе, и передавать их в ПК:



**Рисунок 89: Записанные при помощи Startup в онлайн-режиме данные регулятора фирмы JUMO**

В примере на Рисунка 89 показаны заданное значение, фактическое значение и управляющий сигнал при изменении заданного значения.

Записанные графики можно распечатывать, сохранять в файлах и включать в документацию установки.

## 7 Специальные функции регуляторов

### Телесервис / диагностика

При помощи функции, известной под названием «телесервис» или «диагностика», при подсоединении регулятора к ПК обеспечивается доступ к важным величинам в онлайн-режиме при помощи программы Setup:

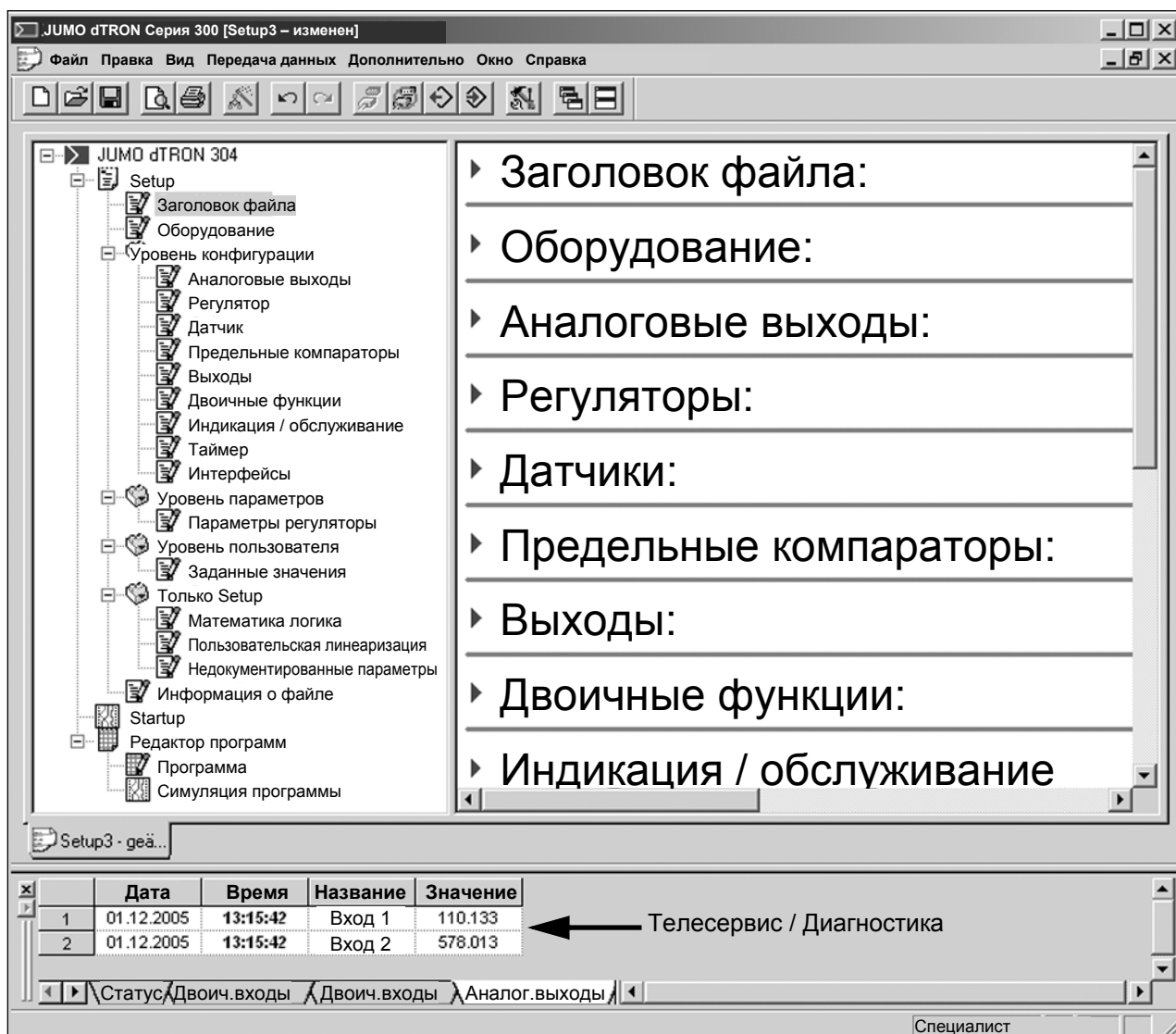


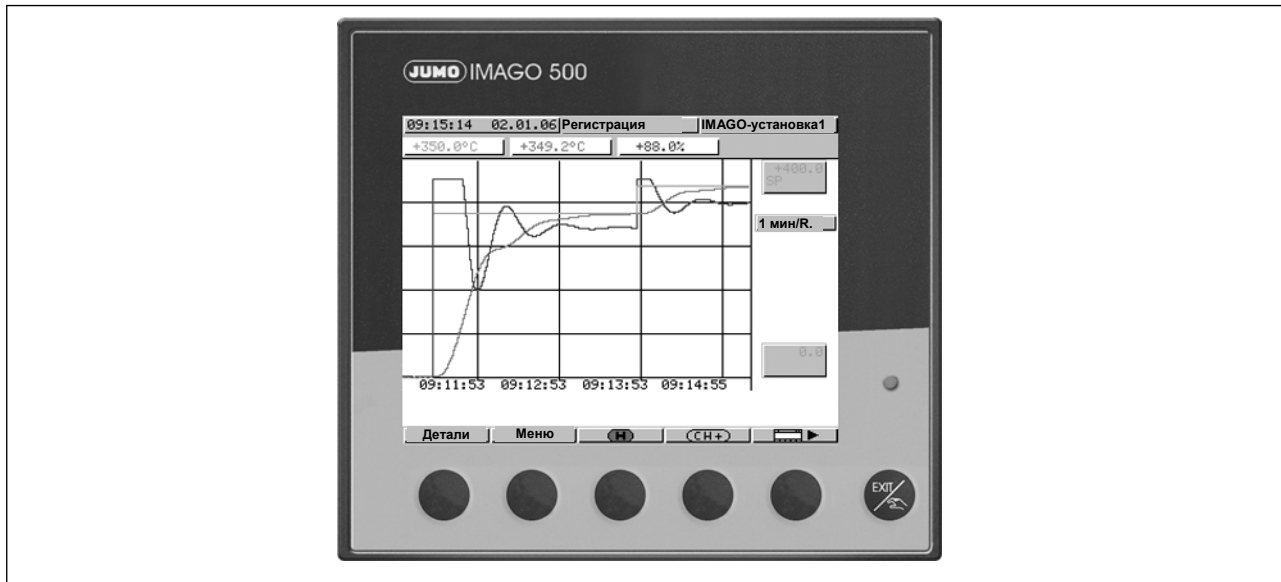
Рисунок 90: Телесервис / диагностика для регулятора JUMO dTRON 300

При помощи этой функции сотрудник сервиса получает удобный обзор параметров регулятора (состояние входов, управляющий сигнал регулятора и т.д.).

## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.3 Функция регистрации

Помимо множества экранных регистраторов, фирма JUMO снабжает также некоторые регуляторы функцией регистрации. Эта функция позволяет записывать любые сигналы регулятора, которые можно затем выводить на дисплей:



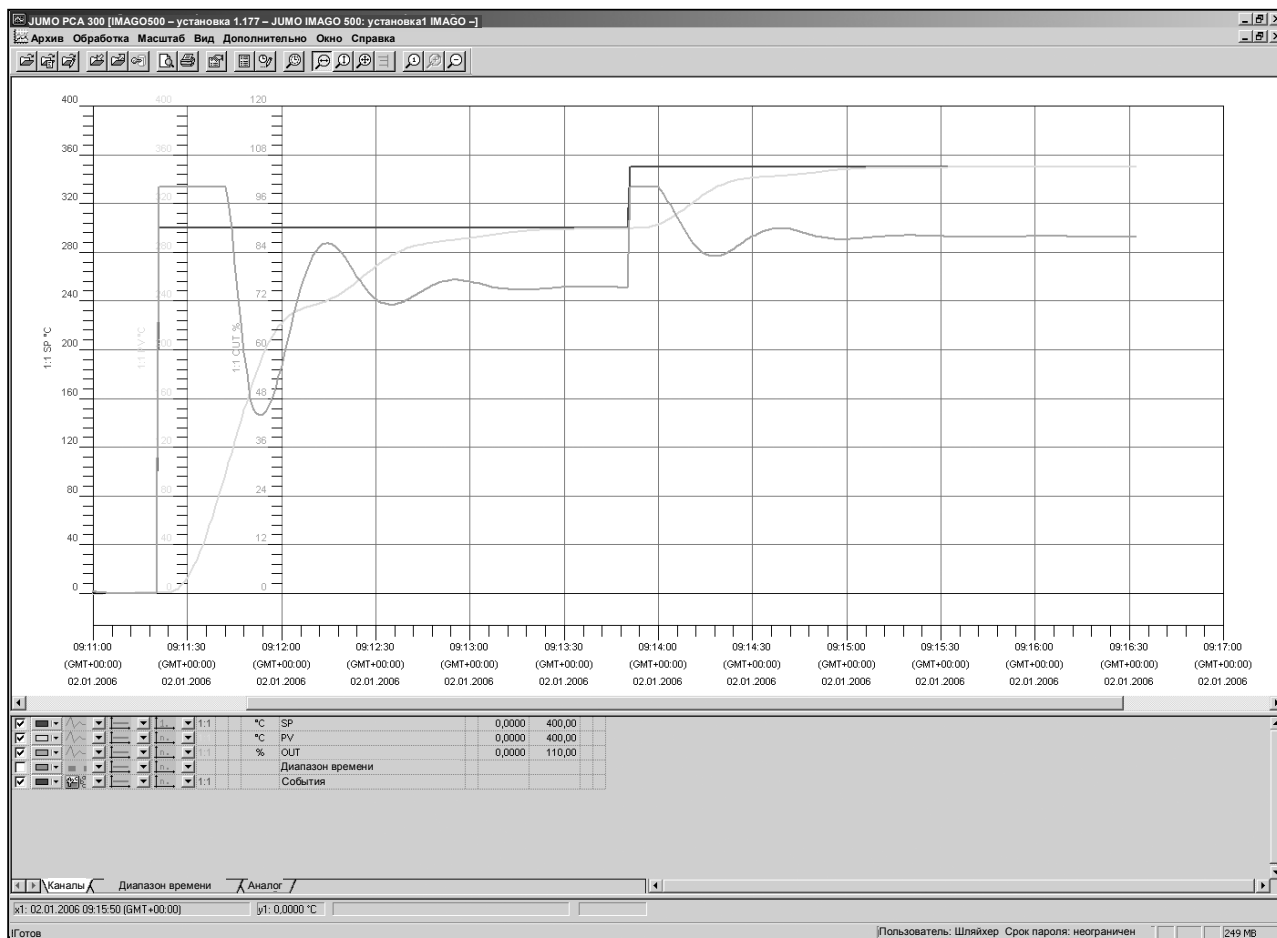
**Рисунок 91: Функция регистрации регистратора JUMO IMAGO 500**

На Рисунке 91 можно увидеть поведение некоторой установки при регулировании. Прибор хранит данные в кольцевом буфере: Если кольцевой буфер полностью заполнен данным, то перезаписываются всегда самые старые данные.

Записи могут ежедневно считываться при помощи ПК и там архивироваться на жестком диске.

## 7 Специальные функции регуляторов

Программа PCA 3000 позволяет проводить анализ данных:



**Рисунок 92: Анализ данных измерений при помощи JUMO PCA 3000**

На Рисунке 92 показаны данные измерений, записанные при помощи JUMO IMAGO 500 и переданные на ПК.

## 7 Специальные функции регуляторов

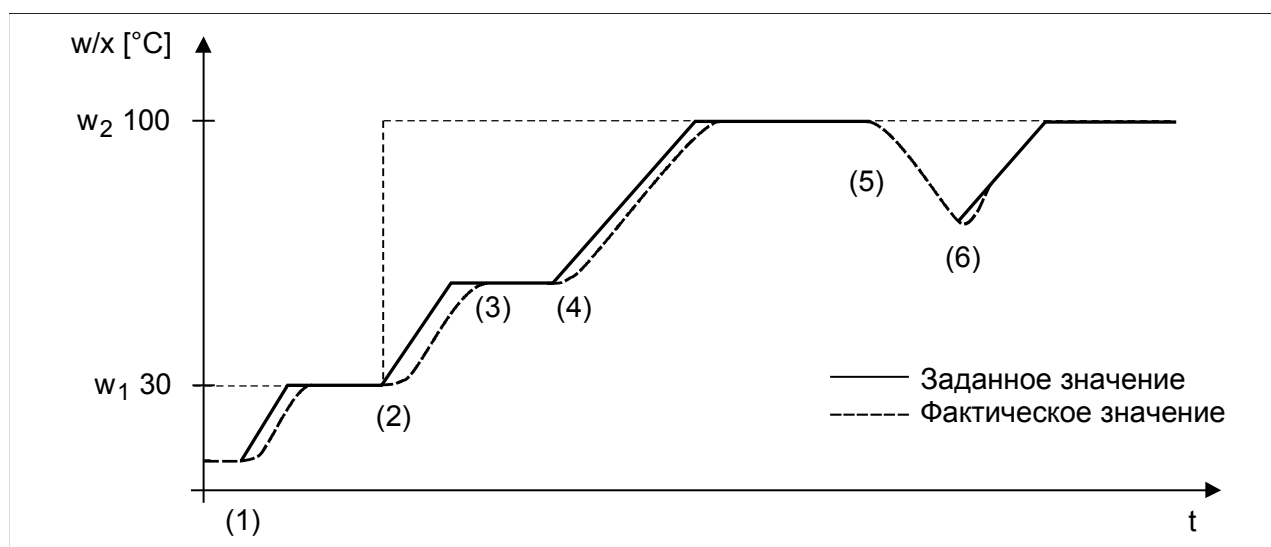
### 7.4 Функция рампы

Если пользователь меняет заданное значение, то переход к новому заданному значению осуществляется скачком.

Такое скачкообразное изменение, – например, заданного значения температуры – является недопустимым для некоторых процессов:

- Определенные материалы должны медленно нагреваться или охлаждаться.
- Если происходит переход к более высокому заданному значению, то мощность нагрева меняется от малой величины, например, до 100 %. По этой причине вблизи нагревателя возникает сильный нагрев, который может вызвать разрушение обрабатываемого материала. Кроме этого, в области процесса возникают большие разности (градиенты) температуры, что неблагоприятно воздействует на некоторые материалы.

Если активирована функция рампы, то переход к новым заданным значениям происходит не скачком, а в виде линейного хода. Наклон рампы, например, в Кельвин / минута, можно конфигурировать на регуляторе.



**Рисунок 93: Функция рампы**

На Рисунке 93 показано, как действует функция рампы у многих регуляторов фирмы JUMO:

- (1) Регулятор включают. Фактическое значение в установке равно малой величине. На регуляторе устанавливается заданное значение 30 °C. Функция рампы сначала устанавливает заданное значение равным текущему фактическому, и затем с заданной крутизной заданное значение меняется в направлении 30 °C.
- (2) Пользователь устанавливает заданное значение, равное 100 °C, и оно начинает расти с заданным в конфигурации наклоном.
- (3) Линейный ход остановлен (это можно делать при помощи специального двоичного входа).
- (4) Линейный ход продолжается (например, двоичный вход с функцией «Остановка линейного хода» был открыт) и достигает нового заданного значения 100 °C.
- (5) Происходит перебой подачи питания, фактическое значение падает.
- (6) Напряжение питание восстановлено. В качестве заданного значения снова принимается текущее фактическое значение. Заданное значение снова растёт до 100 °C с наклоном, определённым пользователем.

## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.5 Программный регулятор

Программный регулятор используется, когда должен быть предписан определенный профиль заданного значения. На Рисунке 94 показаны, помимо профиля заданного значения, пять различных управляющих контактов:

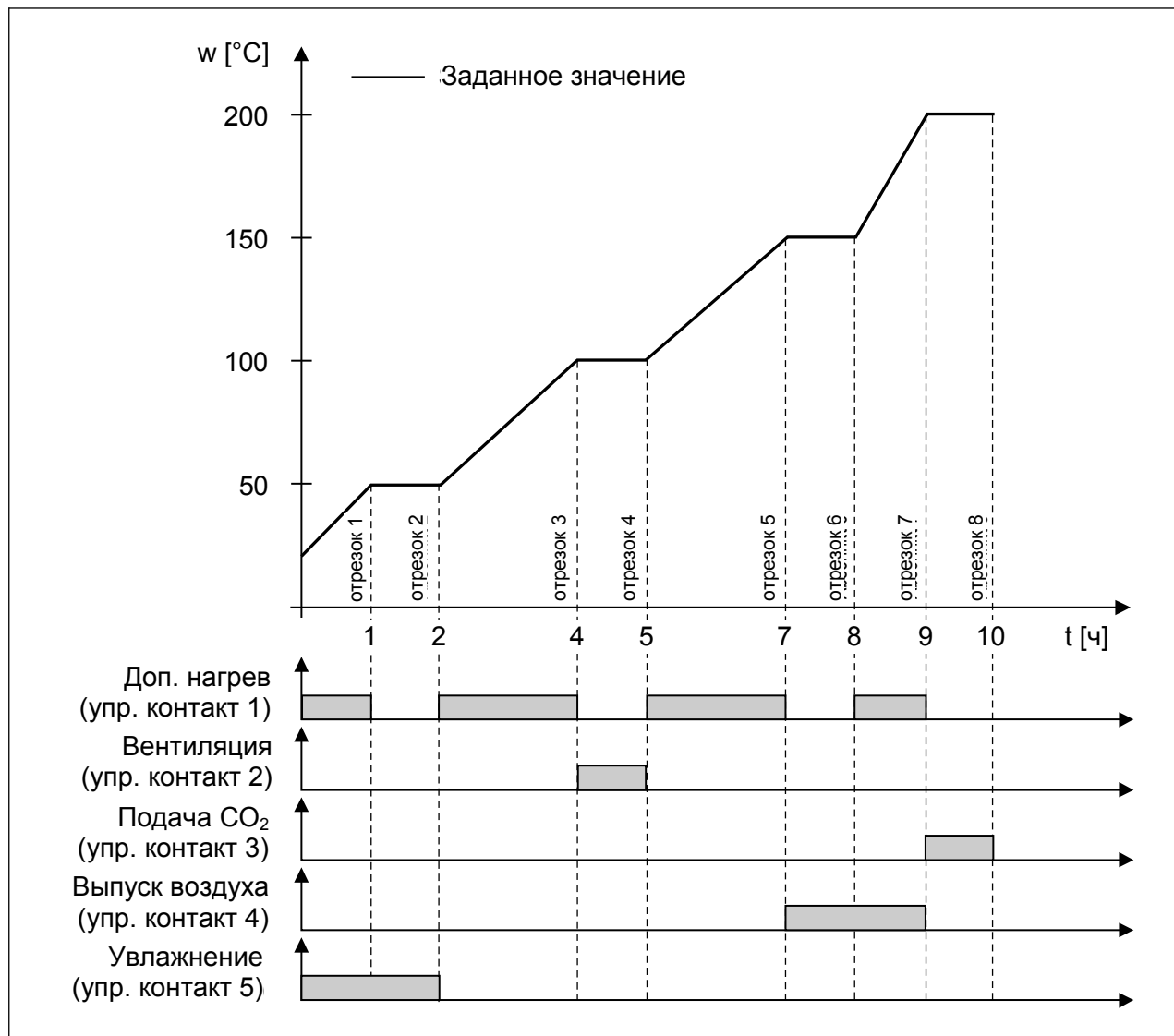


Рисунок 94: Программа программного регулятора

Программа состоит из различных отрезков, которые привязаны к профилю и определяются заданным значением в начале каждого отрезка и его длительностью (пример: отрезок 1 определяется заданным значением 25 °C и длительностью 1 ч). Заданное значение в конце отрезка 1 определяется как заданное значение в начале отрезка 2 (50 °C).

Фирма JUMO выпускает и поставляет программные регуляторы, в которых можно реализовать до 50 программ и до 1000 отрезков.

Часто, помимо профиля заданного значения, нужно управлять заслонками, вентиляторами, клапанами и т.д. Состояние соответствующих выходов для каждого отрезка программы можно задавать при помощи так называемых управляющих контактов.

## 7 Специальные функции регуляторов

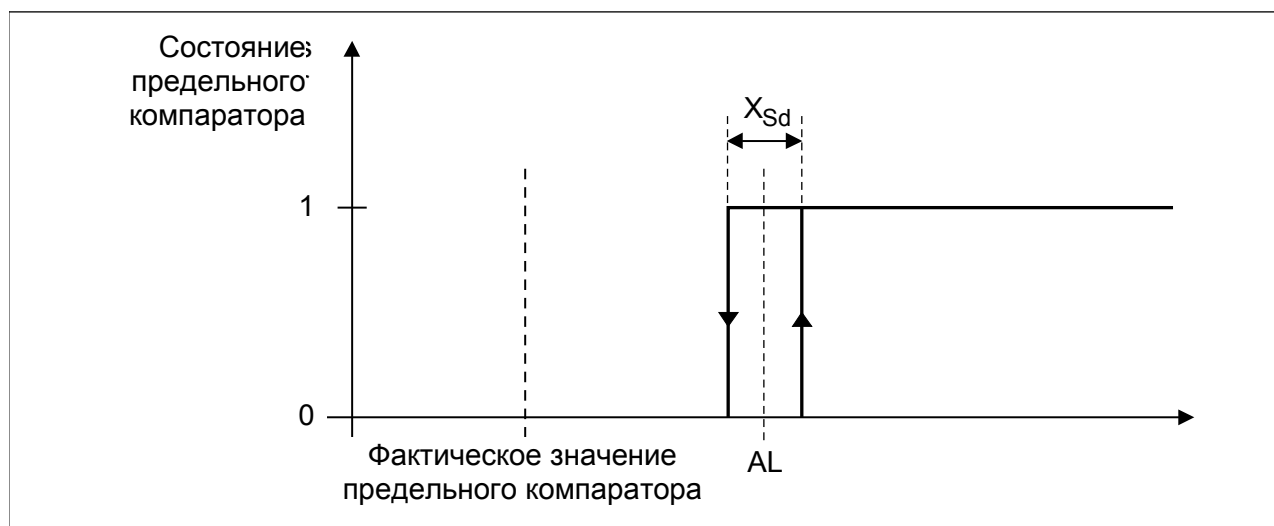
У некоторых регуляторов можно для каждого отрезка определять набор параметров, с которыми должен работать регулятор. Кроме этого, часто можно задавать интервал допуска вокруг заданного значения. Если фактическое значение выходит из интервала допуска, то при соответствующей конфигурации программа приостанавливается. Когда фактическое значение возвращается в диапазон допуска, работа программы возобновляется.

### 7.6 Предельные компараторы

При работе с регуляторами фирмы JUMO часто полезным оказывается использование предельных компараторов. Количество предельных компараторов, в зависимости от оснащения приборов, может быть 1 ... 16.

Предельный компаратор может работать в соответствии с различными характеристиками. Эти характеристики называются функциями предельного компаратора. При этом можно выбирать из восьми различных характеристик, делающих возможным как контроль одного сигнала на предмет отклонений от фиксированного значения, так и сравнение двух сигналов.

В качестве примера рассмотрим характеристику «Функция предельного компаратора 7»:



**Рисунок 95: Функция предельного компаратора 7**

При использовании функции 7 фактическое значение (например, сигнал на аналоговом входе) контролируется на предмет превышения граничного значения AL. Кроме того, можно задавать величину гистерезиса  $X_{Sd}$ . При помощи выхода предельного компаратора можно, например, управлять реле или активировать некоторую двоичную функцию.



## 7 Специальные функции регуляторов

---

### 7.7 Двоичные функции

При помощи двоичных сигналов в регуляторах фирмы JUMO можно активировать различные функции. Двоичными сигналами могут быть положения выключателей на двоичных входах, статус предельных компараторов и т.д.

Типичными двоичными функциями являются:

**Запуск самооптимизации, остановка самооптимизации:**

Двоичное событие может вызывать запуск или остановку самооптимизации.

**Переключение заданного значения:**

В регуляторе хранятся несколько заданных значений, однако в один момент времени активным может быть только одно заданное значение. Переключение может осуществляться, например, через двоичный вход.

**Переключение фактического значения:**

Если в установке фактическое значение считывается через аналоговый вход 1, то при появлении двоичного сигнала начинает использовать аналоговый вход 2.

**Переключение набора параметров:**

В большинстве регуляторов фирмы JUMO определяются два набора параметров (структура, параметры  $X_p$ ,  $T_n$  и  $T_v$  и т.д.). При помощи предельного компаратора можно определять превышение определенного заданного значения. В этом случае происходит переключение на набор параметров 2.

При малых заданных значениях используется набор параметров 1, при больших заданных значениях – набор параметров 2.

**Блокировка клавиатуры:**

Двоичный сигнал может вызывать блокировку клавиатуры.

**Запуск и остановка программы:**

В зависимости от двоичного события программный регулятор запускает или останавливает программу.

### 7.8 Ручной режим

В автоматическом режиме активна собственно функция регулирования (происходит регулировка, чтобы обеспечить равенство фактического значения определенному заданному значению). Помимо этого, регулятор может быть переключен в ручной режим. При переключении в ручной режим, текущий управляющий сигнал перенимается как управляющий сигнал ручного режима. При помощи клавиатуры можно плавно менять управляющий сигнал в диапазоне 0 ... 100 %.

У регуляторов фирмы JUMO можно также конфигурировать фиксированный управляющий сигнал, который должен формироваться при переходе в ручной режим. Если, например, задан управляющий сигнал 0 %, и регулятор переключается в ручной режим, то на выходе выдается 0 %.

## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.9 Ограничение управляющего сигнала

Регуляторы фирмы JUMO позволяют задавать верхнюю (Y1) и нижнюю (Y2) границу управляющего сигнала.

**Верхняя граница управляющего сигнала (Y1)** устанавливается производителем равной 100 %. Это означает, что если регулятор вычисляет управляющий сигнал 100 %, то этот сигнал будет фактически сформирован на выходе регулятора. Если же Y1 установлена равной 60 %, а регулятор в процессе работы вычислил 100 %, то значение на выходе будет ограничено величиной 60 %.

Верхняя граница управляющего сигнала может использоваться, когда пределы управляющего воздействия исполнительного элемента слишком широки для определенного режима работы.

При помощи **нижней границы управляющего сигнала (Y2)** в случае трехточечного регулятора можно ограничить мощность холодильного агрегата определенным максимальным значением (например, при задании  $Y2 = -75\%$  мощность холодильного агрегата будет ограничена максимальной величиной 75 %).

Если требуется, чтобы мощность нагревателя не оказывалась ниже некоторого минимального уровня, то можно задать нижнюю границу управляющего сигнала  $Y2 > 0\%$ : Если задано  $Y2 = 5\%$ , то всегда будет выдаваться управляющий сигнал не менее 5 % (даже если регулятор вычисляет управляющее воздействие  $< 5\%$ ).

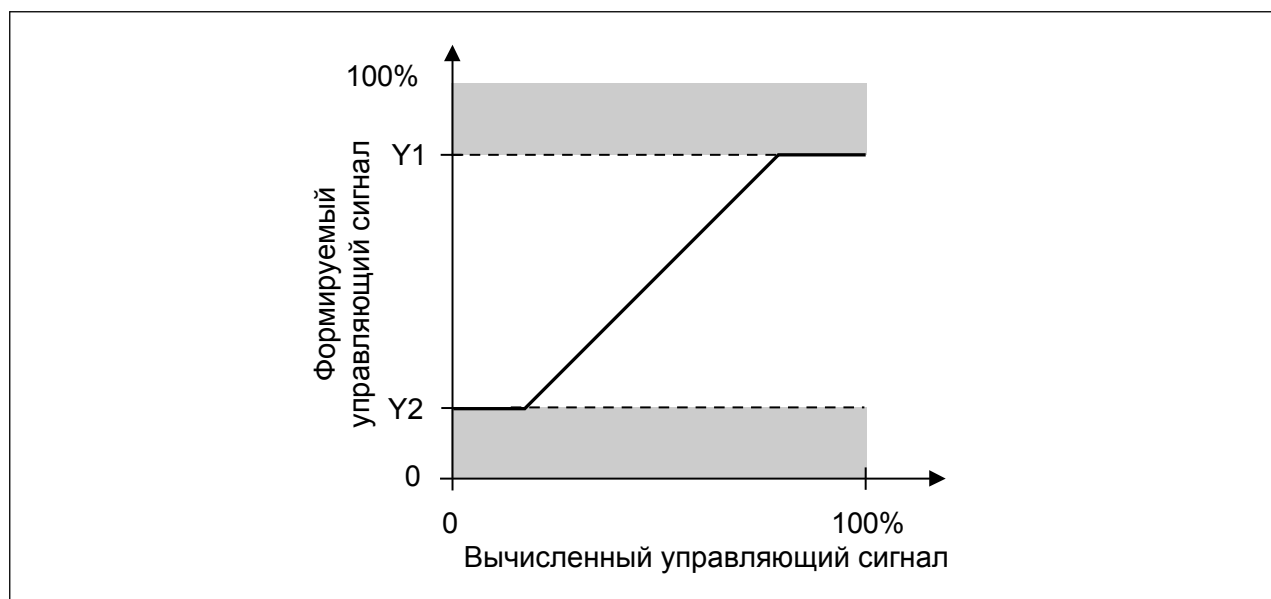


Рисунок 96: Ограничение управляющего сигнала

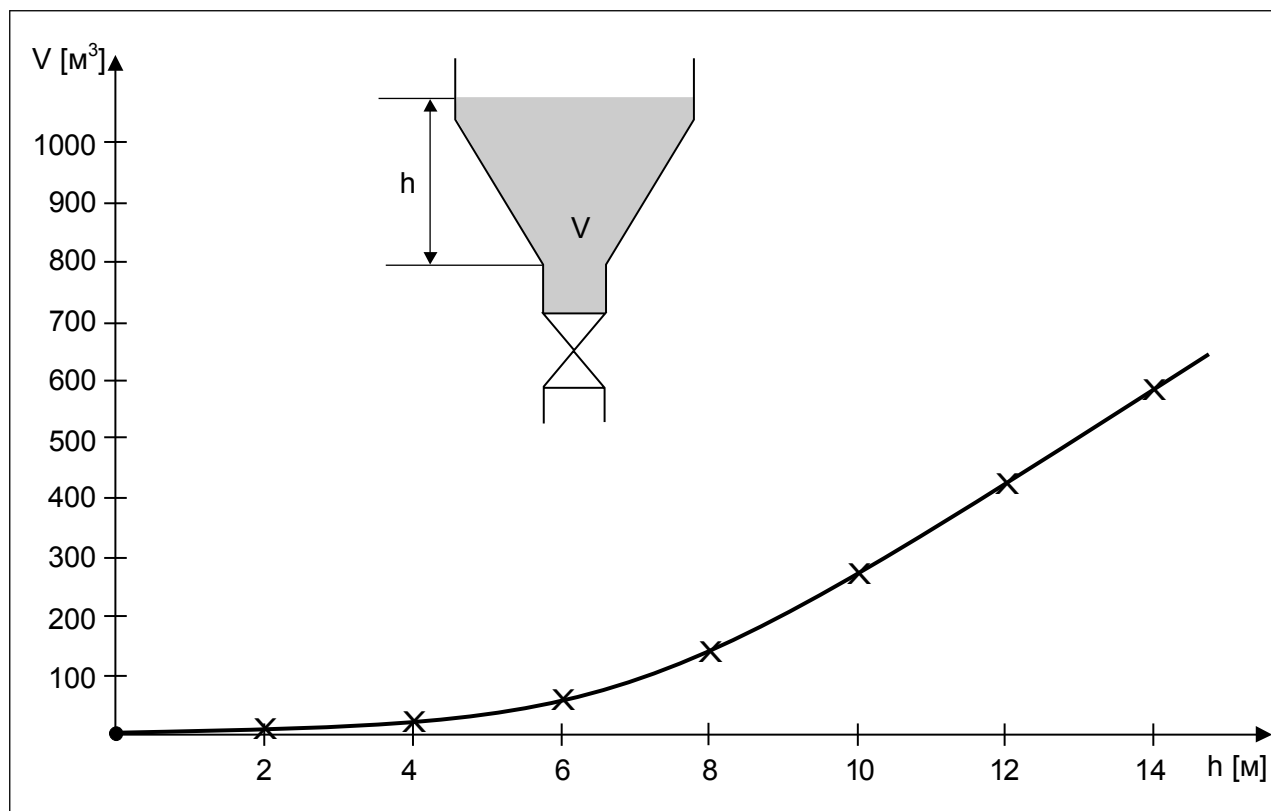
## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.10 Пользовательская линейризация

Если к регулятору подключен, например, термометр сопротивления Pt 100, то при помощи измерительного тока будет измеряться сопротивление. Для пользователя, однако, существенным является то, какая температура соответствует измеренному сопротивлению. Характеристика Pt 100 (величины сопротивлений с соответствующими температурами) хранится в приборе. Поэтому пользователь может просто выбрать линейризацию Pt 100, и прибор будет автоматически показывать температуру, измеряемую Pt 100. В регуляторах чаще всего хранится множество различных линейризаций (другие типы зависящих от температуры сопротивлений, термоэлементы и т.д.).

Если же используется датчик, для которого в приборе не имеется линейризации, пользователь можно задать свою линейризацию. Характеристика датчика должна быть известна, пользователь задает опорные точки для линейризации (пары значений в рабочей области, например, в случае сопротивления, зависящего от температуры, состоящие из величины сопротивления и соответствующей температуры). По этим опорным точкам регулятор выполняет линейризацию.

Еще одним примером пользовательской линейризации является измерение объема жидкости в резервуаре, который обладает конической формой в нижней части и цилиндрической – в верхней (Рисунок 97).



**Рисунок 97:** Определение объема жидкости по уровню при помощи пользовательской линейризации

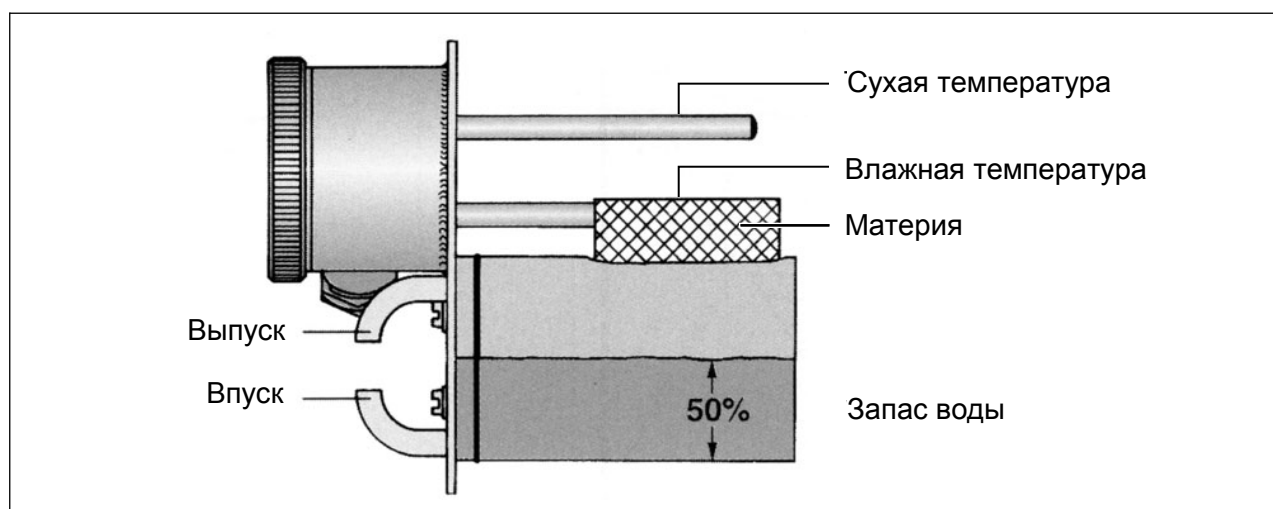
Объем жидкости в резервуаре такого типа зависит от уровня согласно графику, приведенному на Рисунке 97: Нанесенные точки задаются регулятору в качестве опорных точек (вместо уровня следует указывать фактический сигнал датчика в мА). Регулятор соединяет опорные точки между собой и в каждый момент времени по измеренному уровню определяет объем.

## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.11 Измерение влажности

Уже в течение многих десятилетий фирма JUMO поставляет датчики для измерений влажности. Их спектр включает датчики влажности, работающие по емкостному и гигрометрическому принципу. Соответствующие чувствительные элементы чаще выдают стандартизованные или Pt-100-сигналы.

Многие регуляторы фирмы JUMO поставляются, например, для мясной промышленности. В этой отрасли, используется также психрометрическая методика измерений.



**Рисунок 98: Электрический психрометр**

Электрический психрометр (Рисунок 98), в силу своей стабильной конструкции, отличается от других датчиков тем, что позволяет выполнять измерения в загрязненных, содержащих растворители и агрессивных средах.

Определение относительной влажности выполняется при помощи измерения двух температур:

- Сухая температура измеряется при помощи термометра сопротивления, она соответствует температуре окружающей среды.
- Второй термометр сопротивления в психрометре обвязан влажной материей. Возникающая при этом влажная температура тем меньше, чем больше воды испаряется. Более высокое испарение возникает при меньшей относительной влажности окружающей среды.

Существует однозначная связь между относительной влажностью и сухой / влажной температурой.

По двум температурным сигналам некоторые регуляторы фирмы JUMO могут напрямую определять относительную влажность.

## 7 Специальные функции регуляторов

### 7.12 Интерфейсы

Фирма JUMO поставляет для своих регуляторов различные виды интерфейсов:

#### Интерфейс Setup

Конфигурирование устройств осуществляется в большинстве случаев при помощи входящей в комплект поставки программы конфигурации. В этом случае пользователь применяет так называемый интерфейс Setup.

Соединение между ПК и прибором выполняется при помощи специального кабеля Setup.



Рисунок 99: Регулятор процессов DICON 500 с кабелем Setup

#### Интерфейс RS422/RS485 с протоколом MOD-Bus

Протокол MOD-Bus широко распространен в системах визуализации. Подключение осуществляется через указанные последовательные интерфейсы. Фирма JUMO поставляет программное обеспечение для визуализации (SVS-2000N), при помощи которого, даже не обладая навыками программирования, можно выводить на экран ПК данные приборов фирмы JUMO и записывать соответствующие характеристики процессов.

## 7 Специальные функции регуляторов

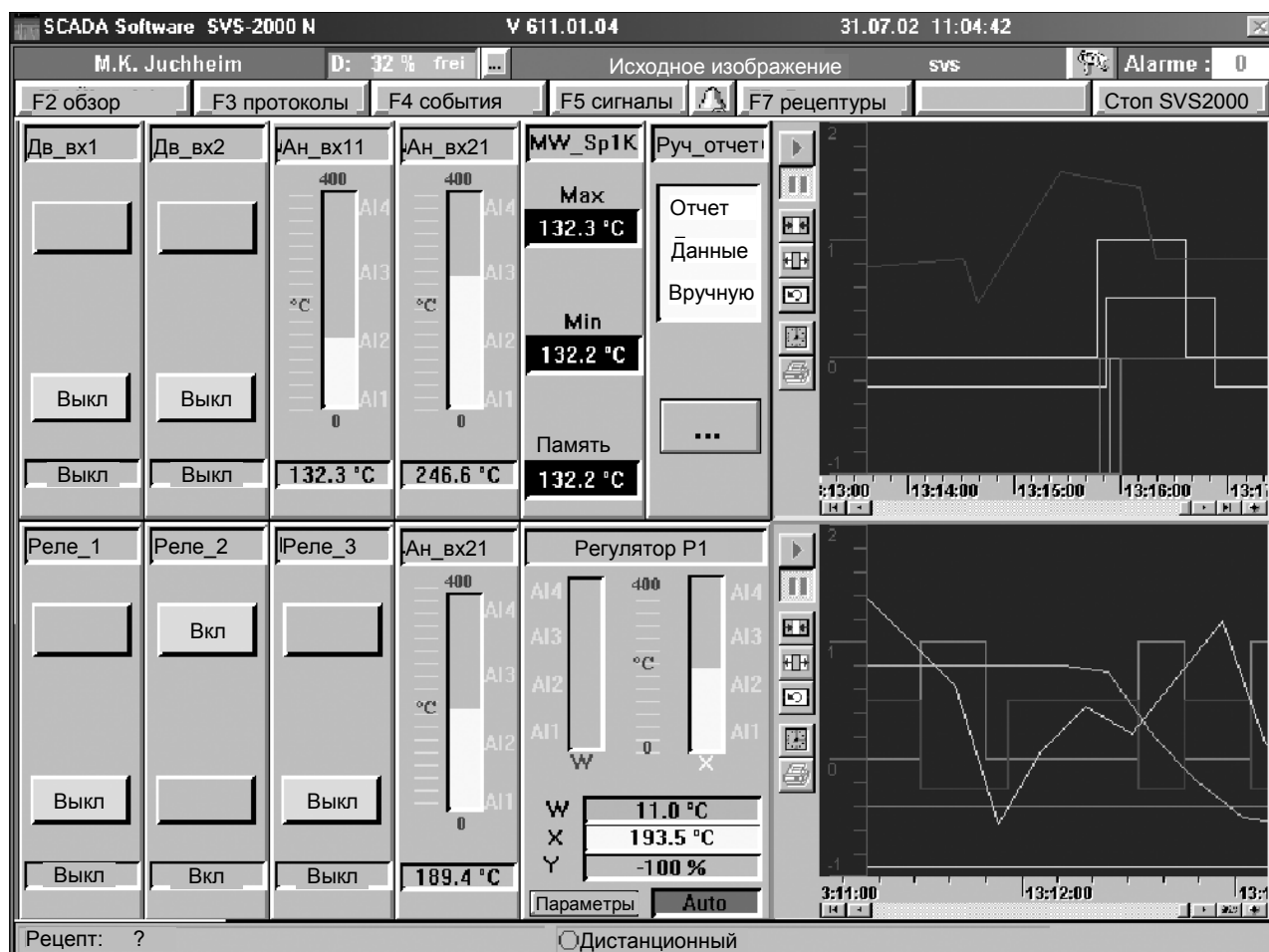


Рисунок 100: JUMO SVS-2000N

### PROFIBUS-DP

Часто оказывается необходимым подключать регуляторы к программируемым контроллерам. Во многих приложениях такое подключение осуществляется через PROFIBUS-DP. Множество регуляторов фирмы JUMO обладает этим интерфейсом.

### Примечание:

Основные сведения о шинных системах и указания по подключению к ним устройств фирмы JUMO мы приводим в брошюре «Двоичные интерфейсы и шинные системы – основные сведения и указания по подключению устройств»; см. также на сайте [www.jumo.net](http://www.jumo.net) в разделе „Support“ («Поддержка»).

## Приложение: Используемые сокращения

---

### Параметры регулятора

Здесь приводятся все параметры регуляторов фирмы JUMO (упорядоченных по функциям), относящиеся к собственно регулировочной функции. Их можно найти в регуляторах фирмы JUMO на уровне параметров или в программе Setup в меню „Regelparameter“ («Регулировочные параметры»).

### ПИД-структура

- $X_P$  Зона пропорционального регулирования пропорциональной составляющей, по-английски: P<sub>b</sub>
- $T_n$  Время отставания, по-английски: t<sub>t</sub>
- $T_v$  Постоянная дифференцирования, по-английски: dt

### Общие параметры

- $Y_1$  Верхняя граница управляющего сигнала регулятора  
(не применяется для трехточечных ступенчатых регуляторов)
- $Y_2$  Нижняя граница управляющего сигнала регулятора  
(не применяется для трехточечных ступенчатых регуляторов)
- $Y_0$  Коррекция рабочей точки П-регулятора  
(имеет смысл только для П-регуляторов)

### Параметры для двухточечных, трехточечных, трехточечных и позиционных регуляторов

- $C_{y1}$  Период переключения первого двоичного выхода  
(используется для двух- и трехточечных регуляторов,  $X_{P1} > 0$ )
- $C_{y2}$  Период переключения второго двоичного выхода  
(используется для трехточечных регуляторов,  $X_{P2} > 0$ )
- $T_{k1}$  Минимальное время включения первого двоичного выхода  
(используется для двух- и трехточечных регуляторов,  $X_{P1} > 0$ )
- $T_{k2}$  Минимальное время включения второго двоичного выхода  
(используется для трехточечных регуляторов,  $X_{P2} > 0$ )
- $X_{Sd1}$  Разность между уровнями включения и выключения первого двоичного выхода  
(используется для двух- и трехточечных регуляторов,  $X_{P1} = 0$ )
- $X_{Sd2}$  Разность между уровнями включения и выключения второго двоичного выхода  
(используется для трехточечных регуляторов,  $X_{P2} = 0$ )
- $X_{Sh}$  Контактное расстояние, по-английски: db  
Контактное расстояние симметрично окружает заданное значение. У трехточечных регуляторов пропорциональные составляющие раздвигаются на это расстояние, у трехточечных ступенчатых регуляторов в этом диапазоне не происходит управления исполнительным элементом с серводвигателем.
- $TT$  Продолжительность хода исполнительного элемента с серводвигателем, задается для трехточечных ступенчатых и позиционных регуляторов

## Приложение: Используемые сокращения

---

### Дальнейшие символические обозначения

$e$	Рассогласование (заданное значение – фактическое значение)
$K_{IS}$	Передаточный коэффициент объекта регулирования без выравнивания
$K_P$	Зона пропорционального регулирования
$K_S$	Передаточный коэффициент или усиление объекта регулирования с выравниванием
$T_1, T_2$	1-я и 2-я временная постоянная объекта 2-го порядка
$T_a$	Время переходного процесса, по истечении этого времени фактическое значение в контуре регулирования остается в заданном диапазоне вокруг заданного значения.
$T_{an}$	Время регулирования, после которого фактическое значение в контуре регулирования в первый раз достигает заданного значения
$T_g$	Время выравнивания объекта регулирования
$T_I$	Постоянная времени интегрирования И-регулятора
$T_K$	Длительность колебаний фактического значения при $X_{PK}$ (метод оптимизации по Циглеру / Николсу)
$T_S$	Постоянная времени объекта 1-го порядка
$T_1$	Время запаздывания объекта регулирования
$T_u$	Время задержки объекта регулирования
$V_{max}$	Максимальная скорость нарастания (метод оптимизации по скорости нарастания)
$w$	Заданное значение, задающая величина
$x$	Фактическое значение, регулируемая величина
$X_{max}$	Пик перерегулирования
$X_{PK}$	Критическое значение $X_P$ , при котором возникают незатухающие колебания регулируемой величины (метод оптимизации по Циглеру / Николсу)
$y$	Управляющий сигнал, управляющее воздействие
$U_H$	Диапазон управляющего сигнала регулятора, чаще всего 100 %
$U_R$	Управляющий сигнал регулятора
$z$	Возмущающее воздействие



## **Р**

РТ<sub>t</sub>-объекты 26

РТ<sub>n</sub>-объекты 28

## **S**

Startup 104

## **A**

Аддитивное наложение возмущения 89

## **Б**

Базовая нагрузка 86

Блок схема ПИД-регулятора 54

## **В**

Ведущий регулятор 94, 96

Величина скачка 101

Верхняя граница управляющего сигнала Y1 112

Возмущающие воздействия 22

Время выравнивания T<sub>g</sub> 32–33, 59

Время задержки T<sub>u</sub> 32, 59

Время запаздывания T<sub>1</sub> 26

Время отставания T<sub>n</sub> 42

Время переходного процесса T<sub>a</sub> 11

Время регулирования T<sub>ан</sub> 11

Вспомогательный регулятор 88, 94

## **Г**

Грубое / точное регулирование 93

Грубый регулятор 93

## **Д**

Давление 66

Датчики и измерительные преобразователи 11

Двоичные функции 111

Демпфирование 49

Диагностика 104

Дискретный двухточечный регулятор 69

Дискретный регулятор 69

Дискретный трехточечный регулятор 77

Дифференциальная составляющая 46, 51

Дифференциальная составляющая, практическая 51

дозировочные насосы 16

## **З**

Заданное значение пропорции 97

Замкнутый контур регулирования 9

Зона пропорционального регулирования X<sub>p</sub> 36

## **И**

Измерение влажности 114

Измерительно-преобразовательная головка 12

Измерительный преобразователь давления 13

Индуктивный измерительный преобразователь проводимости 14

Интерфейсы 115

И-регулятор 40

Исполнительные элементы с серводвигателем 16, 80

Исполнительный элемент 9

## **К**

Касательная в точке перегиба 33

Каскадное регулирование 94

Квази-непрерывный двухточечный регулятор 72

Квази-непрерывный регулятор 69

Квази-непрерывный трехточечный регулятор 78

Контактное расстояние X<sub>Sh</sub> 77, 82, 84

Контроль настройки регулятора 64

Концевой выключатель 83

Коррекция рабочей точки Y0 39

Критический период T<sub>K</sub> 59

Критическое X<sub>p</sub>, X<sub>pK</sub> 59

## **Л**

Линеаризация, пользовательская 113

## **М**

Магнитные клапаны 16

Максимальная скорость нарастания V<sub>max</sub> 61

Мера управляемости 34

Метод незатухающих колебаний 99

Метод переходной характеристики 101

Минимальная длительность включения T<sub>K</sub> 75, 80

Мультипликативное наложение возмущения

# Указатель

---

91

## Н

Наборы параметров 57  
Наложение возмущения  
- аддитивное 89  
- мультипликативное 91  
Настройка регулятора  
- контроль 64  
Непрерывные регуляторы 35  
Неустойчивый контур регулирования 57  
Нижняя граница управляющего сигнала  $Y_2$  112

## О

Обратная связь по управляющему воздействию 84  
Обратное рабочее направление 39  
Объект регулирования 9,21  
- с выравниванием и без выравнивания 22  
- с задержкой 28  
Объекты без выравнивания 23  
Объекты высшего порядка 28  
Объекты с двумя задержками 32  
Объекты с задержкой  
-  $PT_n$ -объекты 28  
Объекты с запаздыванием  
-  $PT_t$ -объекты 26  
Объекты с одной задержкой 28  
Ограничение управляющего сигнала  $Y_1, Y_2$  112  
Определение времени задержки и выравнивания 33  
Основной регулятор 94

## П

ПД-регулятор 46  
Передаточный коэффициент 35  
Передаточный коэффициент  $K_{IS}$  23  
Передаточный коэффициент  $K_S$  25  
Передаточный коэффициент и зона пропорционального регулирования 38  
Передаточный коэффициент объекта 59  
Передаточный коэффициент объекта регулирования 23, 27  
Переключение заданного значения 111  
Переключение набора параметров 111  
Переключение фактического значения 111  
Переходная характеристика 11  
- устойчивая и неустойчивая 57  
Период дискретизации 14

Период переключения  $C_y$  72, 78  
Пик перерегулирования  $X_{max}$  11  
ПИ-регулятор 43, 51  
Поведение при возмущающем воздействии 56  
Поведение при задающем воздействии 56  
Поддержание возмущения на постоянном уровне 88  
Позиционный регулятор 84  
Пользовательская линеаризация 113  
Постоянная времени интегрирования  $T_I$  41  
Постоянная дифференцирования  $T_V$  48  
Практическая дифференциальная составляющая 51  
П-регулятор 35  
Предельные компараторы 110  
Программный регулятор 109  
Продолжительность хода исполнительного элемента 81  
Продолжительность хода исполнительного элемента ТТ 81, 83  
Прямая переключения 100  
прямое рабочее направление 39

## Р

Разность уровней включения и выключения  $X_{Sd}$  69  
Расход жидкости 66  
Регулирование транспортировки сыпучего материала 27  
Регулятор  
- дискретный 68  
Регулятор пропорции 97  
Режим разделения диапазона 87  
Ручной режим 83, 111

## С

Самооптимизация 99  
Силовой контактор 15  
Силовой преобразователь на биполярных транзисторах с изолированным затвором 17  
Скорость вращения 66  
Скорость изменения 51  
Скорость нарастания 62  
Следящий регулятор 94  
Срок службы реле 74  
Статическая характеристика объекта регулирования 22  
Статические объекты регулирования 25  
Структура 2 76

## **Т**

- Телесервис *104*
- Температура *66*
- Термометр сопротивления *12*
- Термостат *68*
- Типы выходов регуляторов *14*
- Типы регуляторов *19*
- Тиристорный силовой переключатель *15*
- Точный регулятор *93*
- Транспортировка *67*
- Треугольник нарастания сигнала *62*
- Трехточечный регулятор *76*
- Трехточечный ступенчатый регулятор *80*

## **У**

- Управляющие контакты *109*
- Управляющий сигнал  $u_R$  *74*
- Управляющий сигнал покоя *101*
- Уровень *66*
- Уровень рН *66*
- Установившаяся погрешность *37*
- Устойчивое и неустойчивое поведение при регулировании *57*

## **Ф**

- Функция рампы *108*
- Функция регистрации *106*

## **Э**

- Эмпирический метод *62*



[www.jumo.net](http://www.jumo.net)

