

# **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

# Основные понятия и определения

Под автоматизацией понимается применение технических средств и информационных технологий, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в решении различных задач контроля и управления.

Автоматическим регулированием называют поддержание на заданном уровне или изменение по определенному принципу какого-либо параметра технологического процесса, выполняемое без непосредственного участия человека с помощью специальных технических средств.

Комплексы технических средств, позволяющие реализовать рассматриваемые задачи, называются системами автоматизации. Их можно подразделить на системы дистанционного управления исполнительными устройствами, системы обеспечения безопасности, системы автоматического контроля и регулирования отдельных

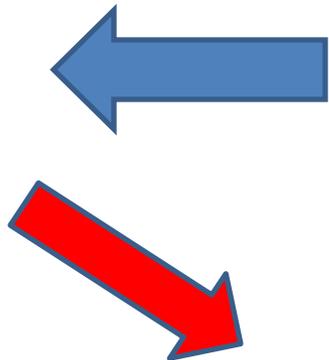
# Основные понятия и определения

Машины, аппараты или агрегаты, в которых выполняют регулирование, называют **объектами регулирования**, а технологические параметры, подлежащие регулированию – регулируемыми.

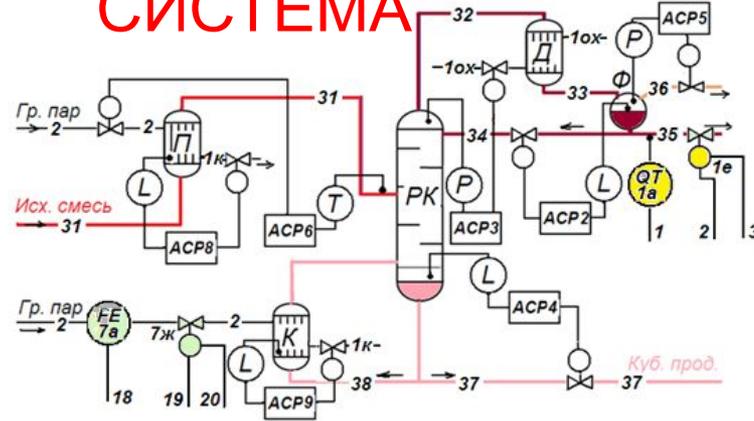
Технические средства (прибор или совокупность приборов), при помощи которых осуществляют автоматическое регулирование, объединяют общим названием «**регулятор**».

Объект регулирования и регулятор образуют **автоматическую систему регулирования (АСР)**.

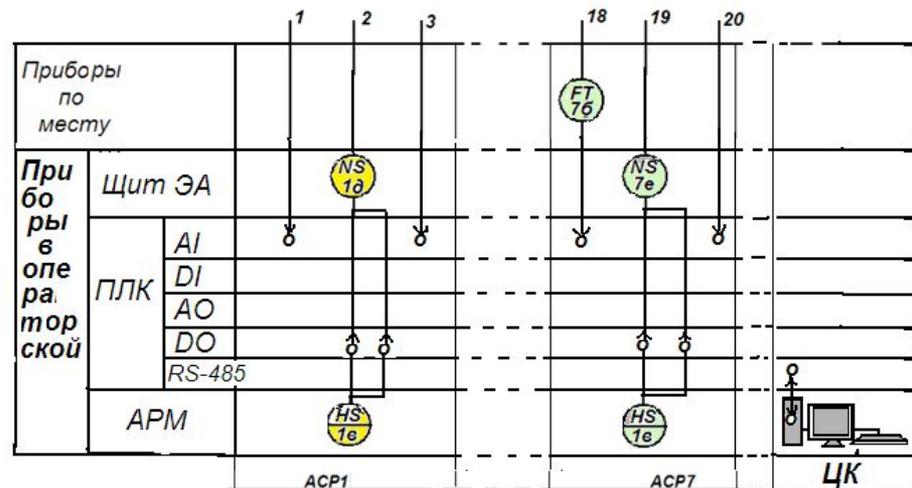
# Основные понятия и определения



## ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

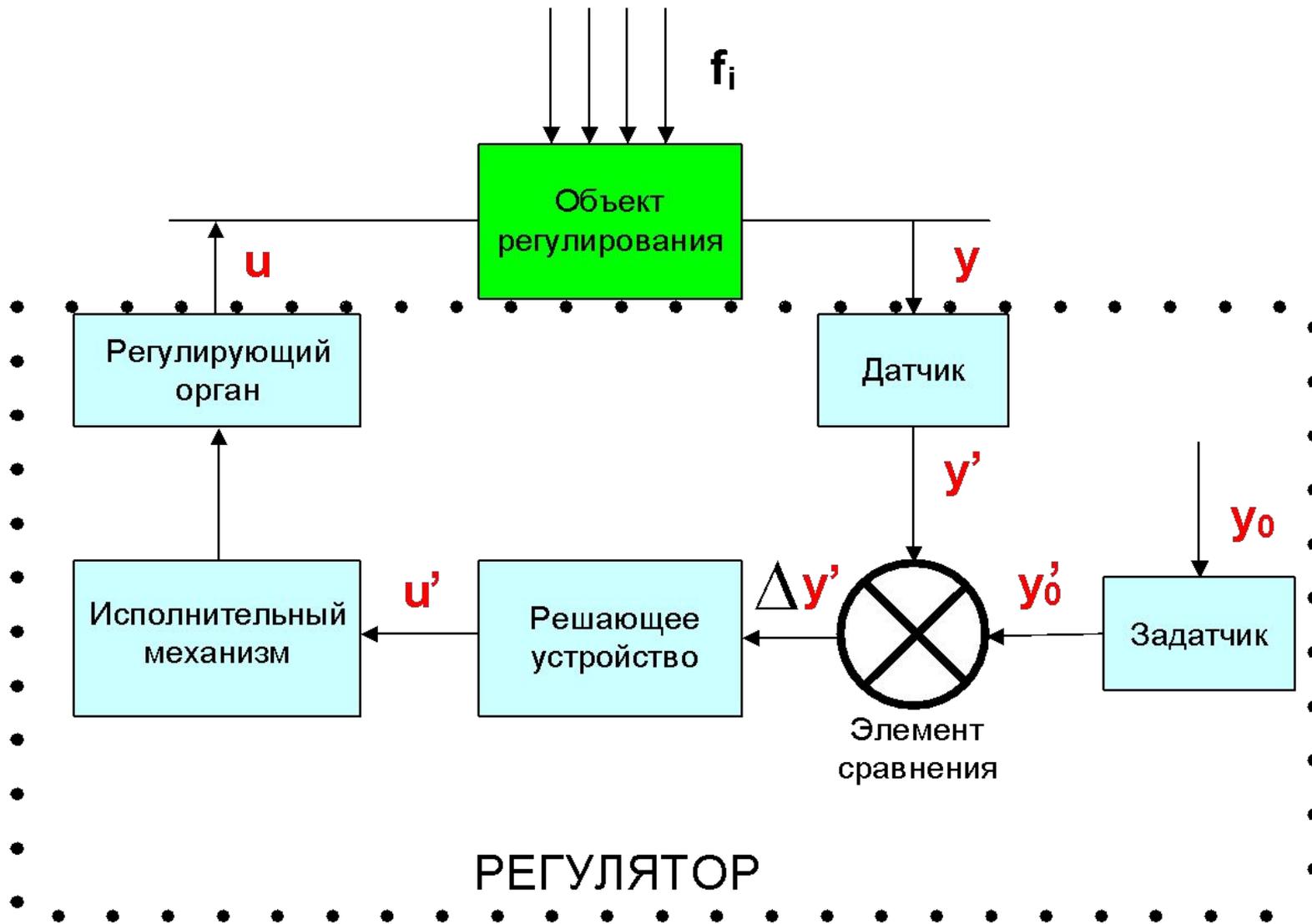


## СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ



# Структура системы управления

Структурная схема АСР, изображенная на рисунке, представляет регулятор расчлененным на функциональные элементы.



# Структура системы управления

Датчик воспринимает текущее значение регулируемого параметра  $y$  и преобразует его в сигнал измерительной информации  $y'$ , поступающий на элемент сравнения.

Здесь производится сравнение  $y'$  с сигналом  $y'_0$ , вырабатываемым задатчиком и пропорциональным заданному значению регулируемого параметра  $y_0$ .

Разностный сигнал, пропорциональный отклонению регулируемого параметра от заданного значения, поступает на вход решающего устройства, которое формирует в определенной зависимости от  $\Delta y'$  сигнал управляющего воздействия  $u'$ .

# Структура системы управления

Под действием этого сигнала исполнительный механизм перемещает регулирующий орган. Кроме регулирующего воздействия, на объект регулирования влияют также и другие факторы, называемые возмущающими воздействиями  $f_i$ , из-за которых регулируемый параметр отклоняется от заданного значения.

# Функции систем управления

Системы управления могут быть **предназначены** для выполнения **функций**:

- **автоматического контроля;**
- **автоматической сигнализации;**
- **автоматической защиты;**
- **автоматического регулирования;**
- **логического управления;**
- **оптимизация управления.**

- $y(\tau)$  - текущее значение регулируемого параметра;
- $y_0$  - заданное значение регулируемого параметра;
- $\Delta y(\tau)$  – рассогласование или ошибка регулирования – это отклонение регулируемого параметра от заданного значения:  $\Delta y(\tau) = y(\tau) - y_0$ ;
- $u(\tau)$  - регулирующее воздействие; осуществляется изменением подводимого к ОР потока энергии или вещества; направлено на восстановление заданного значения регулируемого параметра;
- $\bar{f}(\tau)$  – вектор возмущающих воздействий; вызывают отклонение регулируемого параметра от заданного значения;

- *Цель автоматического регулирования – сведение к минимуму отклонения регулируемого параметра от заданного значения*

$$\Delta y(\tau) \rightarrow \min,$$

*где  $\Delta y(\tau)$  – рассогласование или ошибка регулирования*

- *Контур АСР* – траектория, определяющая последовательность обработки информации в АСР; может быть замкнутым и разомкнутым.

В зависимости от **задачи регулирования** АСР подразделяют на:

- стабилизирующие

$$y_0 = \text{const} ;$$

- программного регулирования

$$y_0(\tau) = f(\tau) ;$$

- следящие

$$y_0(\tau) = f[x(\tau)] .$$

Здесь  $x(\tau)$  – ведущий параметр;

$y(\tau)$  – ведомый параметр;

$y(\tau)$  - текущее значение регулируемого параметра;

$y_0$  – заданное значение регулируемого

# Принципы автоматического регулирования

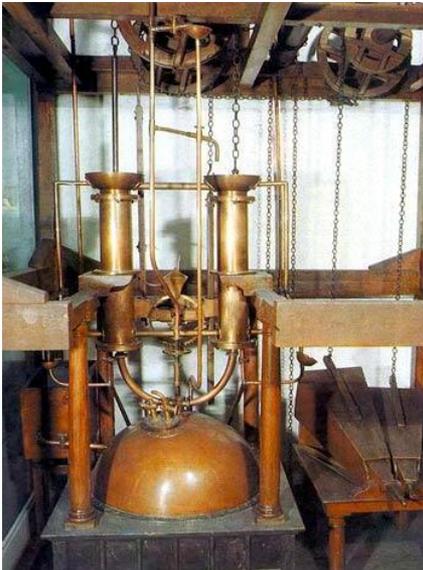
В основе работы системы автоматического регулирования могут быть заложены следующие принципы:

- регулирование по отклонению;
- регулирование по возмущению;
- комбинированный (по отклонению и по возмущению).

# Принципы автоматического регулирования

Регулирование по отклонению реализует принцип обратной связи (Ползунова-Уатта)

Ползуновым И.И. в 1765 г. создан первый промышленный регулятор – автоматический поплавковый регулятор питания котла паровой машины.



Макет паровой машины  
Ползунова  
привода в движение  
мехов плавильных печей

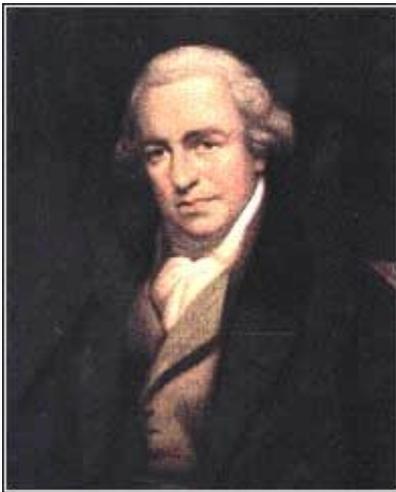


**И.И. Ползунов**

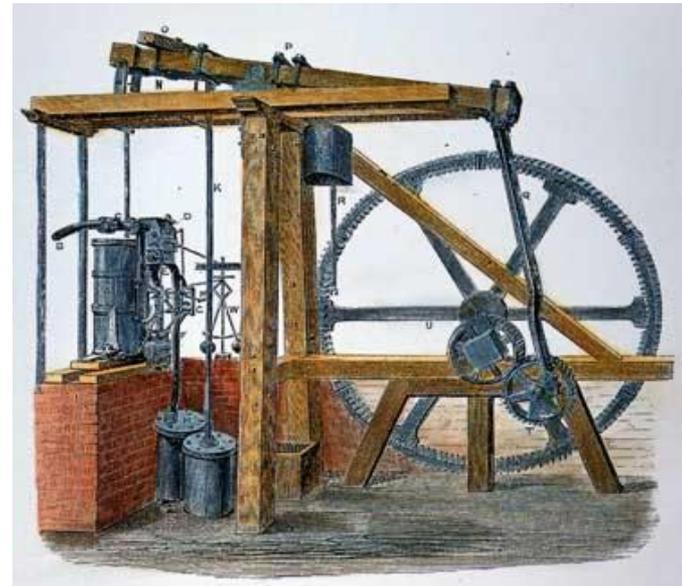
14 марта 1728  
(Екатеринбург)  
- 27 мая 1766  
(Барнаул)

# Принципы автоматического регулирования

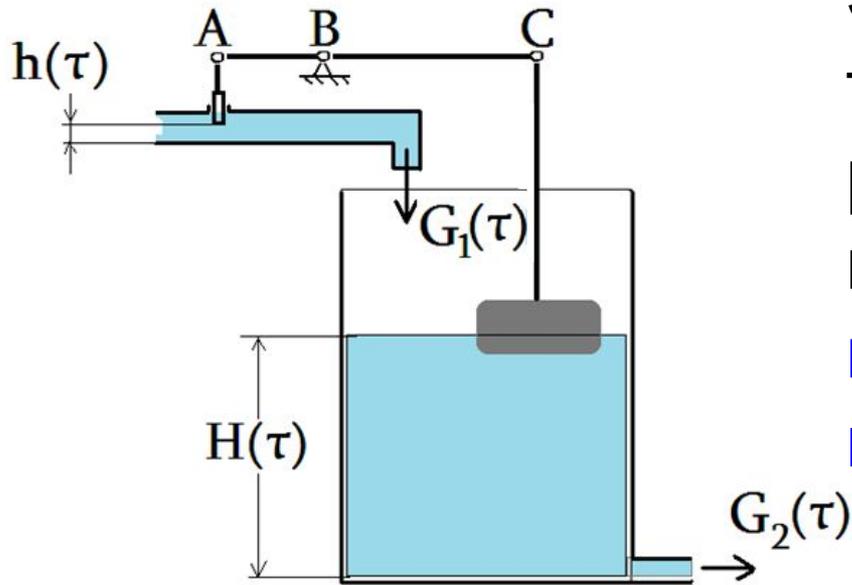
Английский механик Д. Уатт в 1784 г. получил патент на центробежный регулятор скорости паровой машины.



(James Watt, 1736-1819),



# Принципы автоматического регулирования



Это был первый в истории техники автоматический регулятор промышленного назначения, реализующий **принцип регулирования по отклонению.**

## Регулирование по отклонению

Регулятор непрерывно контролирует текущее значение регулируемого параметра  $y(t)$ , оценивает рассогласование  $\Delta y(t)$  и по его величине рассчитывает регулирующее воздействие  $u(t)$ .

Контур АСР замкнут; в нем имеются главная обратная связь и прямая связь.

# Регулирование по возмущению



**Жан-Виктор Понселе**

1 июля 1788-22 декабря  
1867

Франция

В 1830 г. Понселе предложил построить регулятор, действующий **по возмущению**.

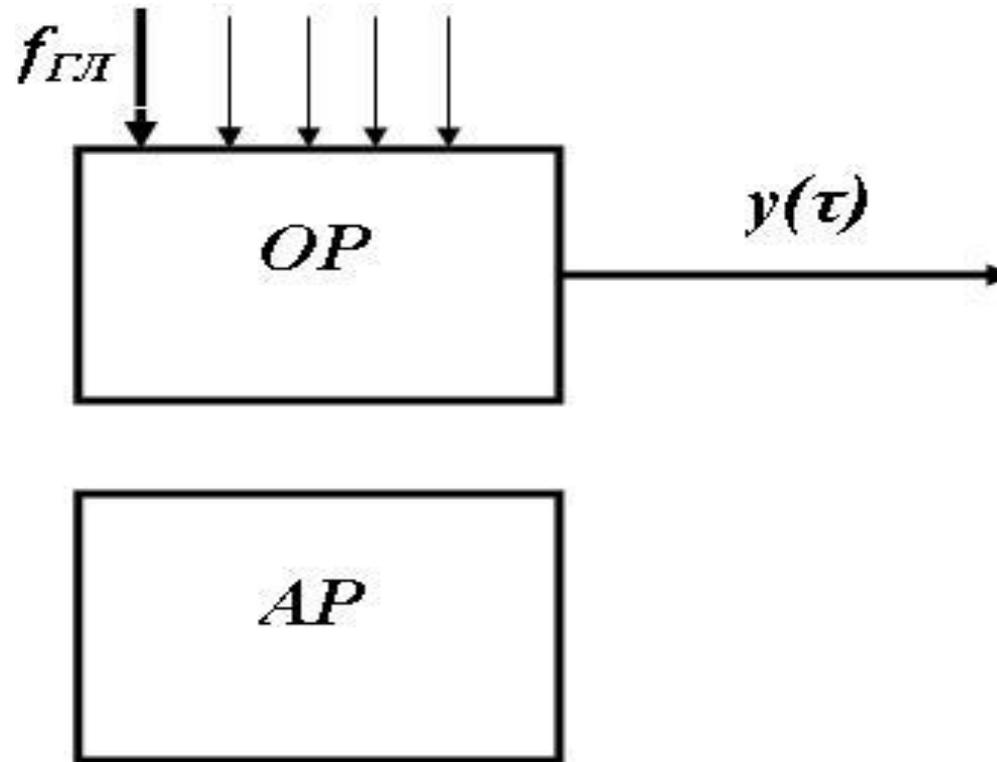
Принцип Понселе (**принцип компенсации возмущающего воздействия**) – второй фундаментальный принцип управления.

# Регулирование по возмущению

## Условие применения:

Применяется в тех случаях, когда из всех действующих на объект возмущений можно выделить **одно, главное**, по сравнению с которым влияние на регулируемый параметр всех остальных возмущений пренебрежимо мало.

# Регулирование по возмущению



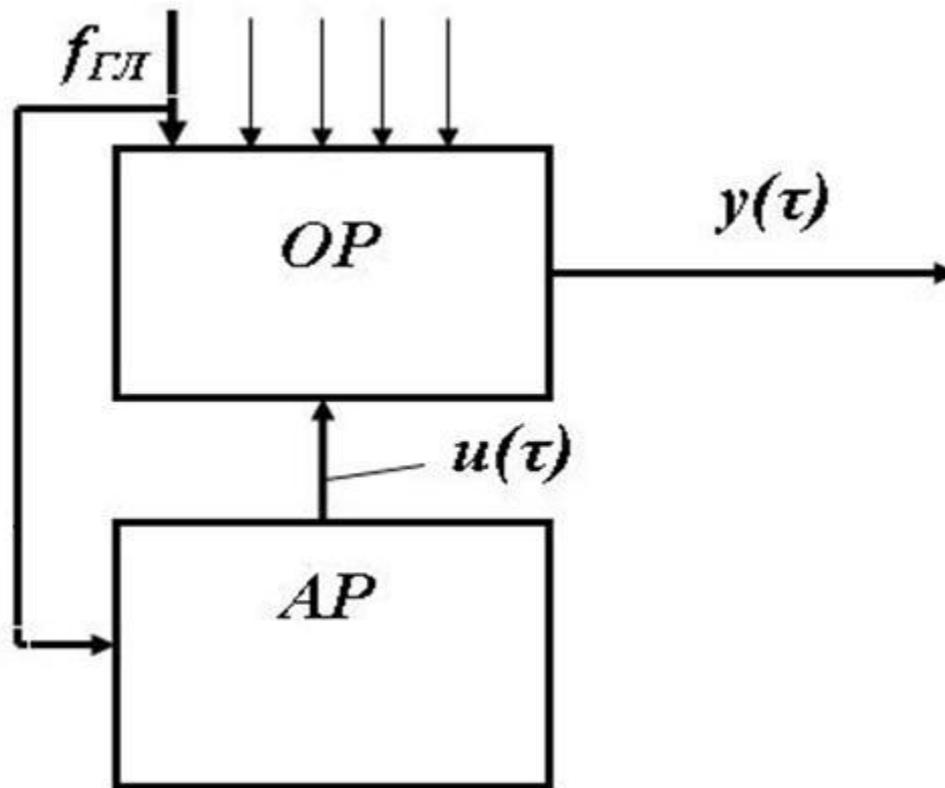
Контур АСР «по возмущению»: **ОР** – объект регулирования, **АР** – автоматический регулятор,  $f_{гл}$  – главное возмущающее воздействие,  $y(\tau)$  – текущее значение регулируемого параметра

# Регулирование по возмущению

Принцип регулирования **по возмущению** заключается в том, что автоматический регулятор контролирует не регулируемый параметр, а **главное возмущающее воздействие**, и при его изменениях вырабатывает регулирующее воздействие.

Контур регулирования при этом является **разомкнутым**, он **не содержит главной обратной связи**.

# Регулирование по возмущению



Контур АСР «по возмущению»:  $OP$  – объект регулирования,  $AP$  – автоматический регулятор,  $f_{ГЛ}$  – главное возмущающее воздействие,  $y(\tau)$  – текущее значение регулируемого параметра,  $u(\tau)$  – управляющее воздействие

## Достоинства и недостатки принципов регулирования

**Преимущество** принципа **«по возмущению»** в том, что регулятор начинает действовать **на более ранней стадии**, когда появилась только лишь **причина рассогласования**, а отклонение регулируемого параметра ещё не началось.

За счет такого **упреждающего** воздействия отклонение регулируемого параметра может вообще не проявиться, или проявится гораздо меньше, чем при регулировании по отклонению.

# Достоинства и недостатки принципов регулирования

**Недостаток** принципа «по возмущению» – если на объект подействует **другое возмущение** (не главное), то регулятор на это **реагировать не будет**.

## ИТОГ:

1. **Принцип «по отклонению»** является более **универсальным** (рассогласование будет ликвидировано независимо от вызвавшей его причины).
2. **Принцип «по возмущению»** дает положительные результаты регулирования, если он **правильно применен**.

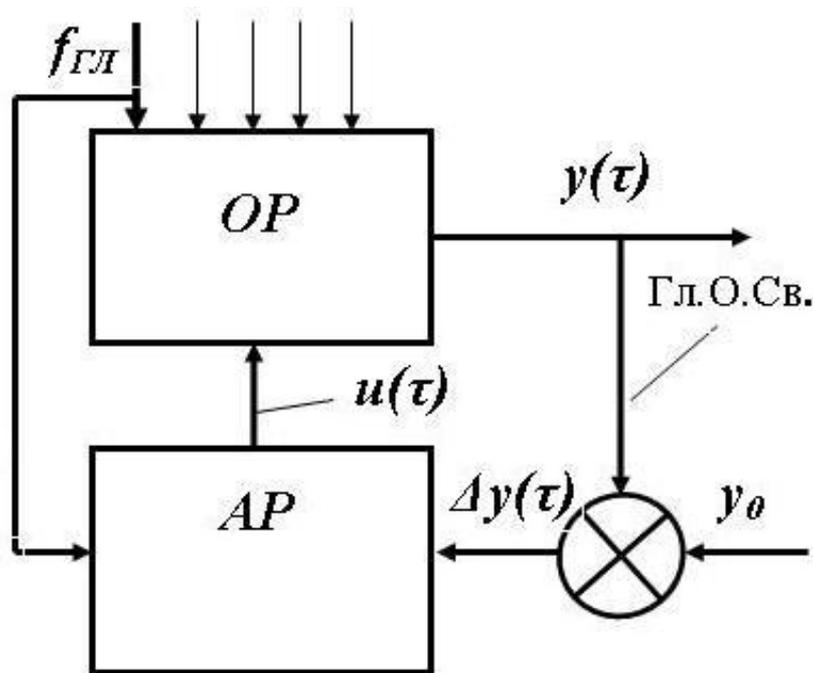
## **Комбинированный принцип регулирования**

Третий принцип – **комбинированный** – объединяет первые два, при этом в качестве основной информации регулятор получает результаты измерения регулируемого параметра, а в качестве корректирующей информации – данные о главном возмущающем воздействии.

**Объединяются достоинства** двух базовых методов и получаются **более высокие показатели качества регулирования.**

## Структурная схема комбинированной АСР

Схема такой АСР содержит два контура: **замкнутый** (по отклонению) и **разомкнутый** (по возмущению).



Контур комбинированной АСР: **ОР** – объект регулирования, **АР** – автоматический регулятор,  $f_{гл}$  – главное возмущающее воздействие,  **$y(t)$**  – текущее значение регулируемого параметра,  **$u(t)$**  – управляющее воздействие,  $y_0$  – заданное значение регулируемого параметра; **Гл.О.Св.** – главная обратная связь

# Показатели качества регулирования

## **Эффективность** работы АСР

характеризуется показателями качества регулирования.

Существуют **прямые и косвенные** методы оценки качества регулирования.

**Прямые** - основаны на анализе графика переходного процесса регулирования, характеризуются простотой и наглядностью.

**Косвенные** – используют математические модели АСР; позволяют связать качество регулирования со значениями параметров АСР.

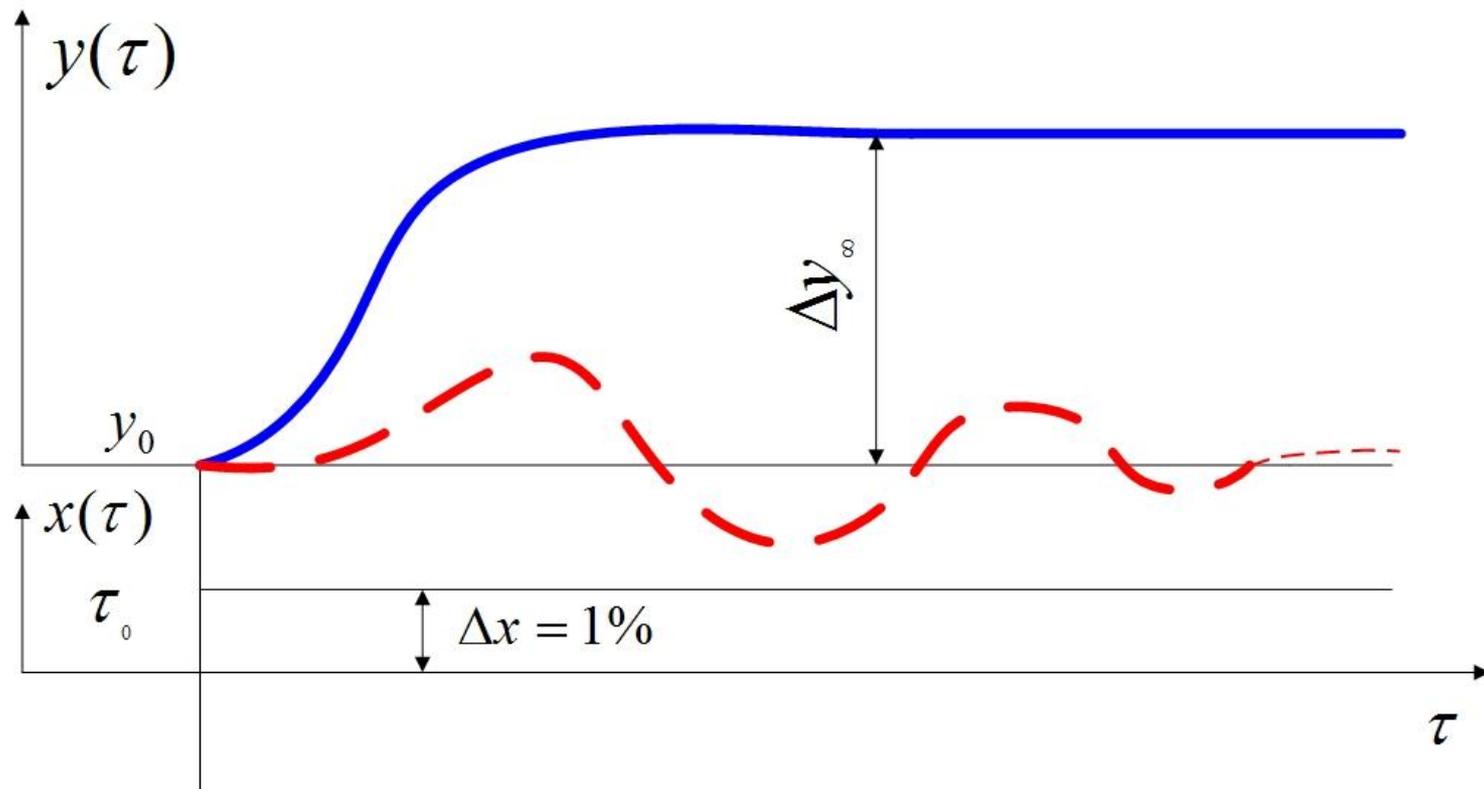
## Показатели качества регулирования

**Переходный процесс регулирования** – динамический процесс в АСР, вызванный каким-либо возмущающим воздействием на **ОР** и направленный на восстановление заданного значения регулируемого параметра.

Для оценки качества регулирования с помощью прямых показателей принято рассматривать переходный процесс, вызванный **единичным ступенчатым возмущающим воздействием**.

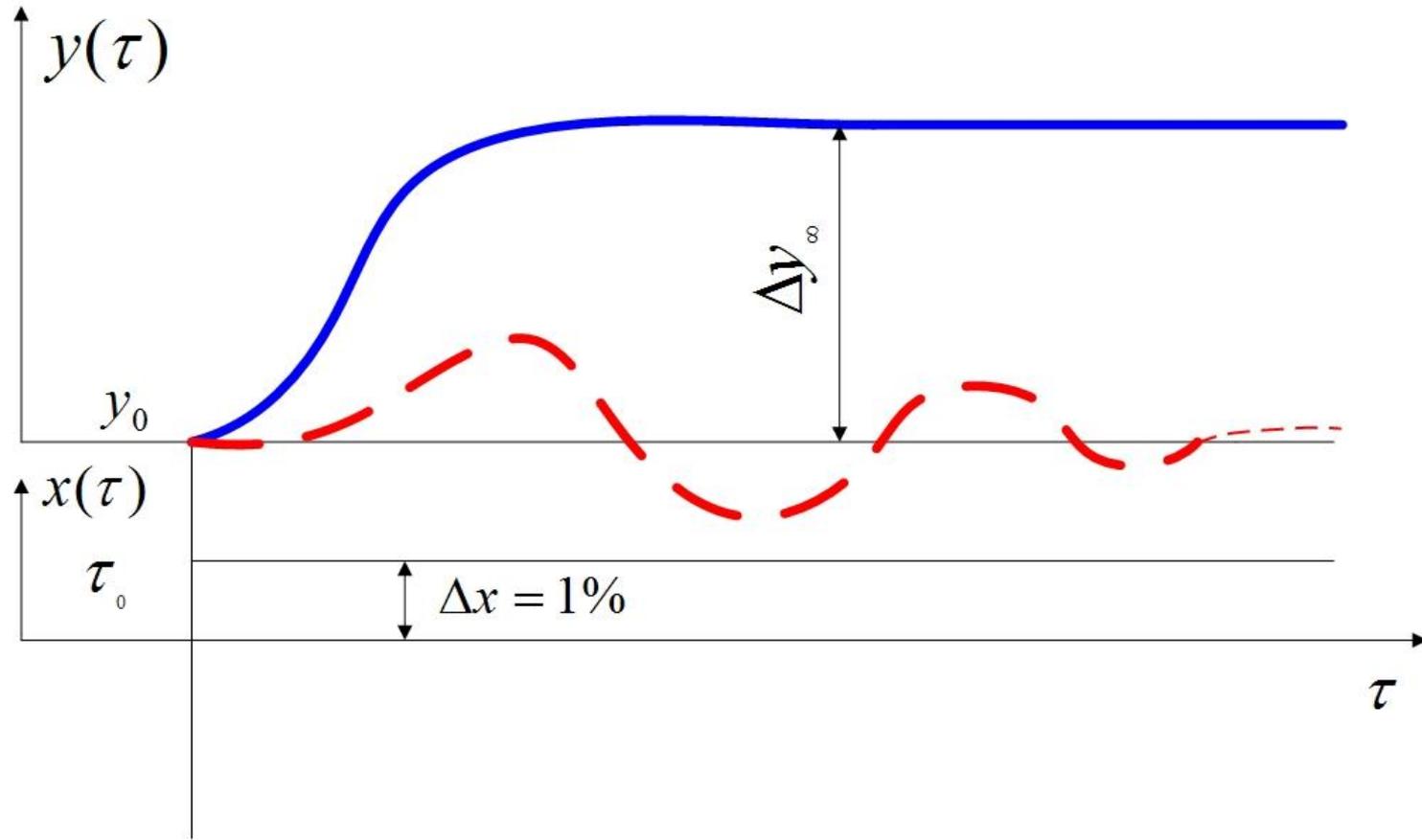
# Прямые показатели качества регулирования

Переходная функция представляет собой реакцию системы на **единичное ступенчатое возмущающее воздействие**  $\Delta x$ . Пример переходной функции стабилизирующей АСР приведен на рисунке (красная пунктирная линия).  $\Delta y_\infty$  – реакция объекта на возмущение без работы регулятора (сплошная синяя линия).



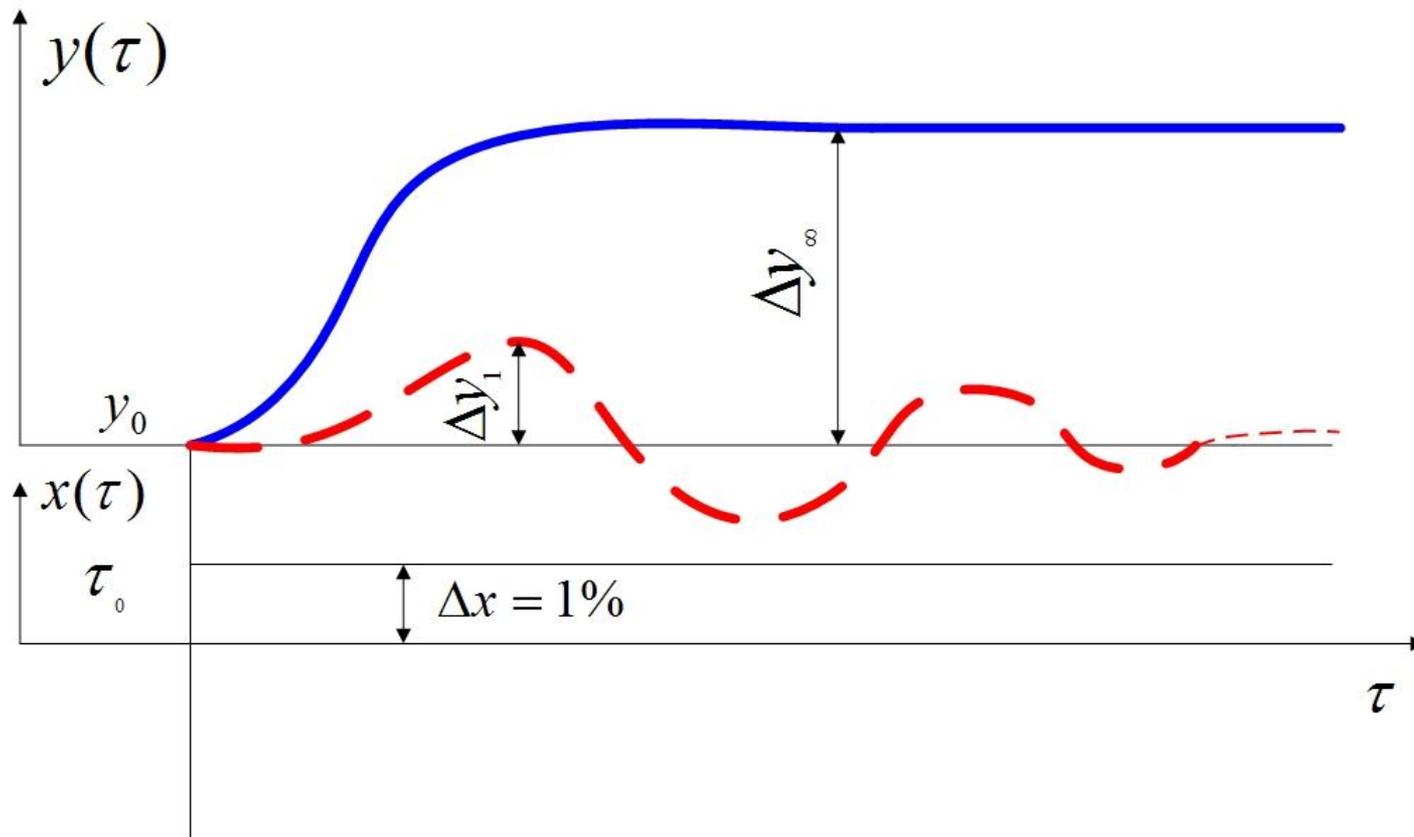
# Прямые показатели качества регулирования

До момента времени  $\tau_0$  система находилась в состоянии покоя, и регулируемый параметр имел заданное значение. После нанесения возмущающего воздействия регулируемый параметр стал отклоняться от заданного значения, вступил в работу регулятор, и в результате его регулирующего воздействия после нескольких колебаний параметр снова пришел к установившемуся значению.



# Прямые показатели качества регулирования

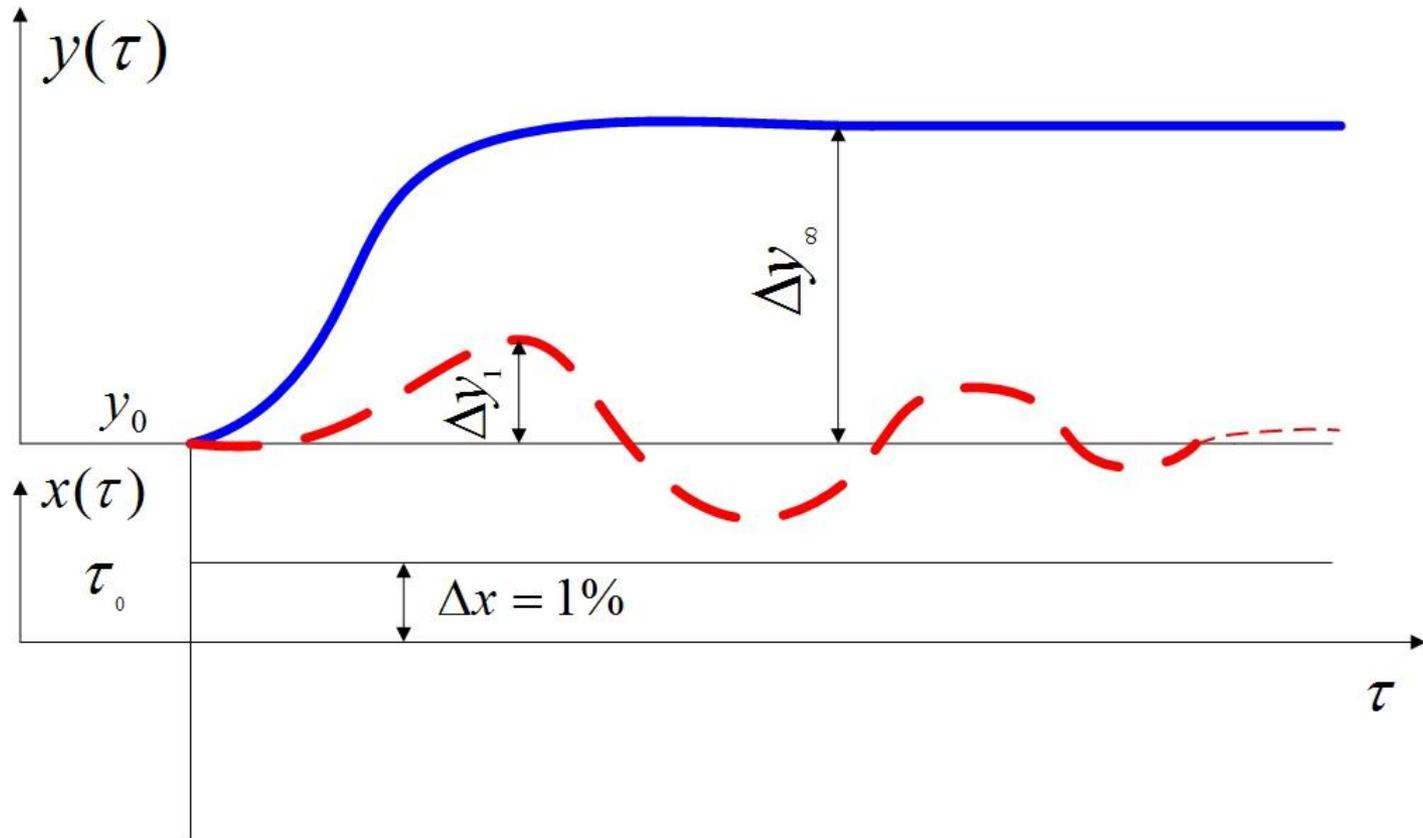
$\Delta y_1$  – **максимальное динамическое отклонение** - амплитуда первой полуволны отклонения, следующей непосредственно за возмущением. Это отклонение зависит от свойств объекта регулирования, величины возмущения, типа и параметров настройки регулятора.



# Прямые показатели качества регулирования

Динамический коэффициент регулирования  $R_D$  представляет собой отношение максимального динамического отклонения  $\Delta y_1$  к отклонению  $\Delta y_\infty$  при том же воздействии, но без вмешательства регулятора:.. Этот показатель характеризует степень воздействия регулятора на переходный процесс.

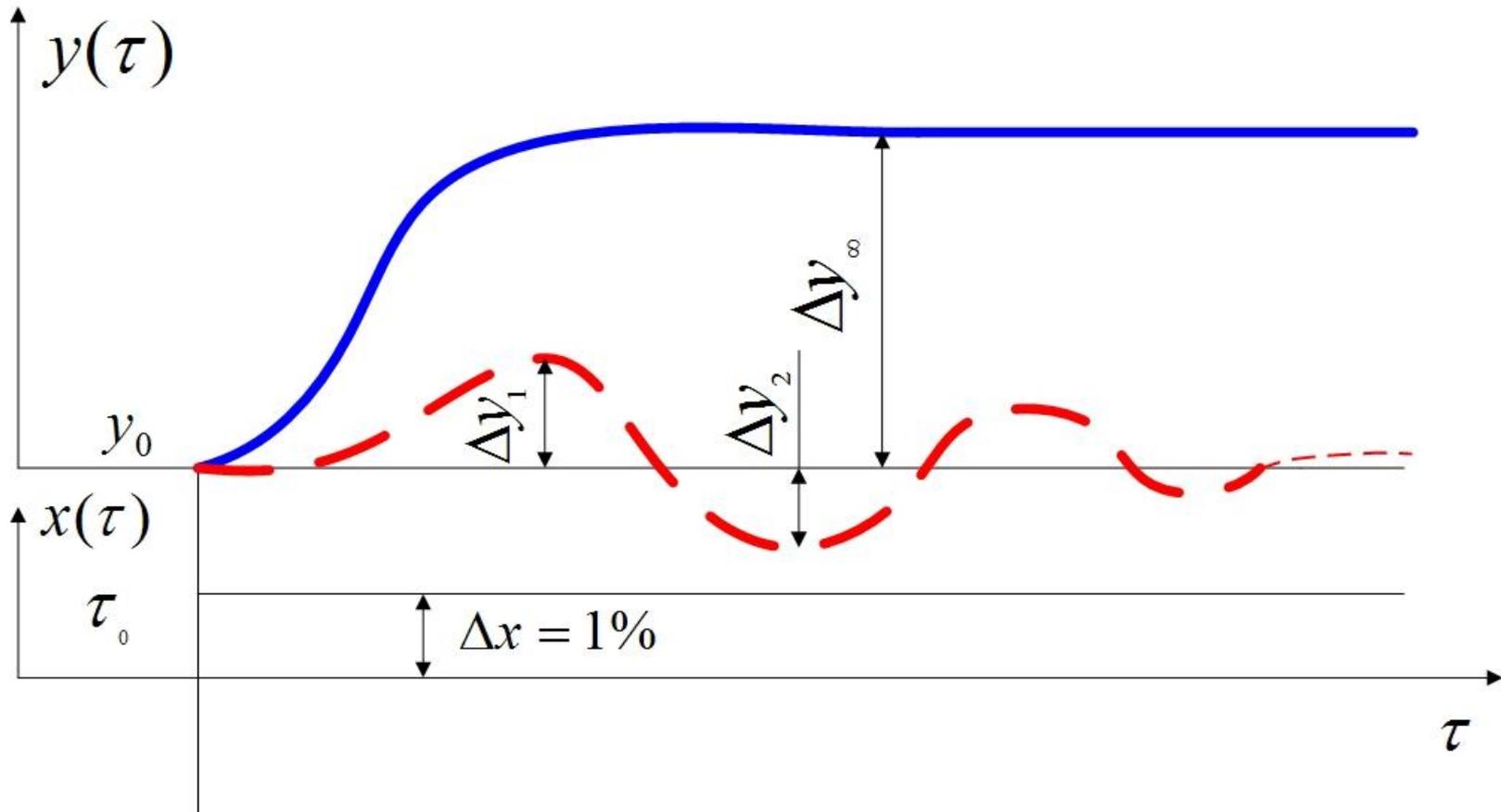
$$R_D = \frac{\Delta y_1}{\Delta y_\infty}$$



# Прямые показатели качества регулирования

Показатель «перерегулирование» связан с возможным отклонением регулируемого параметра под воздействием регулятора в сторону, противоположную первоначальному отклонению ( $\Delta y_2$ ). Перерегулирование  $\sigma$  характеризует степень колебательности переходного процесса, выражается в процентах и определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} \cdot 100, \%$$



# Прямые показатели качества регулирования

Переходный процесс, при котором  $\sigma = 0\%$ , называется апериодическим.



# Прямые показатели качества регулирования

При незатухающих колебаниях  $\sigma = 100\%$ .



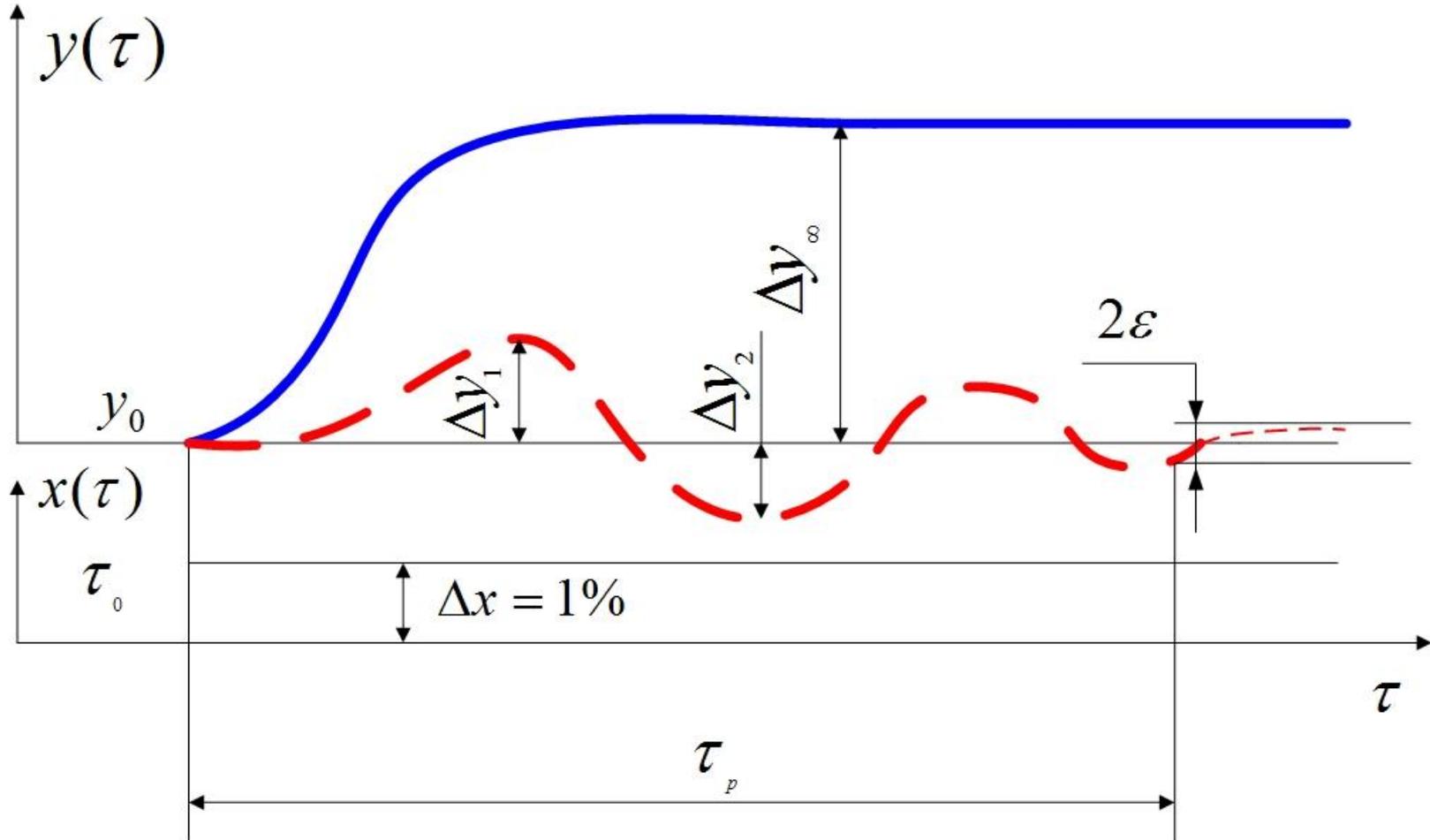
# Прямые показатели качества регулирования

При неустойчивом (расходящемся) процессе  $\sigma > 100\%$ .



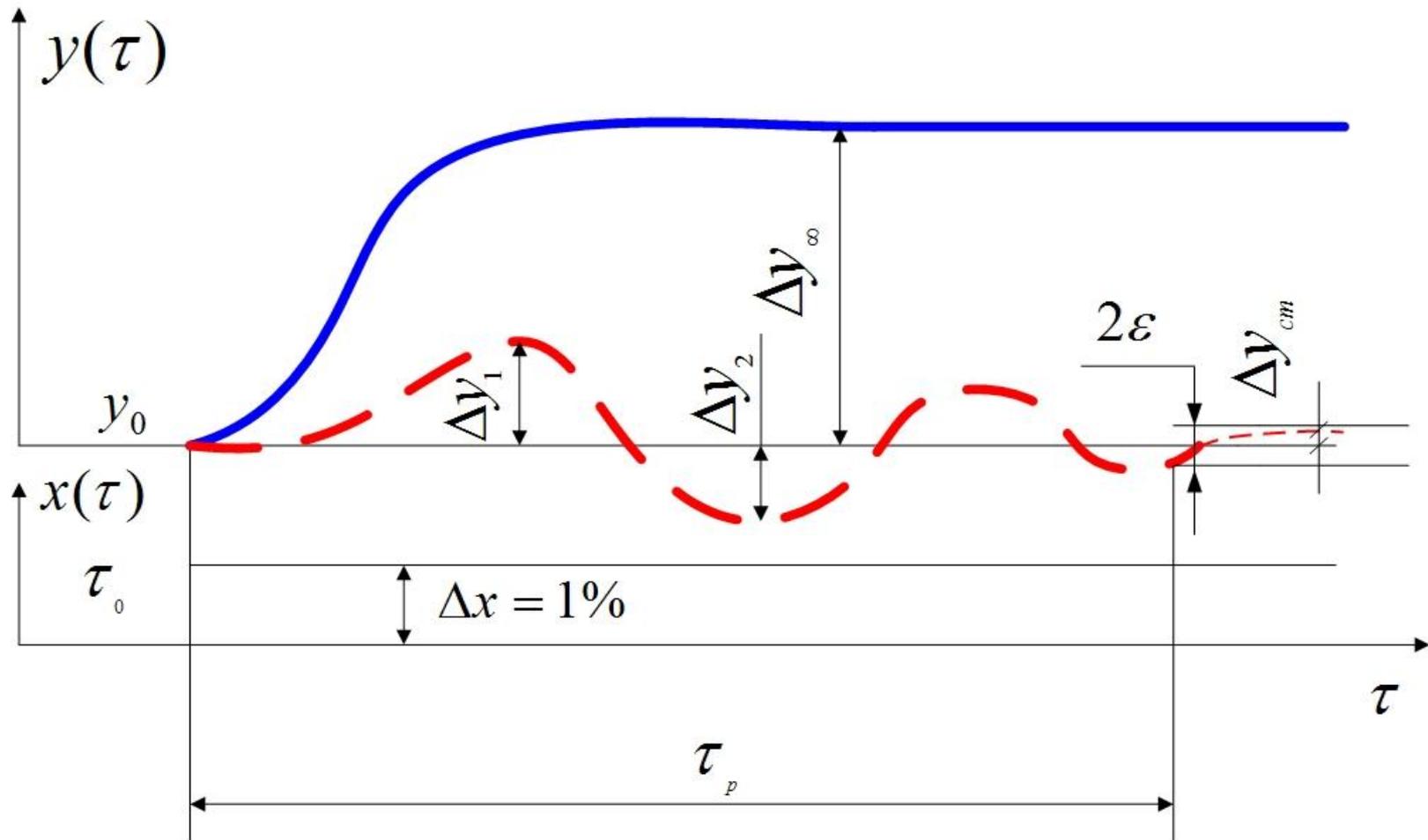
# Прямые показатели качества регулирования

Время регулирования  $\tau_p$  – это интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение регулируемого параметра не будет превышать допустимых пределов (3...5% от  $y_0$ ).  $2\varepsilon$  – зона допустимых отклонений.



# Прямые показатели качества регулирования

Статическая ошибка  $\Delta y_{cm}$  – это остаточное отклонение регулируемого параметра от заданного значения после завершения переходного процесса регулирования.



# Прямые показатели качества регулирования

Перечисленные показатели качества регулирования

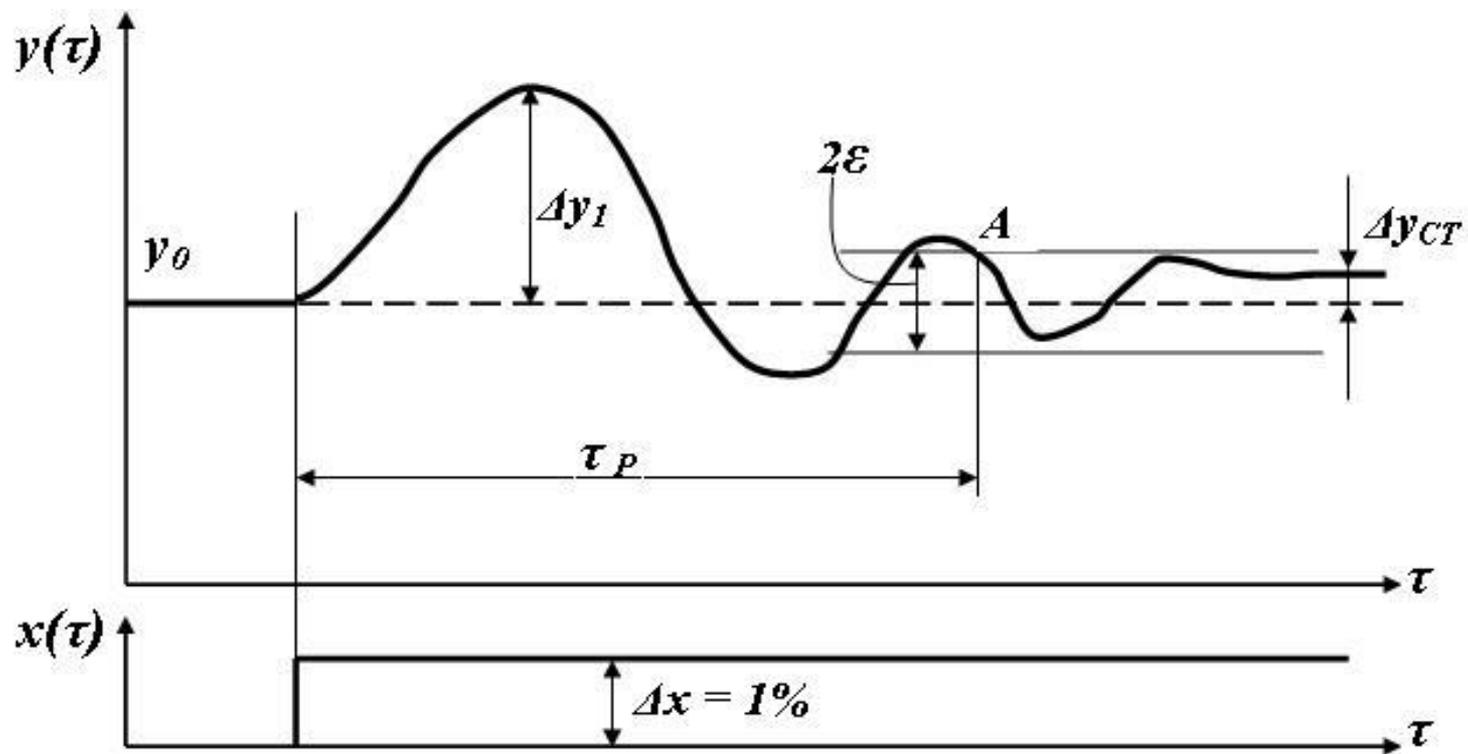
$$\Delta u_{ст}$$

$$\tau_p$$

$$\sigma$$

$$\Delta u_1$$

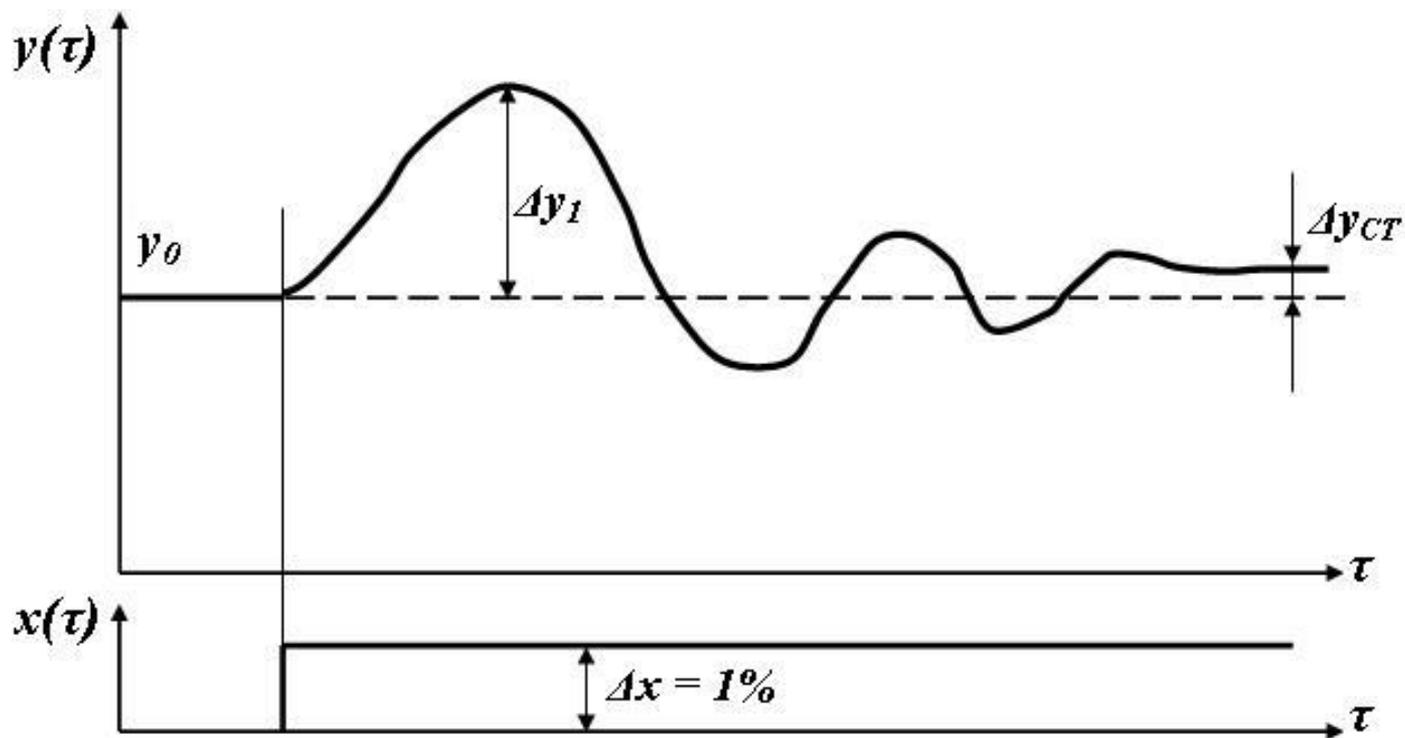
**могут быть использованы** как для **оценки работы** действующих систем, так и при **расчете и проектировании** новых. В последнем случае, исходя из условий технологического процесса, формулируются требования к этим показателям.



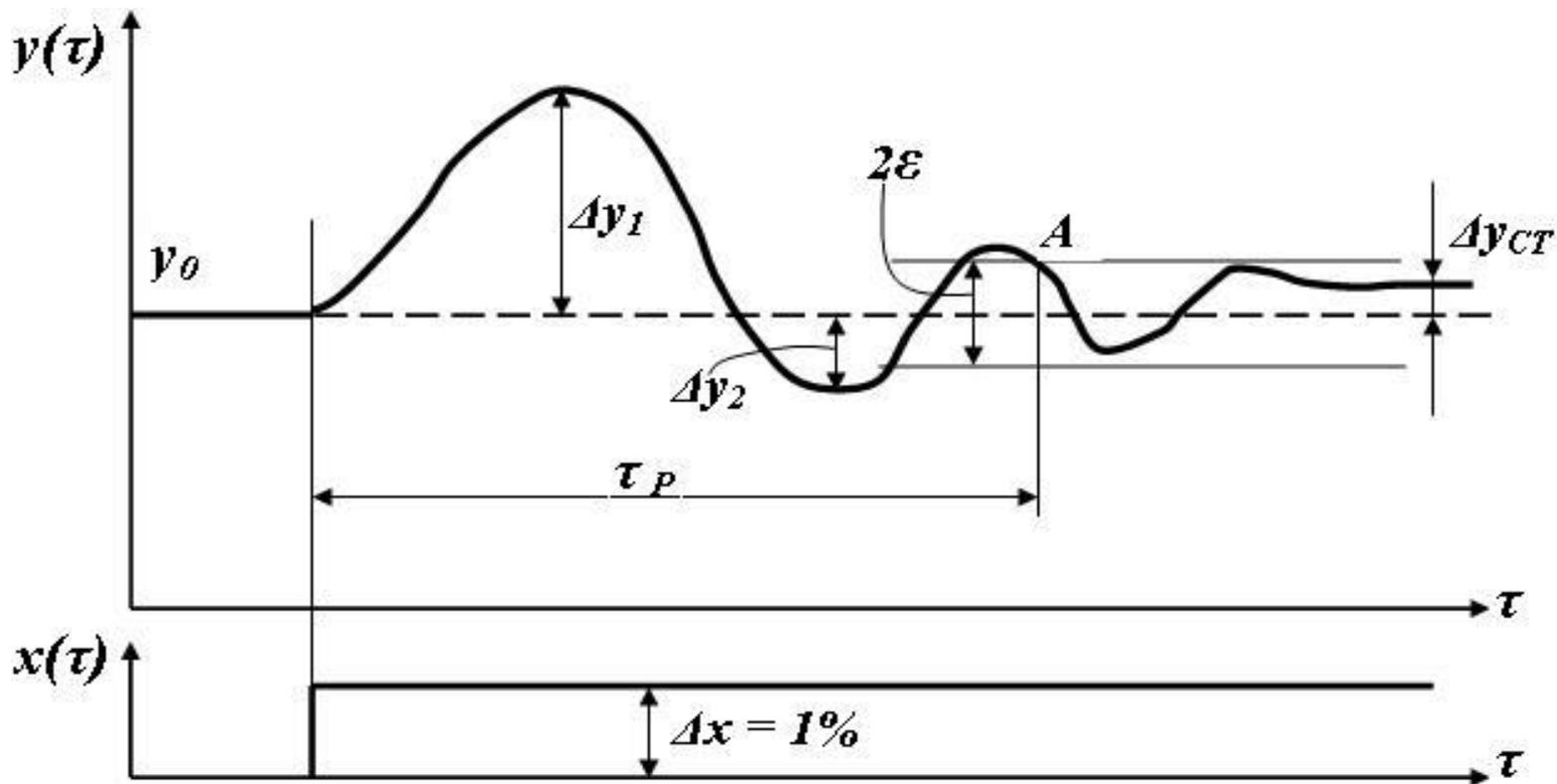
$\tau_p$  - *время регулирования* – интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение регулируемого параметра будет меньше допустимых пределов (2...5% от  $y_0$ ).

$A$  – момент условного окончания процесса регулирования;

$2\varepsilon$  – зона допустимых отклонений



$\Delta y_{ст}$  - *статическая ошибка регулирования* – остаточное отклонение регулируемого параметра от заданного значения после завершения переходного процесса регулирования.



**Перерегулирование** - возможное отклонение регулируемого параметра под воздействием регулятора в сторону, противоположную первоначальному отклонению.

$\sigma$  - *степень перерегулирования*;

определяется по формуле:

$$\sigma = (\Delta y_2 / \Delta y_1) \cdot 100, \% \quad (2.1)$$

Переходный процесс, при котором  $\sigma = 0$ , называется ***апериодическим***.

Переходный процесс, при котором  $\sigma = 100$ , называется ***автоколебательным***

## 4) Свойства объектов регулирования

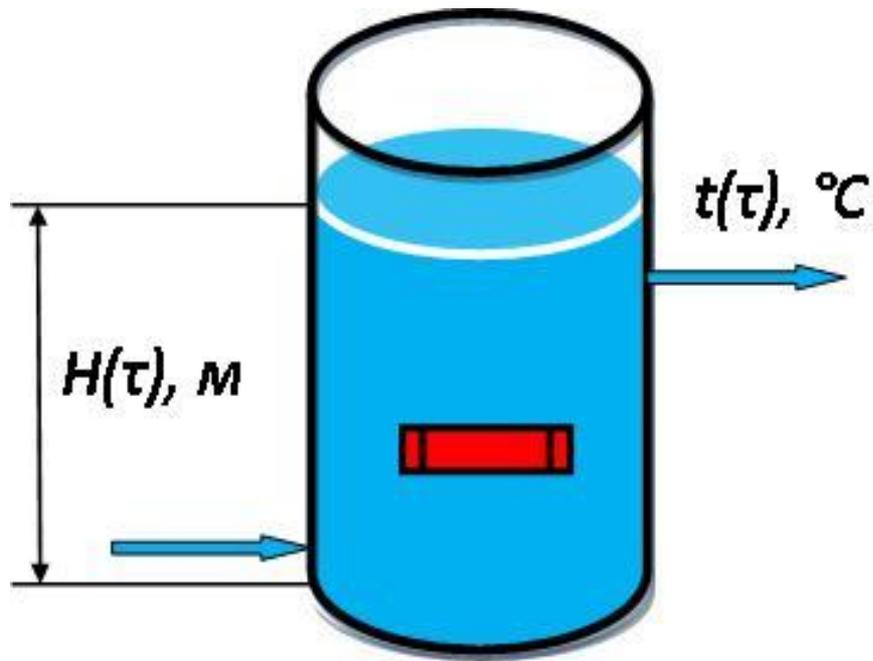


- Свойства, определяющие динамику объекта:
- Емкость
- Инерционность
- Самовыравнивание
- Запаздывание

# Емкость

- Характеризует способность объекта аккумулировать вещество или энергию.
- Емкость – это количество вещества (или энергии), аккумулированное объектом и соответствующее заданному значению регулируемого параметра  $y_0$
- $Q$  – емкость; [Дж, кДж, МДж; кг, т; м<sup>3</sup>, л, ... ]

# Емкость (пример)



1)  $H(\tau) \rightarrow H_\theta$

$Q$  – кг, л;

2)  $t(\tau) \rightarrow t_\theta$

$Q$  – кДж;

# Коэффициент емкости

$$C = \Delta Q / \Delta y \quad (2.2)$$

Коэффициент емкости – параметр, характеризующий приращение емкости, необходимое для изменения регулируемого параметра на единицу.

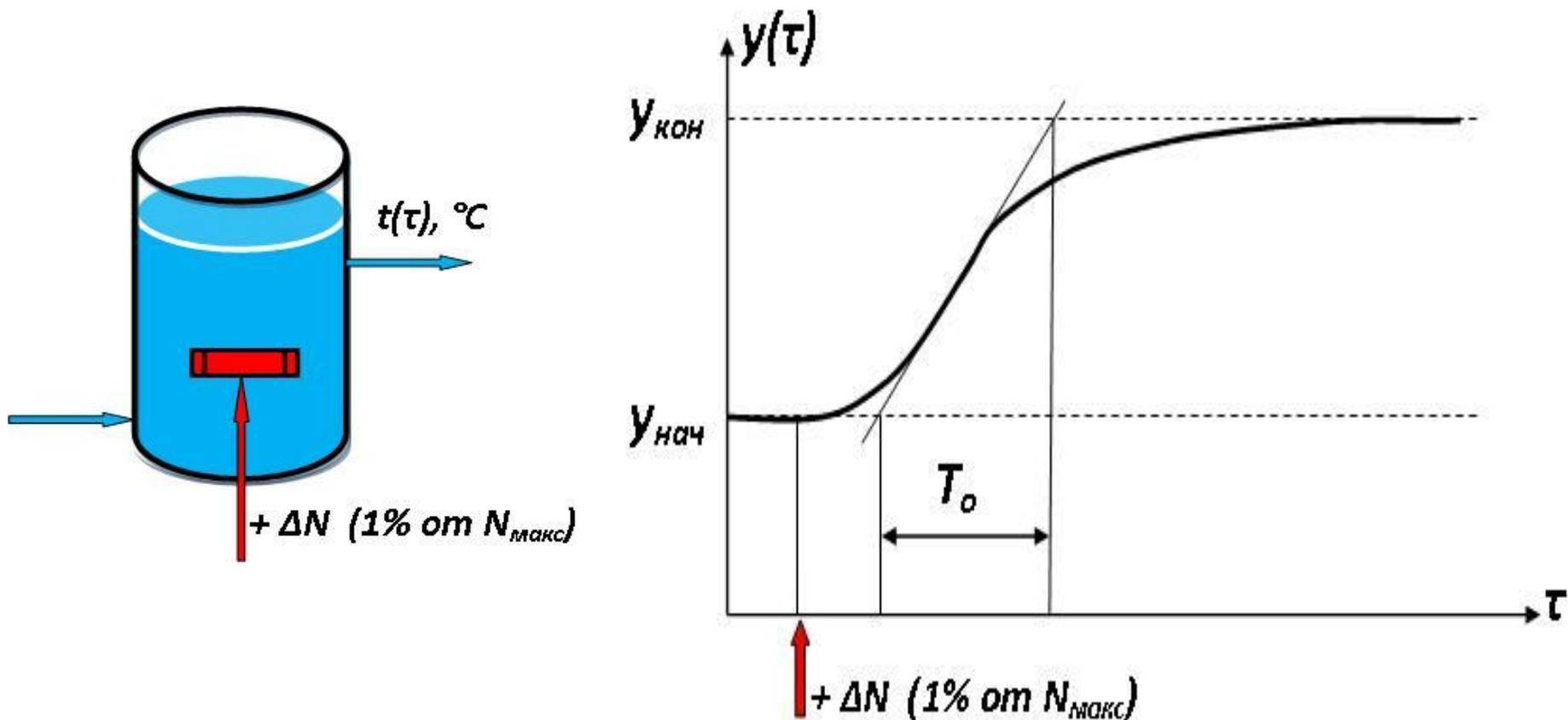
Например, [кДж / °С]

# Инерционность

- Инерционность - характеризует скорость протекания переходных процессов в объекте регулирования.
- Численно выражается параметрами:
  - постоянная времени объекта -  $T_0, с$
  - время разгона объекта -  $T_p, с$

- ***Постоянная времени объекта*** - это *условное время*, в течение которого после нанесения единичного ступенчатого воздействия на объект регулируемый параметр изменится от своего исходного значения  $u_{нач}$  до нового установившегося значения  $u_{кон}$  *при условии, что изменение происходит с постоянной максимальной скоростью.*

# Рис.2.5 Постоянная времени объекта регулирования

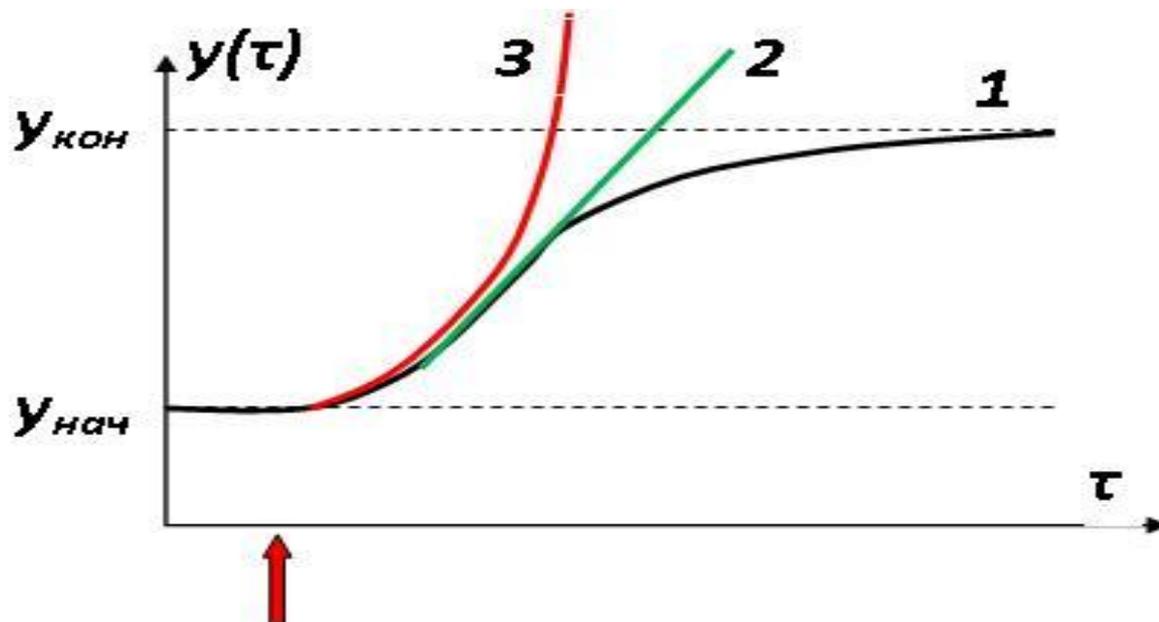


# Самовыравнивание

- **Самовыравнивание** – характеризует способность объекта регулирования **самостоятельно восстанавливать баланс** между притоком и стоком вещества или энергии после того, как баланс был нарушен каким-либо возмущающим воздействием.

- Самовыравнивание проявляется в том, что после нанесения ступенчатого воздействия на объект (нарушение баланса) регулируемый параметр начнет изменяться и через некоторое время стабилизируется на новом установившемся значении (баланс восстановится).
- Самовыравнивание облегчает процесс управления.

# Рис.2.6 Типы объектов регулирования



**1 – с положительным самовыравниванием, устойчивые, статические;**

**2 - с нулевым самовыравниванием, нейтральные, астатические;**

**3 - с отрицательным самовыравниванием, неустойчивые.**

# Запаздывание

- **Запаздывание** – отставание во времени *реакции* объекта регулирования на какое-либо воздействие.

(под реакцией понимается начало изменения регулируемого параметра)

- По своей природе подразделяется на:
  - - транспортное (передаточное)
  - - емкостное (переходное)

**$T_z$**  - время запаздывания, с

# Транспортное запаздывание

- - связано с наличием в ОР транспортирующих устройств: транспортеров, конвейеров, трубопроводов, шнеков ...

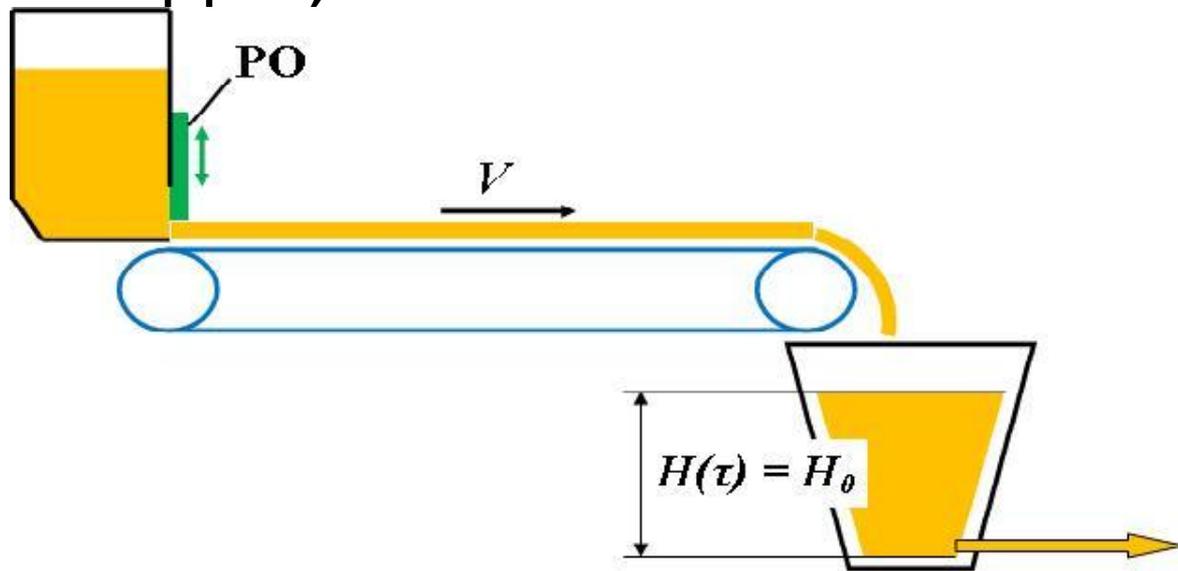
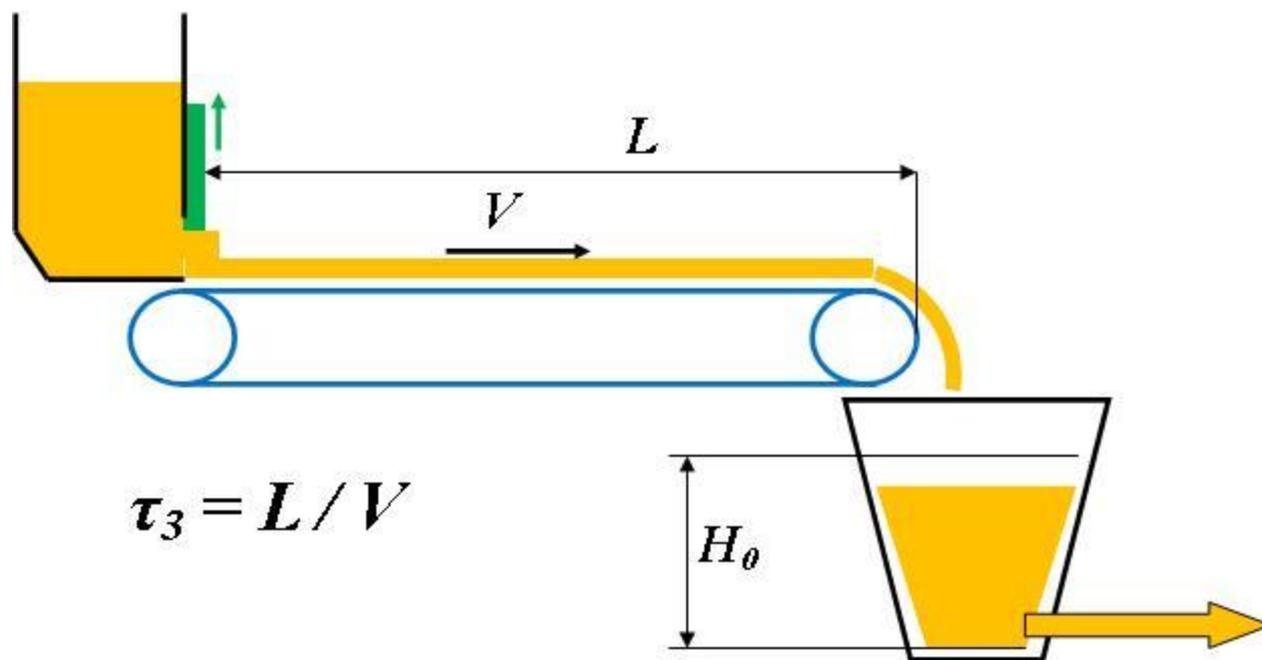


Рис. 2.7 Транспортное запаздывание

# Рис. 2.7(продолжение) Транспортное запаздывание



# Емкостное запаздывание

- - связано с наличием в ОР тепловых, гидравлических и др. сопротивлений

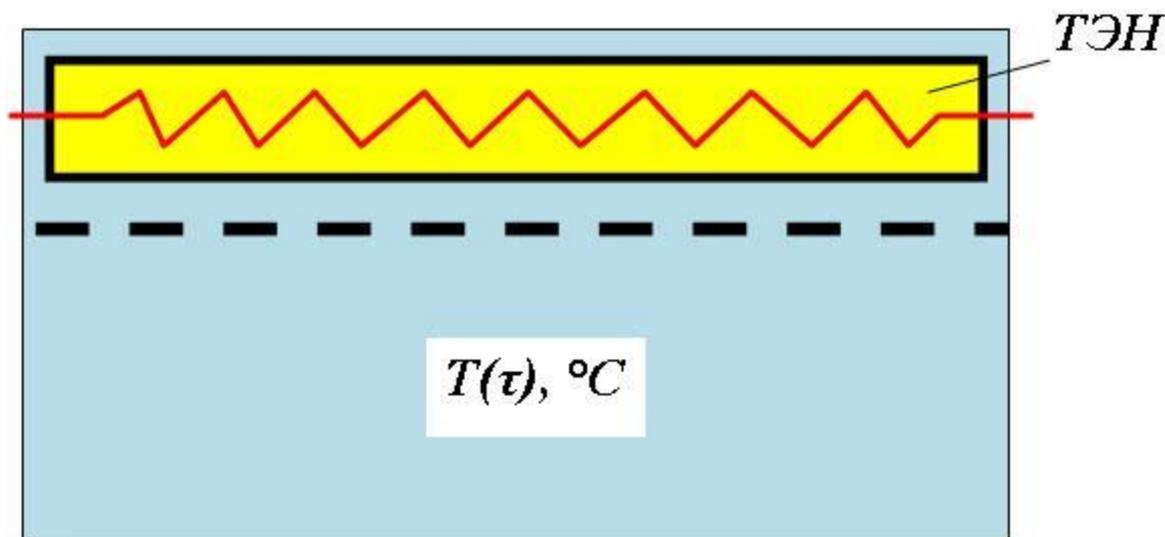


Рис. 2.8 Емкостное запаздывание

# Свойства, определяющие класс математической модели

- Многомерность (одномерные, многомерные)
- Распределенность параметров (с распределенными параметрами, с сосредоточенными параметрами)
- Стационарность (стационарные, нестационарные)
- Стохастичность (детерминированные, стохастические)
- Линейность (линейные, нелинейные)

## 5) Методы исследования свойств объектов регулирования

- Задача исследований – создание математической модели ОУ, необходимой для **синтеза** системы управления (СУ) и ее работы – **идентификация ОУ**

-

# Этапы идентификации ОУ :

- 1) структурная идентификация – определяются свойства, используемые для выбора класса математической модели (многомерность, распределенность параметров, стационарность, стохастичность, линейность)
- 2) параметрическая идентификация - определяются статические и динамические характеристики ОУ, параметры ОУ, которые позволяют конкретизировать уравнения математической модели ОУ и СУ

# Статические и динамические характеристики ОУ

- **Статические характеристики** – описывают зависимости выходных величин от входных в установившихся состояниях ОУ

$$y_i = f(x_1, x_2, x_j)$$

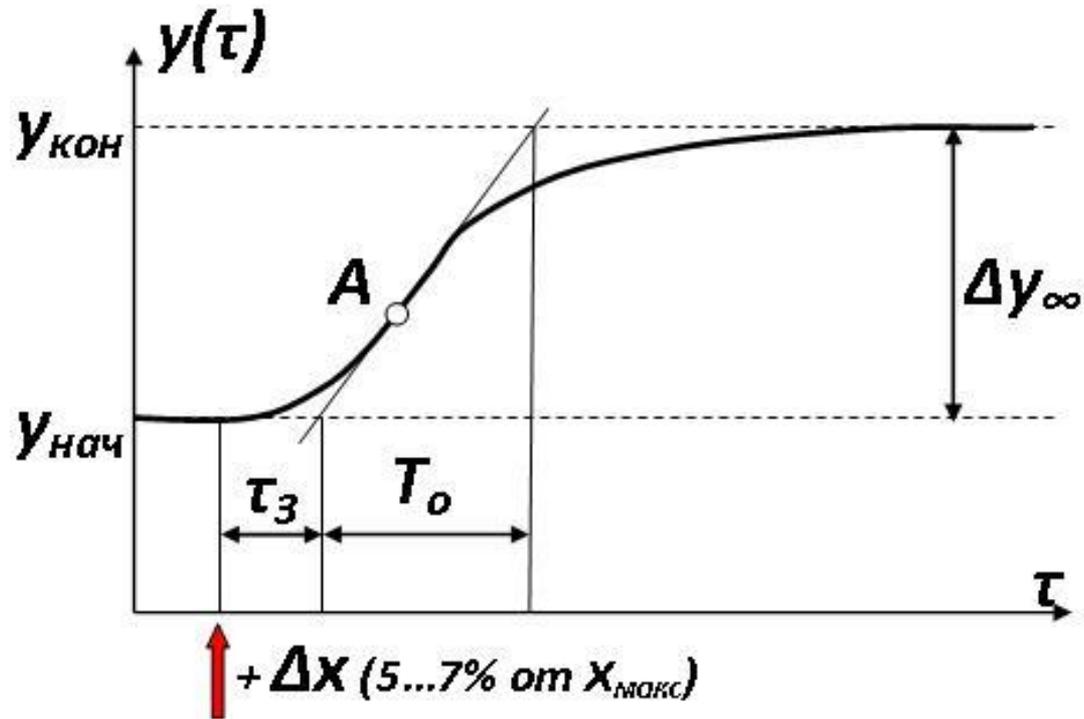
**Установившееся состояние** (статика) – входные и выходные величины не изменяются во времени

- **Динамические характеристики** - описывают изменения во времени выходных величин в зависимости от входных (динамика, переходные процессы)  
$$y_i(\tau) = f[x_1(\tau), x_2(\tau), x_j(\tau), \tau]$$



Рис. 2.9 Методы исследования свойств ОР

# Рис. 2.10 Кривая разгона ОР



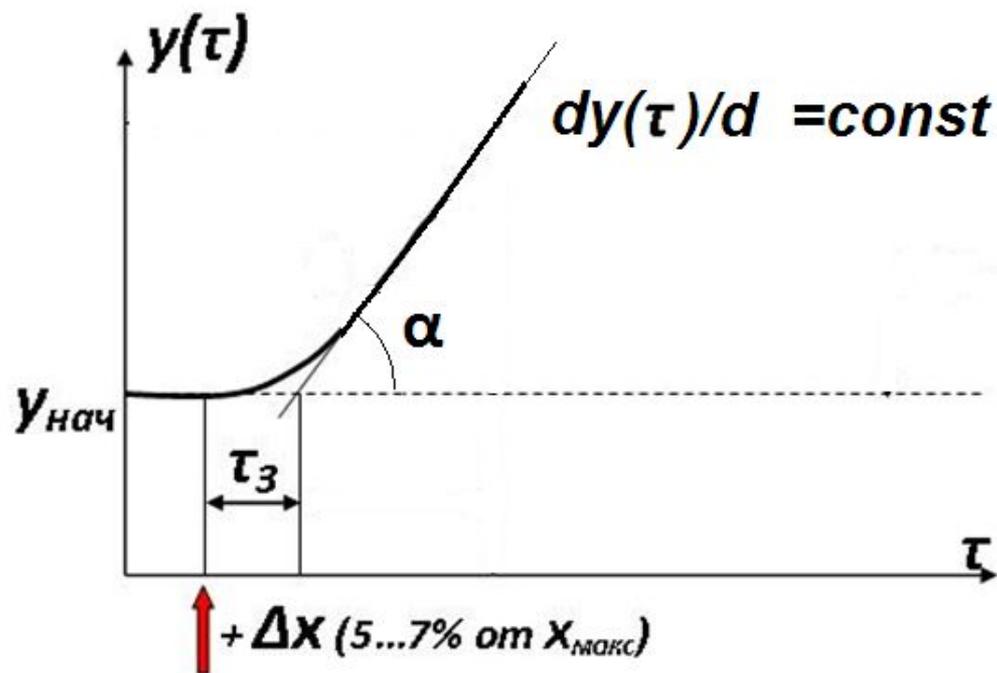
Коэффициент передачи объекта регулирования:

$$K_o = \Delta y_{\infty} / \Delta x \quad (2.4)$$

Коэффициент самовыравнивания ОР:

$$K_c = y_{нач} / K_o \cdot 10^{-2} \quad (2.5)$$

# Рис. 2.11 Кривая разгона для астатического объекта



$$K_{об} = \frac{dy(\tau)/d\tau}{\Delta x} = \frac{\text{tg } \alpha}{\Delta x} \quad (2.7)$$

$$T_{об} = 1/K_{об} \quad (2.8)$$

# Импульсная переходная характеристика

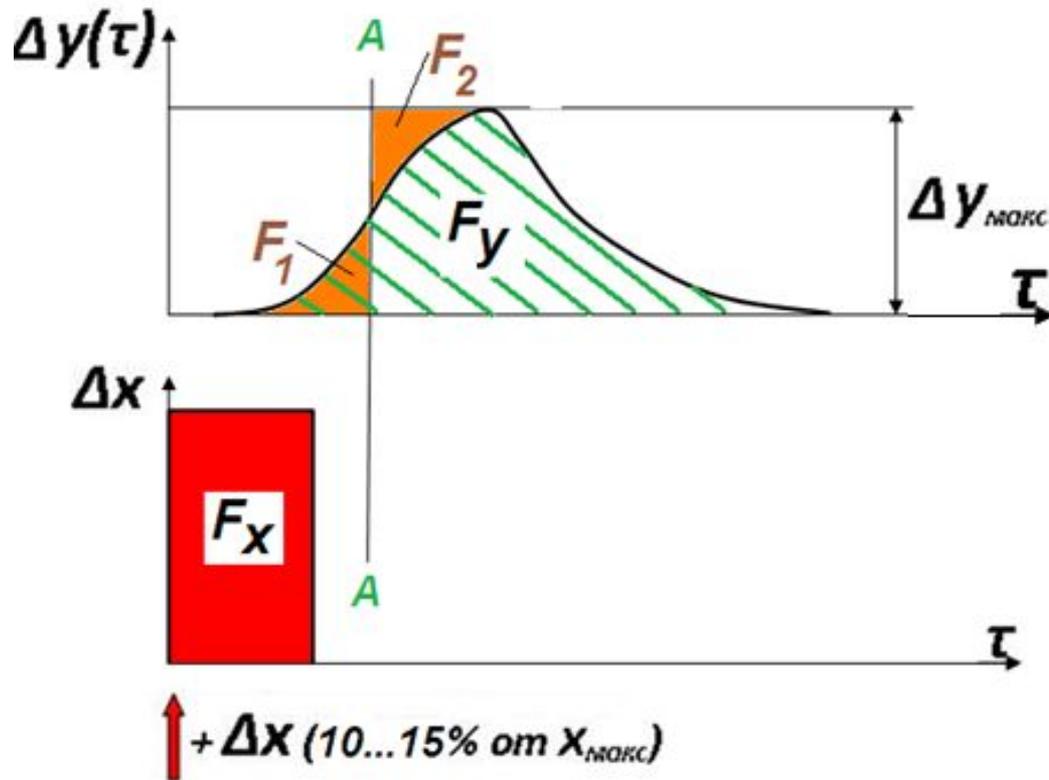


Рис. 2.12 Импульсная переходная характеристика

# Параметры:

Скорость разгона:  $\varepsilon = \Delta y_{\text{макс}} / F_x$  (2.9)

Коэффициент самовыравнивания:  $K_c = F_x / F_y$  (2.10)

Постоянная времени объекта:  $T_{\text{об}} = 1 / (\varepsilon \cdot K_c)$  (2.11)

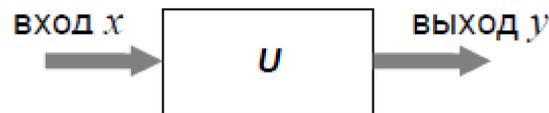
Коэффициент передачи объекта:  $K_{\text{об}} = y_0 / K_c \cdot 10^{-2}$  (2.12)

# Математическая модель объекта регулирования

- Задачи выбора нужного закона регулирования и анализа работы систем методами математического моделирования основаны на применении концепции опорно-возмущенного движения, которая была предложена А.К. Ляпуновым. В соответствии с этой концепцией изменение во времени любых переменных, в том числе и выходного показателя  $Y(t)$ , может быть представлено двумя составляющими - функцией  $Y(t)$ , характеризующей базовое (опорное) состояние регулируемого процесса, и функцией возмущенного движения  $y(t)$ , которая отражает динамику отклонений переменной от базового значения.
- Поскольку при регулировании такие отклонения невелики, то для математического описания возмущенного движения пригодны **обычные дифференциальные уравнения** и линеаризованные зависимости, что существенно упрощает решение задач методами математического моделирования.

# Математическая модель объекта регулирования

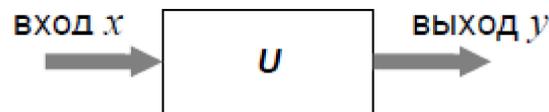
- Модели, предназначенные для решения задач управления, могут быть представлены определенными сочетаниями динамических звеньев.
- Модель – это объект, который мы используем для изучения другого объекта (оригинала). Модель и оригинал должны быть похожи, чтобы выводы, сделанные при изучении модели, можно было бы (с некоторой вероятностью) перенести на оригинал.
- Любой объект взаимодействует с внешней средой с помощью входов и выходов. Входы – это возможные воздействия на объект, выходы – это те сигналы, которые можно измерить. Например, для электродвигателя входами могут быть напряжение питания и нагрузка, а выходами – частота вращения вала, температура. При изменении информации на входе меняется внутреннее состояние объекта и, как следствие, выходы:



# Математическая модель объекта регулирования

Создание и использование таких моделей основано на следующих предпосылках.

1. Динамическое звено – это условное представление одной математической зависимости, с помощью которой можно описать переходный процесс в отдельной части системы. Количество и разновидности используемых звеньев определяются назначением системы и динамическими свойствами ее основных элементов.
2. Принято, что звено отражает динамику передачи воздействия только в одну сторону – от одного входа к одному выходу.



# Математическая модель объекта регулирования

Создание и использование таких моделей основано на следующих предпосылках.

3. Если необходимо учитывать влияние выхода на вход, как это обычно бывает, то применяется обратная связь, которая может быть отрицательной или положительной, постоянно действующей («жесткой») или же постепенно исчезающей к концу переходного процесса («гибкой»).
4. При алгебраическом сложении передаваемых в системе сигналов используется принцип суперпозиций (результатирующий эффект равен сумме эффектов отдельных воздействий), что справедливо лишь для линейных систем.

# Математическая модель объекта регулирования

Система расчленяется на отдельные динамические звенья так, чтобы они могли описывать переходные процессы с помощью дифференциальных уравнений не выше второго порядка.

# Основные типовые звенья

- Пропорциональное (усилительное)
- Интегрирующее
- Идеальное дифференцирующее
- Реальное дифференцирующее
- Инерционное (апериодическое) 1-го порядка
- Чистого запаздывания
- ... ..

# Пропорциональное (усилительное)

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d^m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$a_0 y(\tau) = b_0 x(\tau)$$

$$y(\tau) = K x(\tau)$$

# Интегрирующее

$$a_n \frac{d_n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d_{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d_m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d_{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} = b_0 x(\tau)$$

$$\frac{d y(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_u} x(\tau)$$

$$y(\tau) = \frac{1}{T_u} \int x(\tau) d\tau$$

# Идеальное дифференцирующее

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d^m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$a_0 y(\tau) = b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} \rightarrow y(\tau) = T \frac{d x(\tau)}{d\tau}$$

# Реальное дифференцирующее

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d^m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) = b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau}$$



$$T \frac{d y(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = K \frac{d x(\tau)}{d\tau}$$

# Инерционное (апериодическое) 1-го порядка

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d^m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) = b_0 x(\tau)$$



$$T \frac{d y(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = K \cdot x(\tau)$$

# Чистого запаздывания

$$a_n \frac{d^n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d^m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$y(\tau) = x(\tau - \tau_3)$$

# Использование преобразования Лапласа для моделирования ТДЗ и СИСТЕМ

Преобразование Лапласа - интегральное преобразование, связывающее функцию  $F(p)$  комплексного переменного (изображение) с функцией  $f(\tau)$  действительного переменного (оригинал).

$f(\tau)$  называют оригиналом преобразования Лапласа, а  $F(p)$  - изображением преобразования Лапласа.  $f(\tau)$  и  $F(p)$  однозначно определяются друг относительно друга, то есть если известно  $f(\tau)$ , то всегда можно узнать  $F(p)$ , и наоборот, если известно  $F(p)$ , то всегда можно получить  $f(\tau)$ .

## 2 Использование преобразования Лапласа для моделирования ТДЗ и систем

$f(\tau)$  - функция оригинал  $\rightarrow$   $F(p)$  - изображение по Лапласу функции  $f(\tau)$

$p$  - оператор Лапласа

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(\tau) \cdot e^{-p\tau} \cdot d\tau$$

3.2

# Понятие о передаточной функции. Передаточные функции основных ТДЗ

$$a_n \frac{d_n y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d_{n-1} y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d y(\tau)}{d\tau} + a_0 y(\tau) =$$
$$b_m \frac{d_m x(\tau)}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d_{m-1} x(\tau)}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d x(\tau)}{d\tau} + b_0 x(\tau) \quad (1)$$

$$a_n p^n Y(p) + a_{n-1} p^{n-1} Y(p) + \dots + a_1 p Y(p) + a_0 \bar{Y}(p) = b_m p^m X(p) + b_{m-1} p^{m-1} X(p) + \dots + b_1 p X(p) + b_0 X(p)$$

$$Y(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \cdot X(p)$$

Передаточная функция  $W(p)$

$$Y(p) = W(p) \cdot X(p)$$

3.3

# Формальное определение передаточной функции:

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

3.4

# Передаточные функции основных тлр.

$$y(\tau) = K x(\tau)$$

$$y(\tau) = \frac{1}{T_u} \int x(\tau) d\tau$$

$$y(\tau) = T \frac{d x(\tau)}{d\tau}$$

$$T \frac{d y(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = K \cdot \frac{d x(\tau)}{d\tau}$$

$$T \frac{d y(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = K \cdot x(\tau)$$

$$y(\tau) = x(\tau - \tau_3)$$

$$W(p)^{\text{проп.}} = K$$

$$W(p)^{\text{инт.}} = \frac{1}{T_u \cdot p}$$

$$W(p)^{\text{ид.д.}} = T \cdot p$$

$$W(p)^{\text{реал.д.}} = \frac{K \cdot p}{T \cdot p + 1}$$

$$W(p)^{\text{инерц.1}} = \frac{K}{T \cdot p + 1}$$

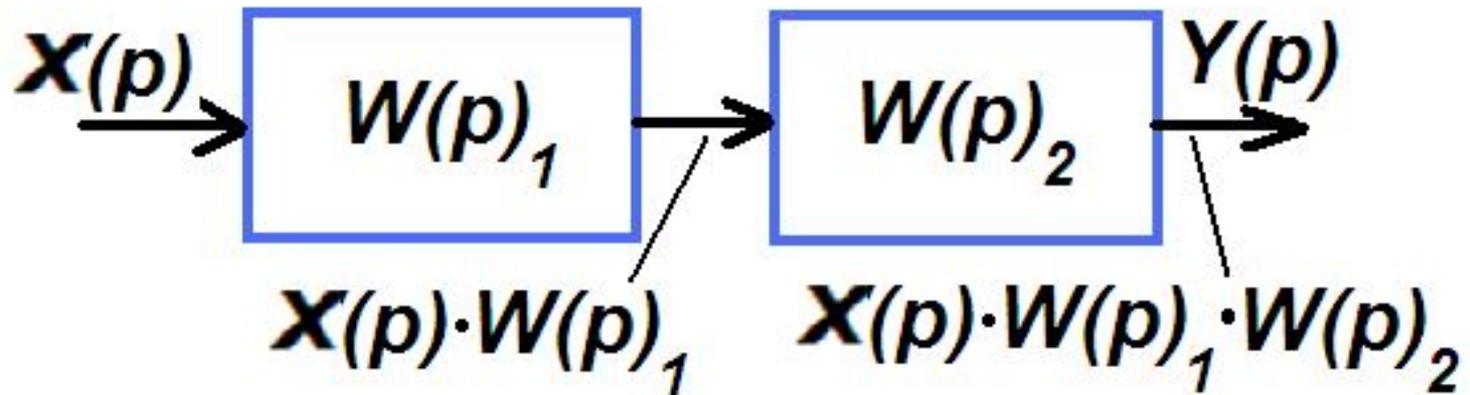
$$W(p)^{\text{ч.зап.}} = e^{-p\tau_3}$$

# 4 Передаточные функции основных комбинаций звеньев и систем

Типовые виды соединений  
звеньев:

- последовательное
- параллельное
- встречно-параллельное  
(соединение с обратной связью)

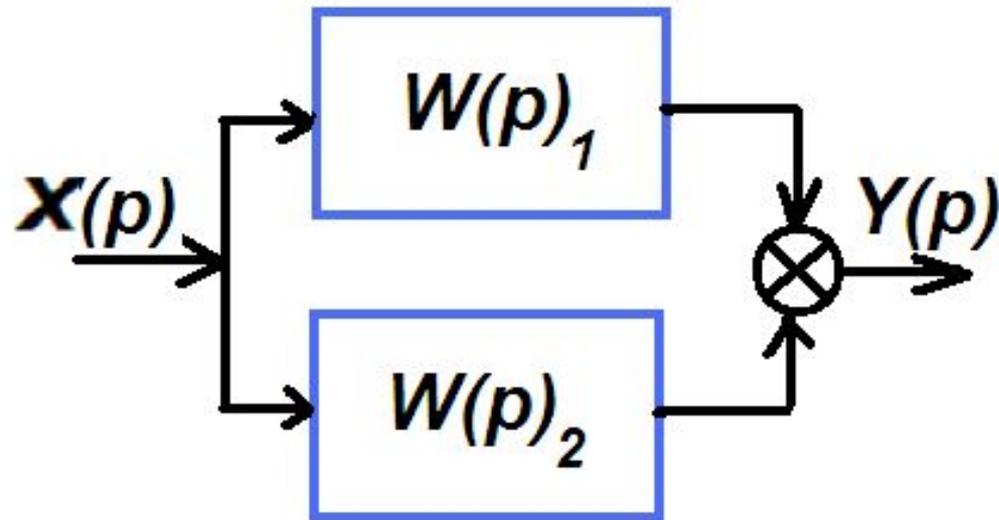
Передаточная функция при последовательном соединении:



$$W(p)^{\text{посл.}} = \frac{\cancel{X(p)} \cdot W(p)_1 \cdot W(p)_2}{\cancel{X(p)}}$$

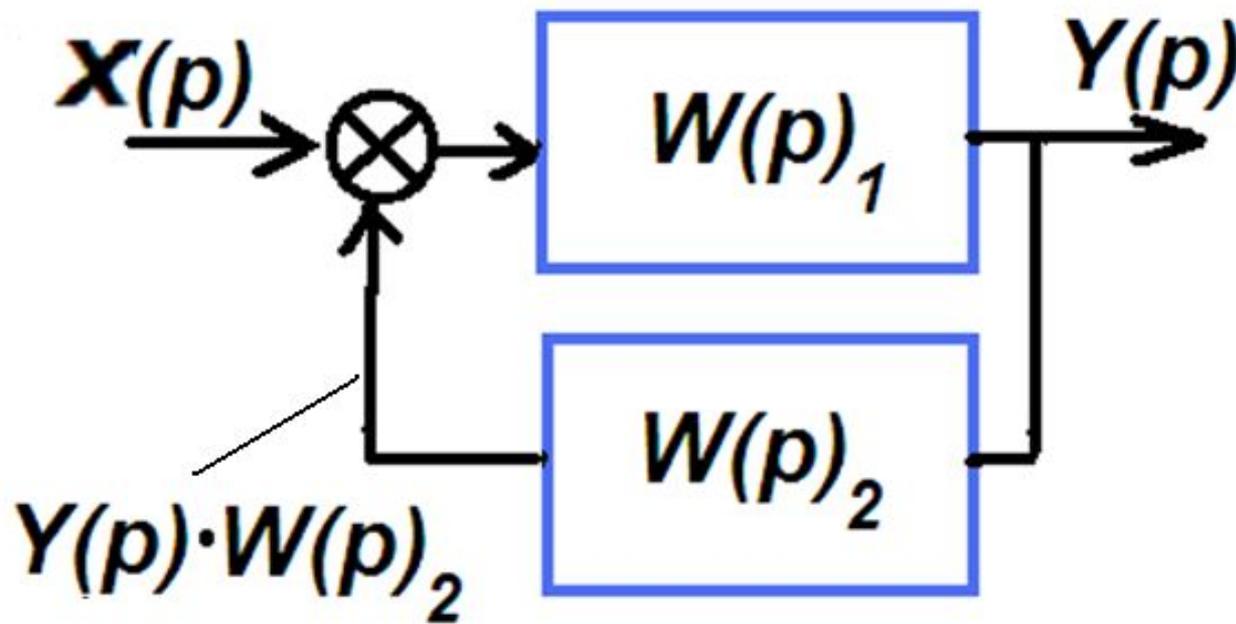
$$W(p)^{\text{посл.}} = \prod_{i=1}^n W(p)_i$$

Передаточная функция при параллельном соединении:



$$W(p)^{\text{пар.}} = \sum_{i=1}^n W(p)_i$$

Передаточная функция при встречно-параллельном соединении:



$$Y(p) = W(p)_1 \cdot \{X(p) + Y(p) \cdot W(p)_2\}$$

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

$$W(p) \stackrel{\text{обр.св.}}{=} \frac{W(p)_1 \cdot \{X(p) + Y(p) \cdot W(p)_2\}}{X(p)}$$

$$W(p) \stackrel{\text{обр.св.}}{=} W(p)_1 \cdot \left\{ \frac{\cancel{X(p)}}{\cancel{X(p)}} + \frac{Y(p)}{X(p)} \cdot W(p)_2 \right\}$$

$\stackrel{\text{обр.св.}}{W(p)}$

$$W(p) \stackrel{\text{обр.св.}}{=} \frac{W(p)_1}{1 + W(p)_1 \cdot W(p)_2}$$

# Законы автоматического регулирования

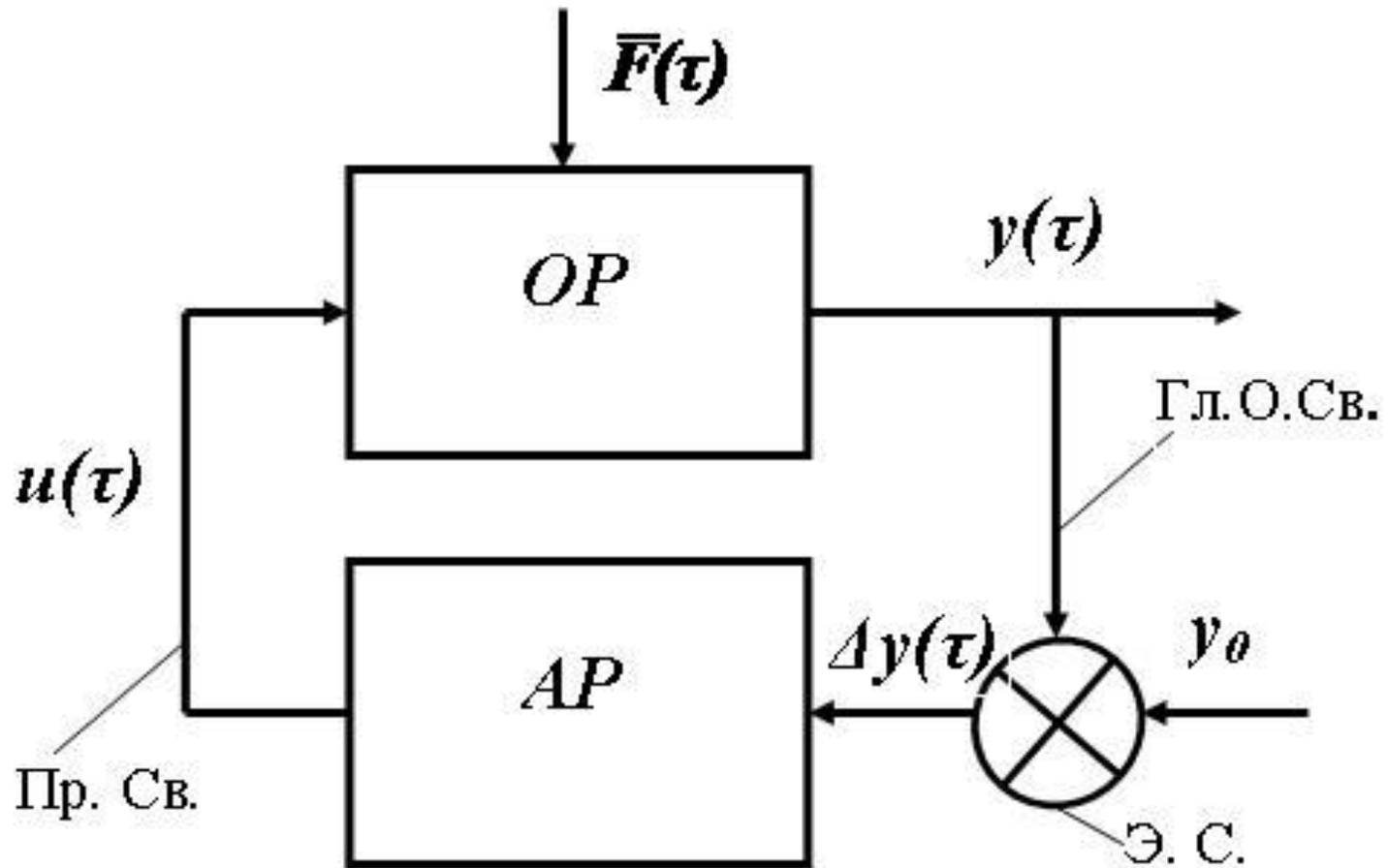
**Законом регулирования** называют функциональную связь между регулирующим воздействием и отклонением регулируемого параметра от заданного значения:

$$u(\tau) = f \Delta y(\tau) ,$$

где  $u(\tau)$  - регулирующее воздействие ;  
 $\Delta y(\tau)$  – рассогласование.

**Закон регулирования** - это основная характеристика регулятора, определяет способ формирования регулирующего воздействия. Выбор регулятора производится в зависимости от свойств объекта, условий его работы и требуемых показателей качества регулирования.

# Схема системы автоматического регулирования



# В практике автоматического регулирования используются следующие законы регулирования:

- Позиционные (2-х и 3-х) **(Поз)**
- Пропорциональный **(П)**
- Интегральный **(И)**
- Пропорционально-интегральный **(ПИ)**
- Пропорционально-дифференциальный **(ПД)**
- Пропорционально-интегрально-дифференциальный **(ПИД)**

От правильного выбора **закона регулирования и параметров настройки регулятора** зависит качество автоматического регулирования и работоспособность АСР.

# Позиционное регулирование

Простейшим способом регулирования является **позиционный**, при котором регулятор в зависимости от текущего значения регулируемого параметра переключает регулирующее воздействие с одного **фиксированного уровня** на другой.

В практике используют **двух-** и **трехпозиционное** регулирование, при которых таких **уровней**, соответственно, **два** или **три**.

# Двухпозиционное регулирование

- Математическая формулировка идеального (без зоны нечувствительности) двухпозиционного закона регулирования имеет вид:

$$u(\tau) = U_1 \quad \text{при} \quad \Delta y(\tau) \leq 0$$

$$u(\tau) = U_2 \quad \text{при} \quad \Delta y(\tau) > 0$$

- Например,  $U_1 = 1$  т.е. «Вкл / Выкл»

$$U_2 = 0$$



# Двухпозиционное

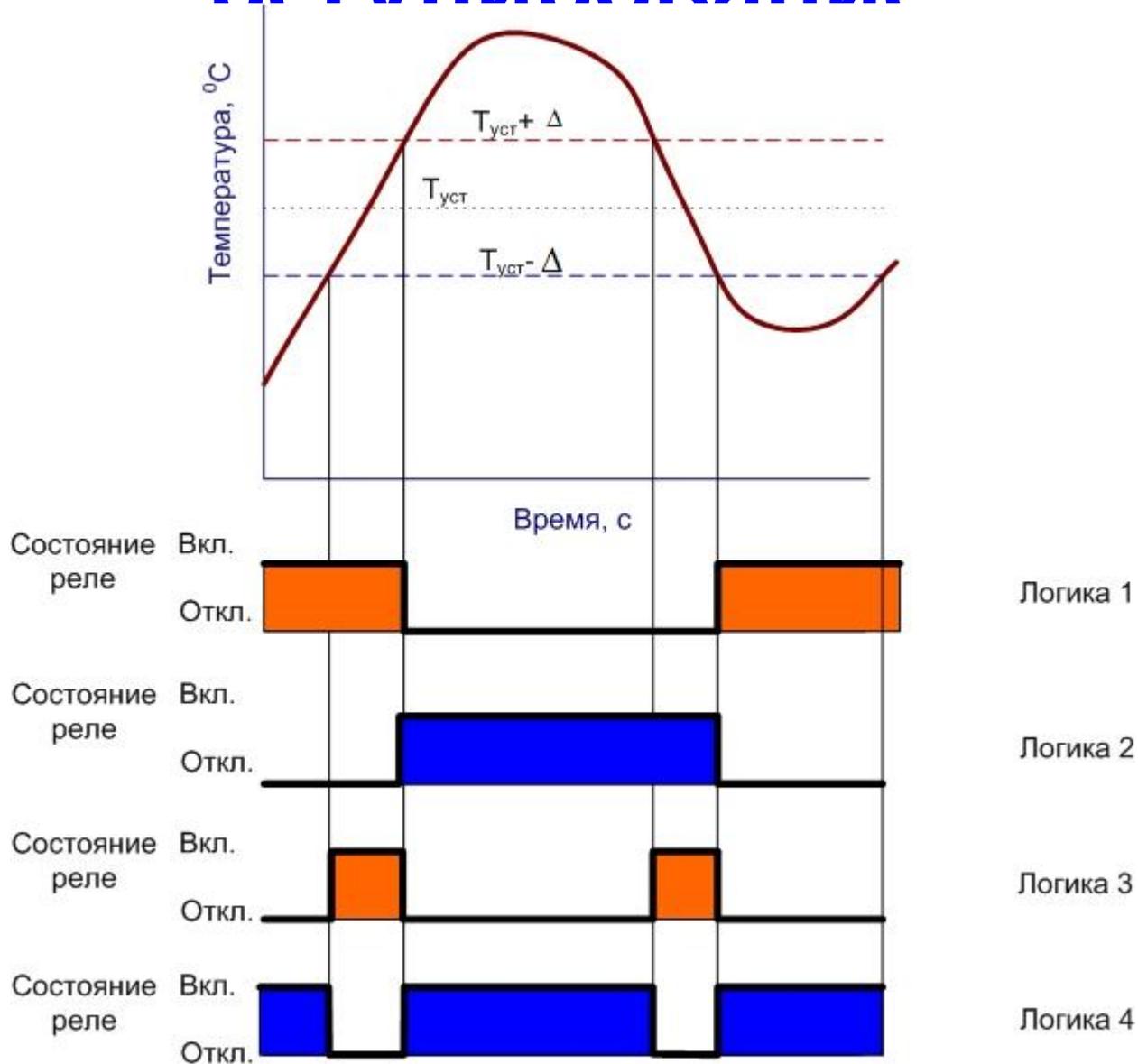
## регулирование

В режиме **двухпозиционного регулятора** (компаратора) его логическое устройство сравнивает значение входной величины с уставками и выдает управляющий сигнал на выходное устройство в соответствии с заданной логикой.

**Выходной сигнал** двухпозиционного регулятора может иметь только два значения: **максимальное и минимальное**. Одно из них включает, а другое выключает выходное устройство.

Поэтому для работы логического устройства в режиме двухпозиционного регулятора требуется выходное устройство ключевого типа **(электромагнитное реле, транзисторная оптопара, оптосимистор, выход для управления внешним твердотельным реле)**.

# Двухпозиционное регулирование



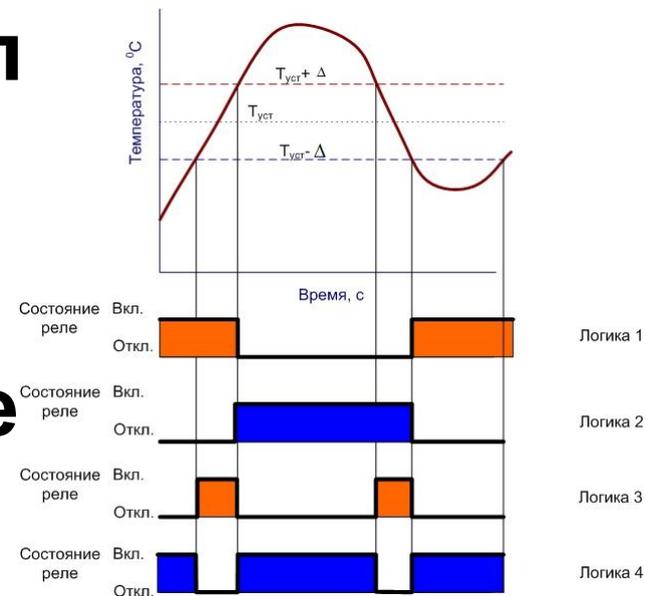
# Двухпозиционное регулирование

Тип логики двухпозиционного регулятора может быть различным. Прямой гистерезис (логика 1) применяют для управления работой нагревателя. Включение реле в этом случае происходит при усл

$$T < T_{уст} - \Delta$$

а выключение – в случае

$$T > T_{уст} + \Delta$$



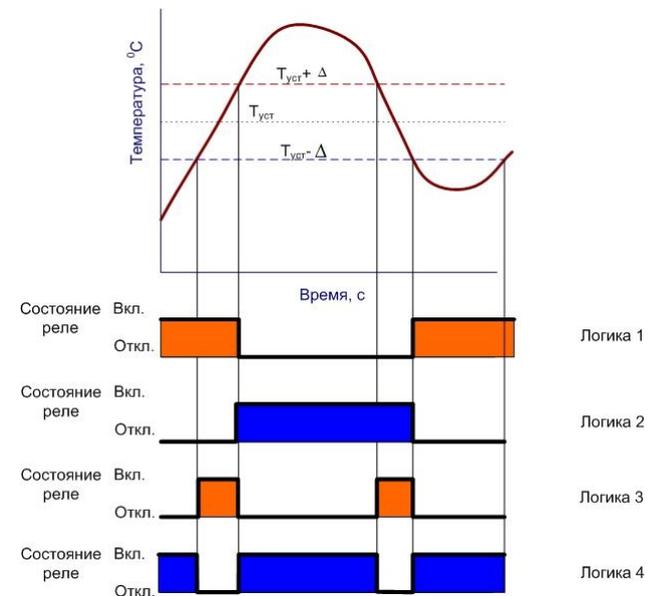
# Двухпозиционное регулирование

При обратном гистерезисе (логика 2)  
объект при включении реле должен  
охлаждаться. Включается реле при  
соблюдении условия

$$T > T_{уст} + \Delta$$

и выключается, когда

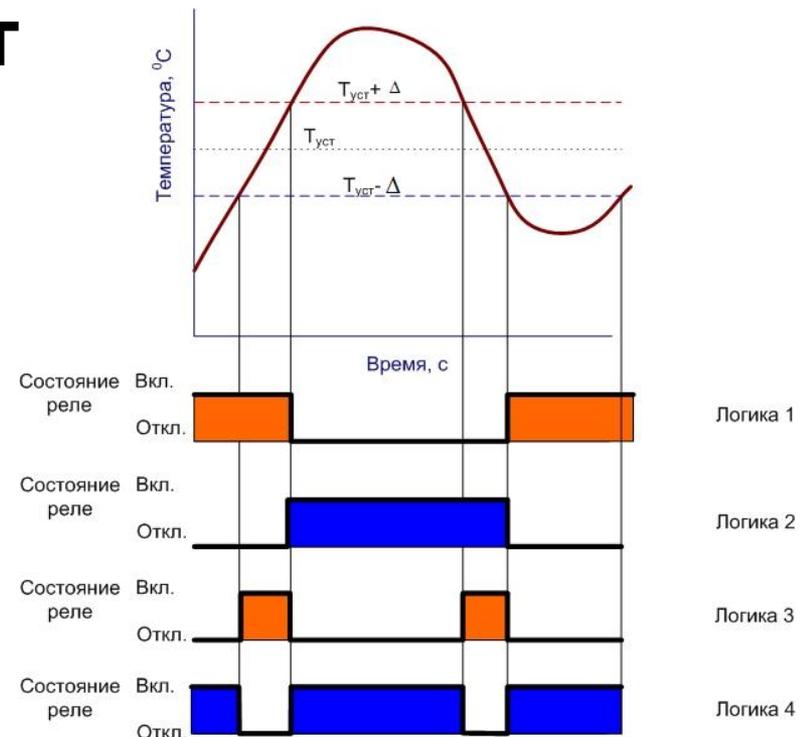
$$T < T_{уст} - \Delta$$



# Двухпозиционное регулирование

Логика 3 (П-образная) может быть применена для сигнализации о входе контролируемой величины в заданный диапазон; включение выходного устройства происходит

$$T_{уст} - \Delta < T < T_{уст} + \Delta$$

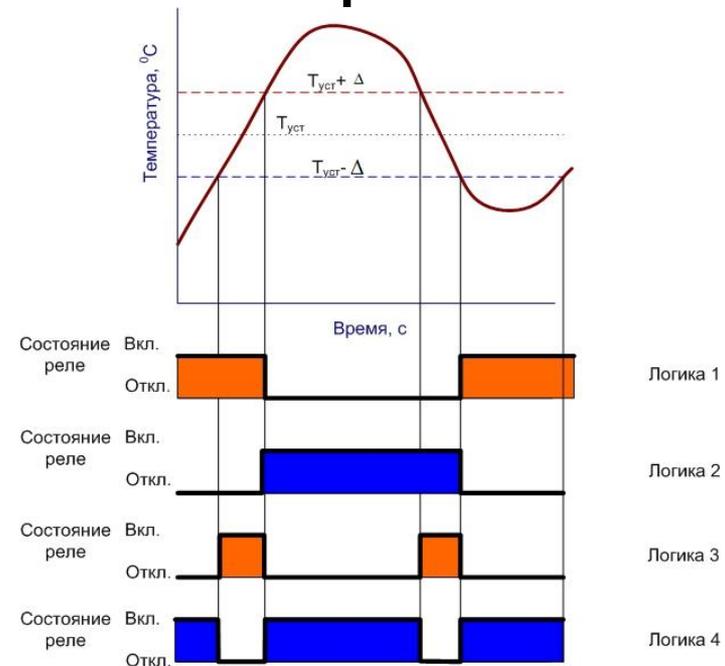


# Двухпозиционное регулирование

U-образную логику применяют в случае, когда прибор используют для сигнализации о выходе контролируемой величины за заданные границы. При этом выходное устройство включается при

условии  $T > T_{уст} + \Delta$

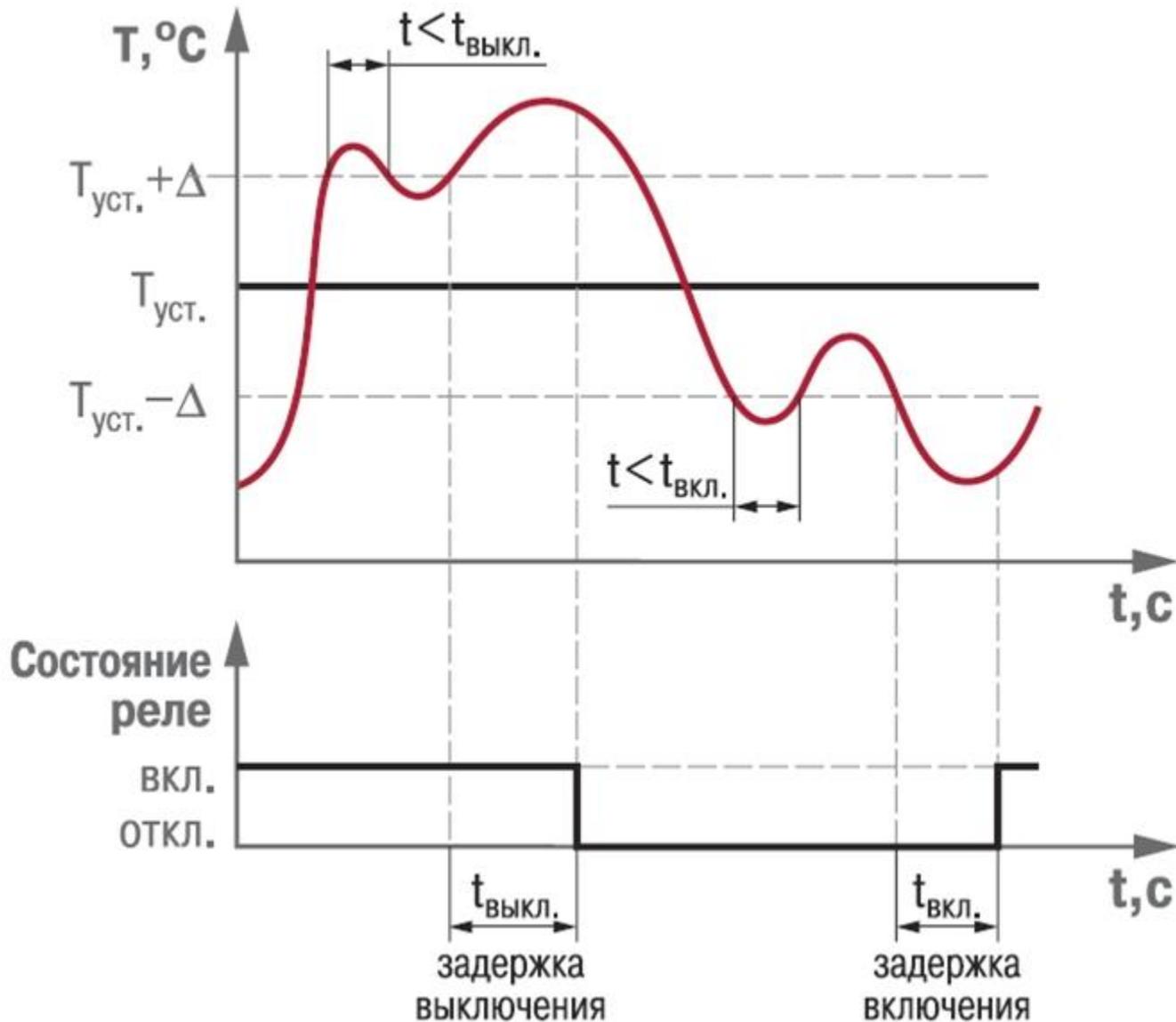
и  $T < T_{уст} - \Delta$

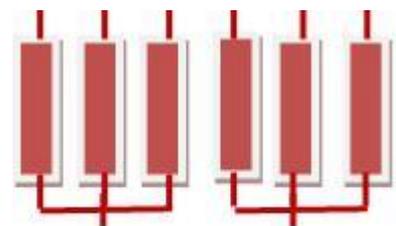
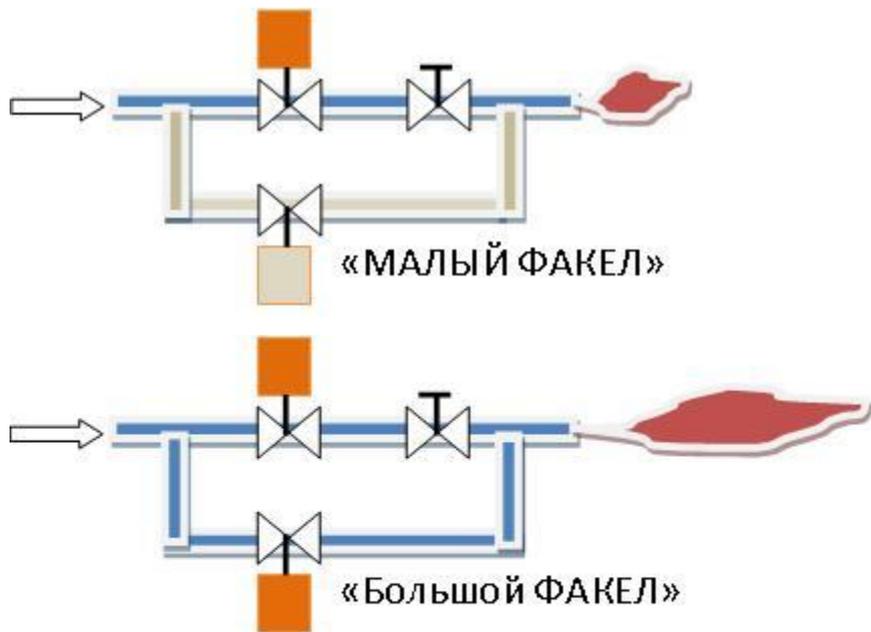


# Двухпозиционное регулирование

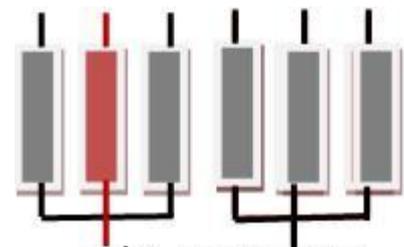
Для **защиты** выходного устройства от частых срабатываний при работе логического устройства в режиме компаратора во многих приборах имеются параметры для установки времени задержки включения  $t_{\text{вкл}}$  и времени задержки выключения  $t_{\text{выкл}}$  выходного устройства. **Логическое устройство** включает (выключает) выходное устройство, если условие, вызывающее изменение состояния, сохраняется как минимум в течение времени,

# Двухпозиционное регулирование



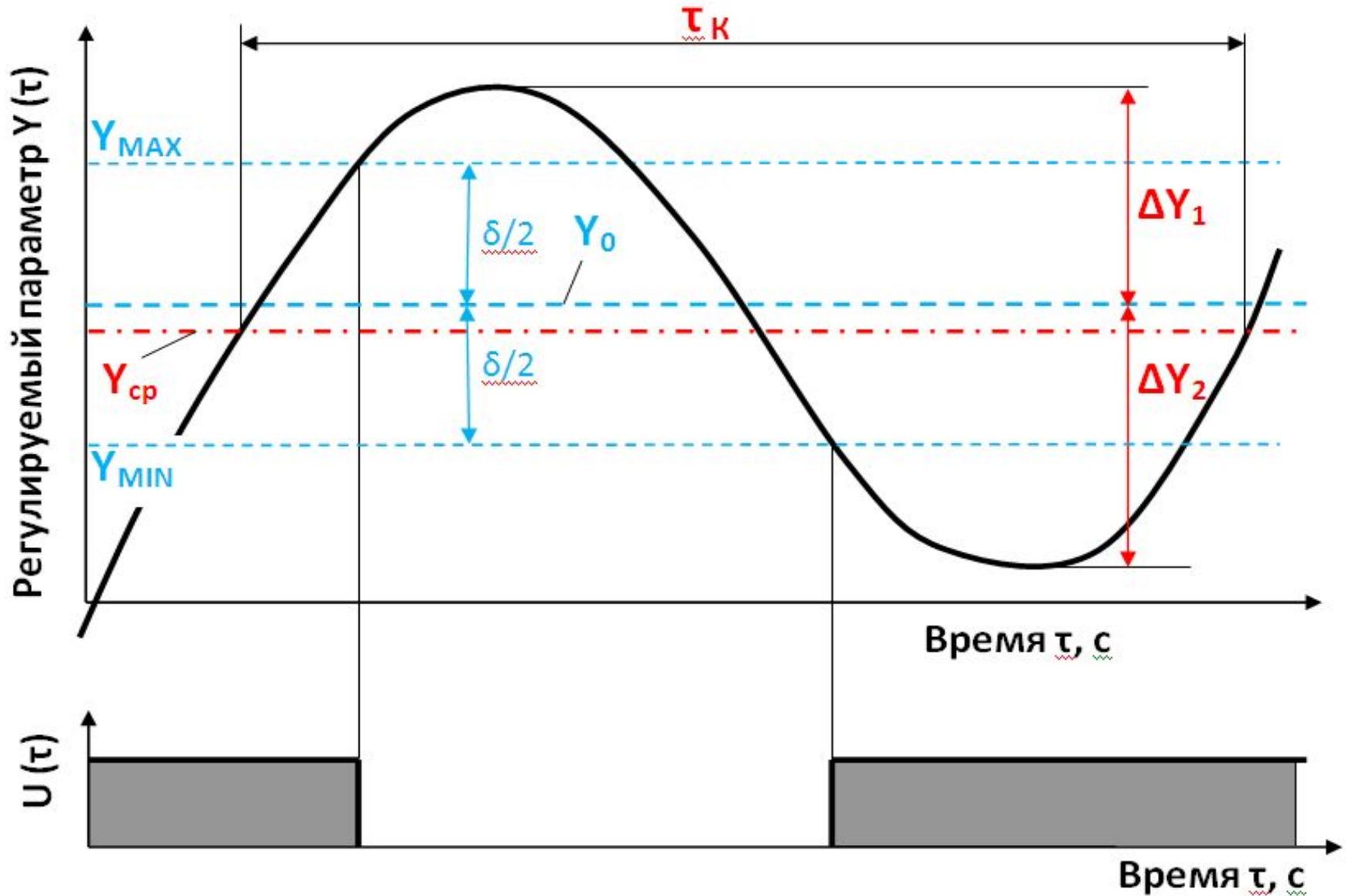


Полная мощность



1 / 6 мощности

# Двухпозиционное регулирование



# Параметры настройки двухпозиционного регулятора

- **уставка**  $y_0$  (заданное значение регулируемого параметра)
- **уровни регулирующего воздействия**  $U_{\text{МАКС}}$  (вкл.; 1),  $U_{\text{МИН}}$  (выкл.; 0)
- **зона нечувствительности**  $\delta$   
(зона нечувствительности)

# Показатели качества

## регулирования

Качество двухпозиционного  
регулирования характеризуется

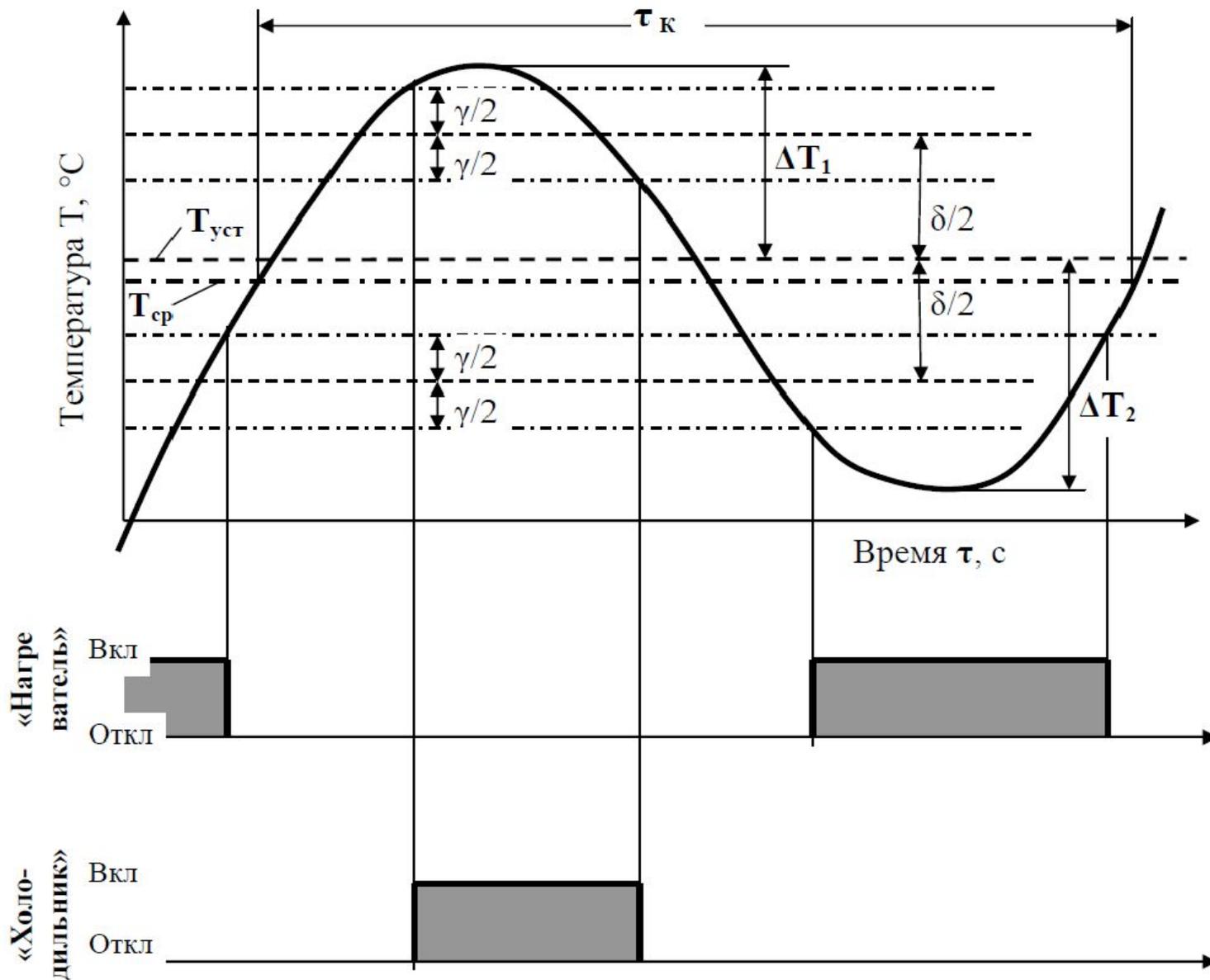
- периодом колебаний  $T_K$
- амплитудой  $A$   $A = (\Delta y_1 + \Delta y_2)/2$
- условной статической ошибкой  
регулирования  $\Delta y_{ст}$   $\Delta y_{ст} = y_{ср} - y_0$

# Трехпозиционное регулирование

При **трехпозиционном** регулировании используют обычно **два выходных реле регулятора**. Три уровня воздействия на объект регулирования формируют путем включения одного или другого реле и выключением их обоих. Процесс трехпозиционного регулирования проходит таким образом, что **одно** из выходных реле управляет **«нагревателем»**, а **второе** - **«холодильником»**.

# Трехпозиционное

## регулирование



# Трехпозиционное регулирование

Параметрами настройки  
трехпозиционного регулятора  
являются:

- **уставка** (на рисунке –  $T_{уст}$ );
- **уровни регулирующего воздействия**  
( $U_{МАКС}$  – включен нагреватель,  $U_{СР}$  – все  
выключено,  $U_{МИН}$  – включен  
холодильник);
- **зона нечувствительности  $\delta$** ;
- **гистерезис  $\gamma$** .

# Трёхпозиционное регулирование

Качество позиционного регулирования характеризуется **периодом колебаний  $T_K$** , **амплитудой  $A$** , и **условной статической ошибкой регулирования  $\Delta T_{ст}$** .

**Амплитуду колебаний** можно определить как среднее арифметическое максимальных отклонений регулируемого параметра от уставки в большую и меньшую стороны:

$$A = (\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2.$$

**Условная статическая ошибка** определяется как разность между фактическим средним значением регулируемого параметра и уставкой регулирования:

$$\Delta T_{ст} = T_{ср} - T_{уст}$$

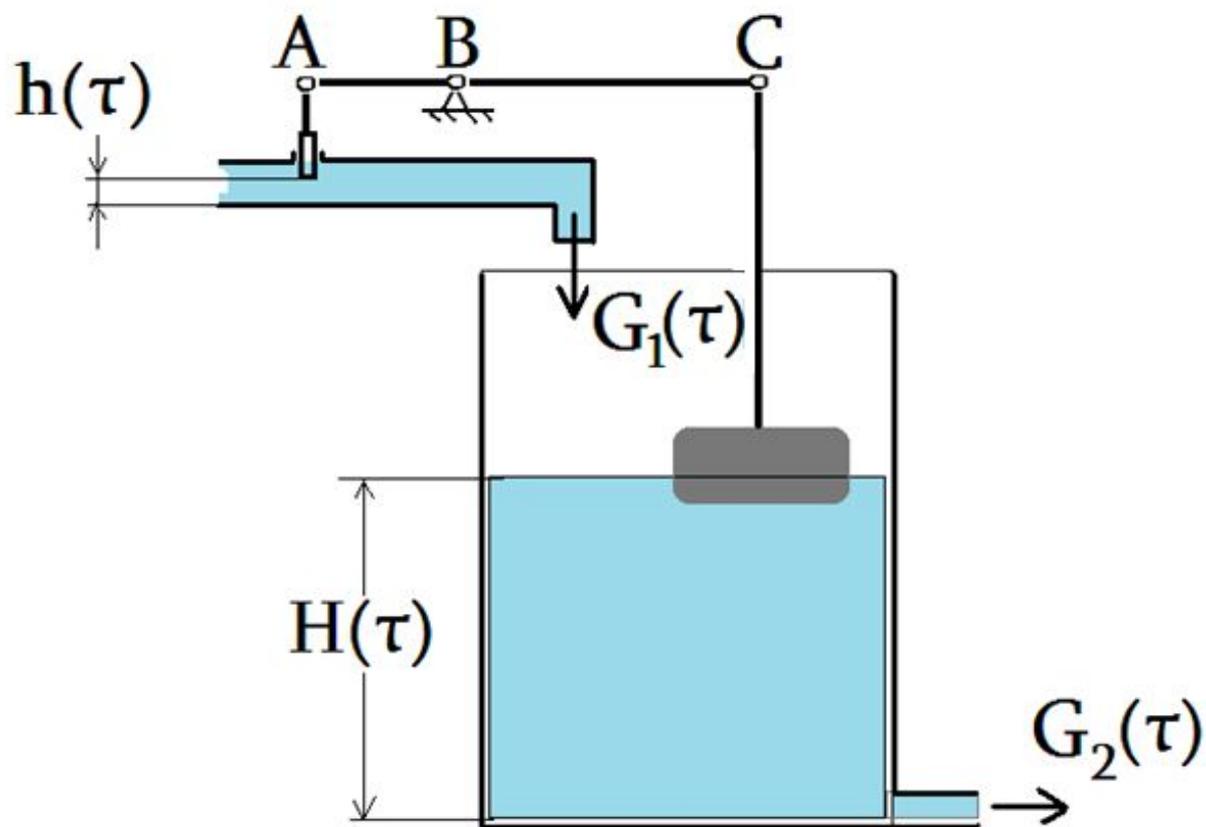
# Пропорциональный закон регулирования

При **пропорциональном** законе регулирующее воздействие прямо пропорционально отклонению параметра от заданного значения

$$u(\tau) = K_p \cdot \Delta y(\tau)$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи регулятора, является параметром его настройки.

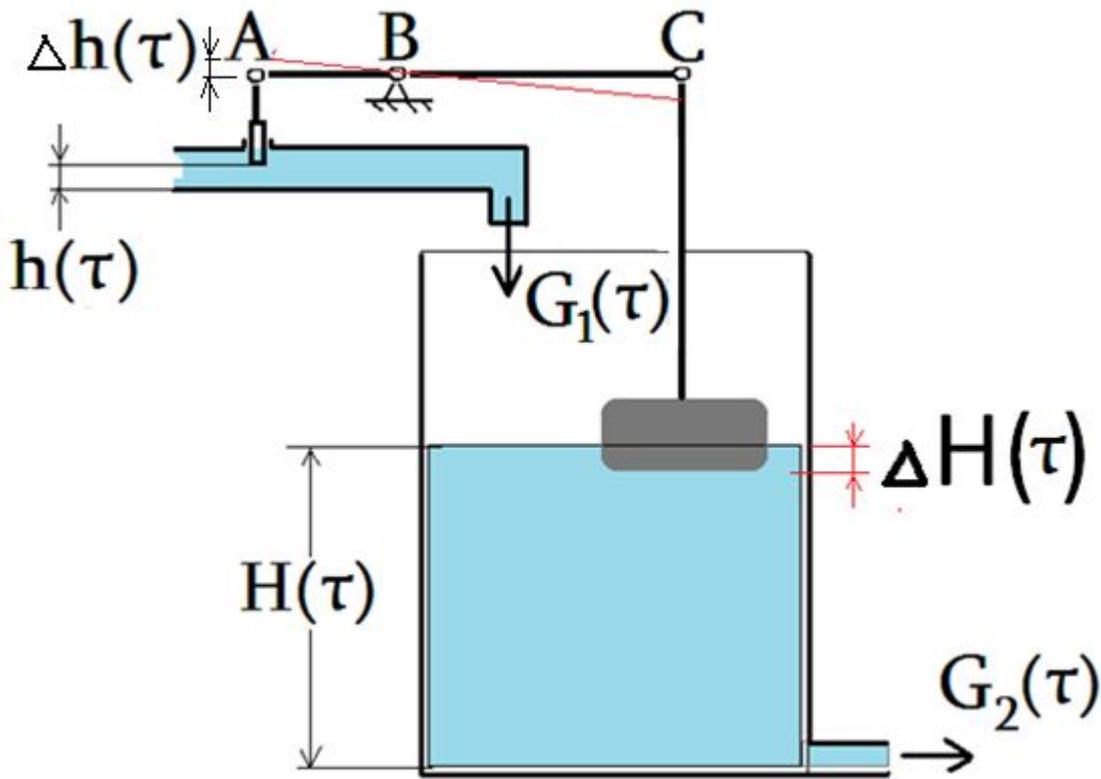
# Рис. 2.12 Пример пропорционального регулятора



$$G_1(\tau) = k \cdot h(\tau)$$

$$1) \quad G'_1 = G'_2$$
$$H(\tau) = H_0$$

# Динамика переходного процесса



$$2) \quad G_2(\tau) \uparrow = G''$$

$$H(\tau) \downarrow \rightarrow \Delta H(\tau)$$

$$\Delta h(\tau) = \frac{AB}{BC} \cdot \Delta H(\tau)$$

$$\Delta G_1(\tau) = k \cdot \frac{AB}{BC} \cdot \Delta H(\tau)$$

$$u(\tau) = K_p \cdot \Delta y(\tau)$$

Для работы П-регулятора характерно:

- **Наличие статической ошибки регулирования** ( $\Delta u_{ст} > 0$ )
- Обеспечивает наиболее быструю стабилизацию регулируемого параметра, - **время регулирования** меньше, чем у других регуляторов ( $\tau_p$  - минимальное)
- **Максимальное динамическое отклонение  $\Delta u_1$**  - меньше только, чем у интегрального регулятора

- При **интегральном** законе регулирующее воздействие прямо пропорционально интегралу рассогласования по времени
- $$u(\tau) = 1 / T_{\text{И}} \cdot \int \Delta y(\tau) d\tau \quad (2.8)$$
- где  $T_{\text{И}}$  – **постоянная времени интегрирования** (параметр настройки регулятора); часто величину  $1 / T_{\text{И}}$  в формуле (2.8) заменяют на  $K_{\text{Р}}$  по аналогии с формулой (2.7).

Для работы И-регулятора характерно :

- **Отсутствие статической ошибки регулирования** ( $\Delta u_{ст} = 0$ )
- **Время регулирования** больше, чем у всех других регуляторов ( $\tau_p$  - максимальное)
- **Максимальное динамическое отклонение**  $\Delta u_1$  больше, чем у всех других регуляторов

# 4) Пропорционально-интегральный и пропорционально-интегрально-дифференциальный законы регулирования

- Пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования является комбинацией П- и И-законов
- $u(\tau) = K_p \cdot [ \Delta y(\tau) + 1 / T_I \cdot \int \Delta y(\tau) d\tau ] \quad (2.9)$

- ПИ-регулятор имеет два параметра настройки:

***$K_p$  - коэффициент передачи регулятора***

***$T_i$  - время изотрома или время удвоения).***

- Обеспечивает более высокое качество

- Для работы ПИ-регулятора характерно:
- **Отсутствие статической ошибки регулирования** ( $\Delta u_{ст} = 0$ )
- **Время регулирования**  $\tau_r$  меньше, чем у интегрального
- **Максимальное динамическое отклонение**  $\Delta u_1$  меньше, чем у пропорционального и интегрального

- Наиболее сложным законом регулирования является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД), который описывается выражением

$$u(\tau) = K_p \cdot [ \Delta y(\tau) + 1 / T_I \cdot \int \Delta y(\tau) d\tau + T_D \cdot d(\Delta y(\tau)) / d\tau ] \quad (2.10)$$

- где  $T_D$  – **постоянная времени дифференцирования или время предварения.**

- ПИД-регулятор имеет три параметра настройки:

**$K_p$  - коэффициент передачи регулятора**

**$T_i$  - время изодома или время удвоения)**

**$T_d$  - постоянная времени дифференцирования**

Для работы ПИД-регулятора характерно:

- **Отсутствие статической ошибки регулирования** ( $\Delta u_{ст} = 0$ )
- **Время регулирования**  $\tau_p$  меньше, чем у интегрального и ПИ
- **Максимальное динамическое отклонение**  $\Delta u_1$  меньше, чем у всех остальных
- Применяется на наиболее «трудных» объектах и там, где требуется обеспечить высочайшее качество

# Передаточные функции регуляторов:

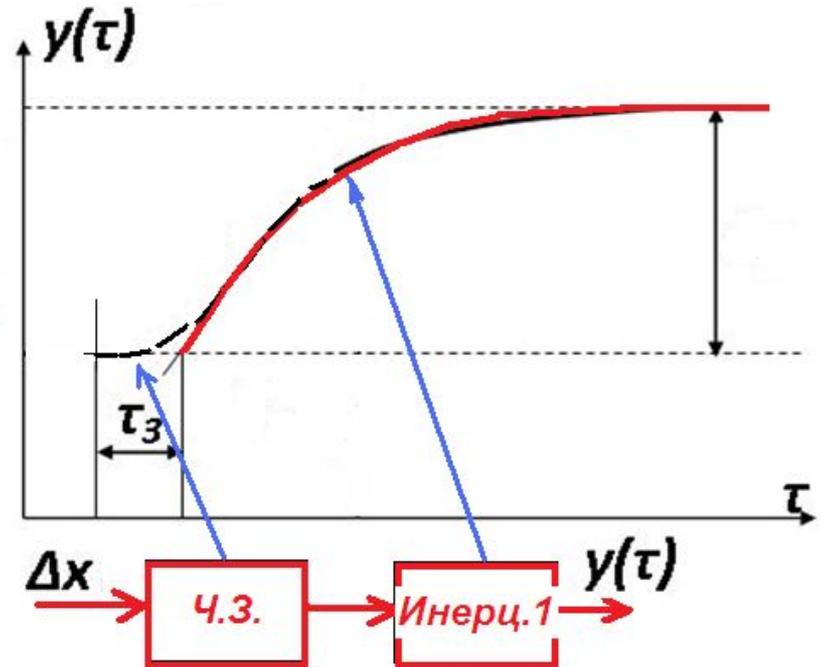
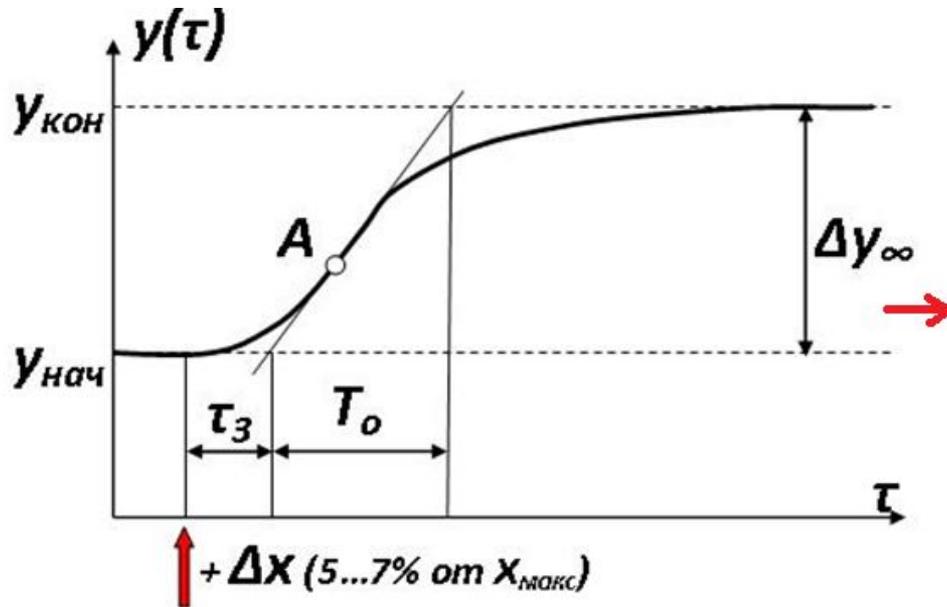
$$W(p)^{\text{п}} = K_p$$

$$W(p)^{\text{и}} = \frac{1}{T_i \cdot p}$$

$$W(p)^{\text{пи}} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$

$$W(p)^{\text{пид}} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p \right)$$

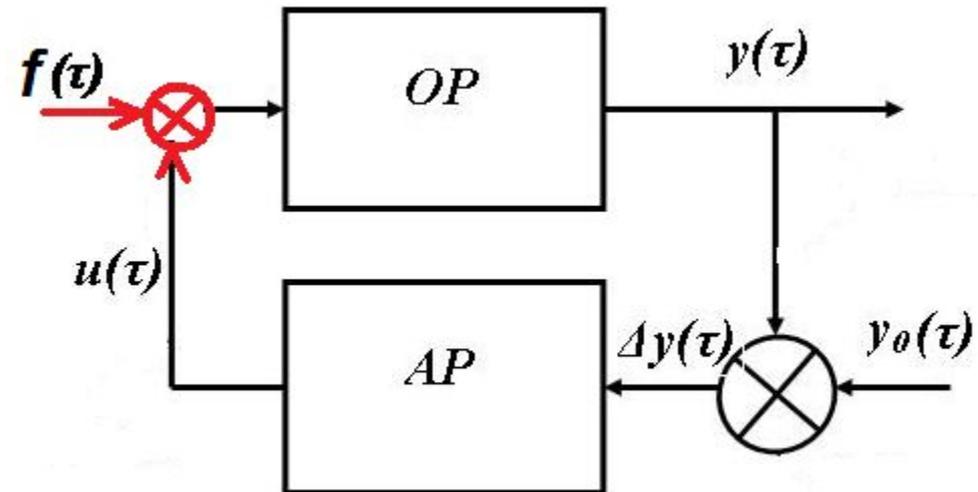
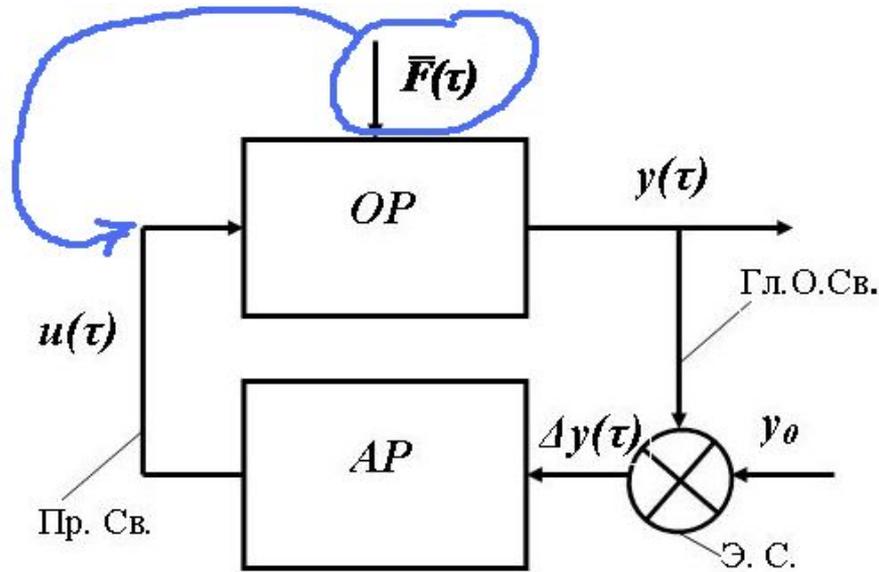
# Передаточная функция объекта регулирования:



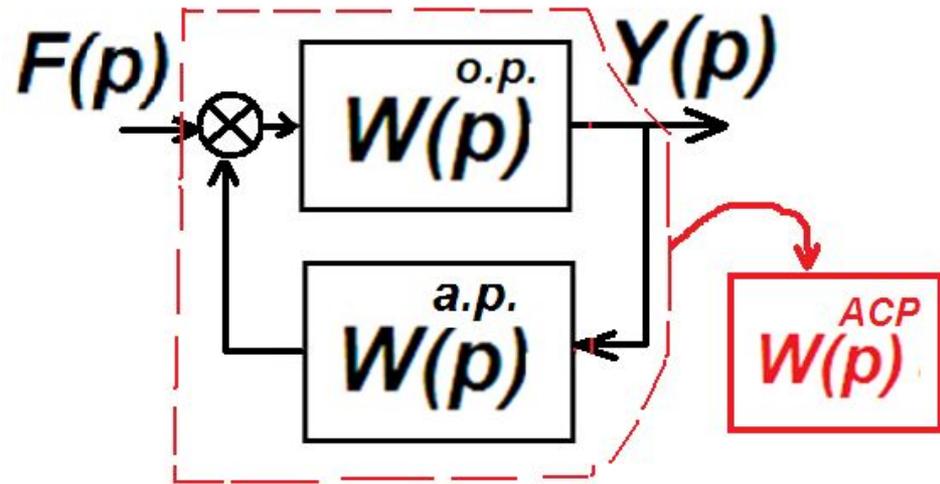
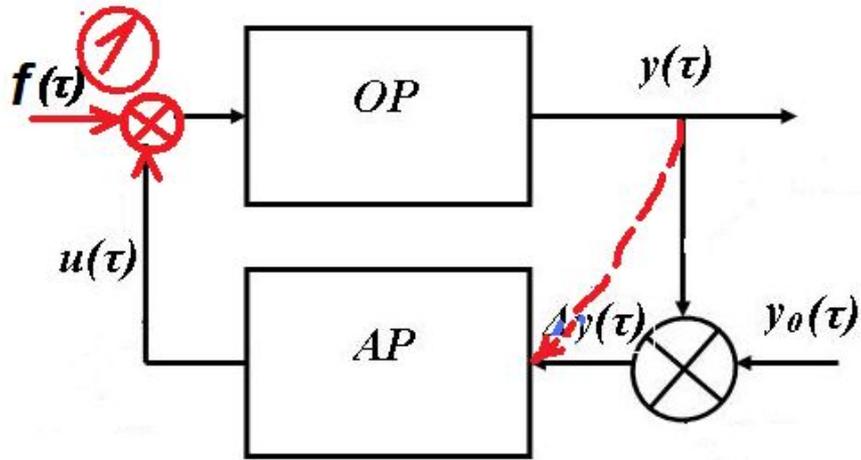
$$W(p) = W^{o.p.}(p) \cdot W^{ч.з.}(p) \cdot W^{ин.1}(p)$$

$$W(p) = \frac{K_0}{T_0 p + 1} \cdot e^{-p\tau_з}$$

# Передаточная функция АСР

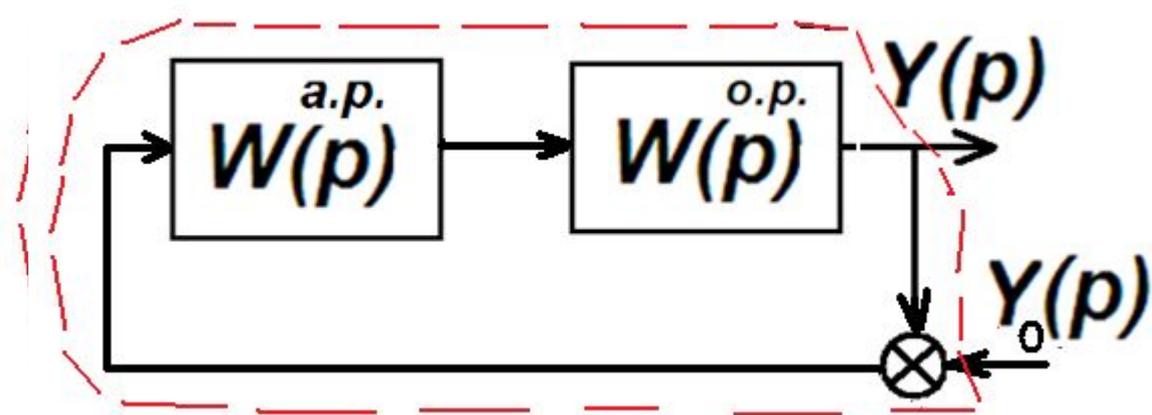
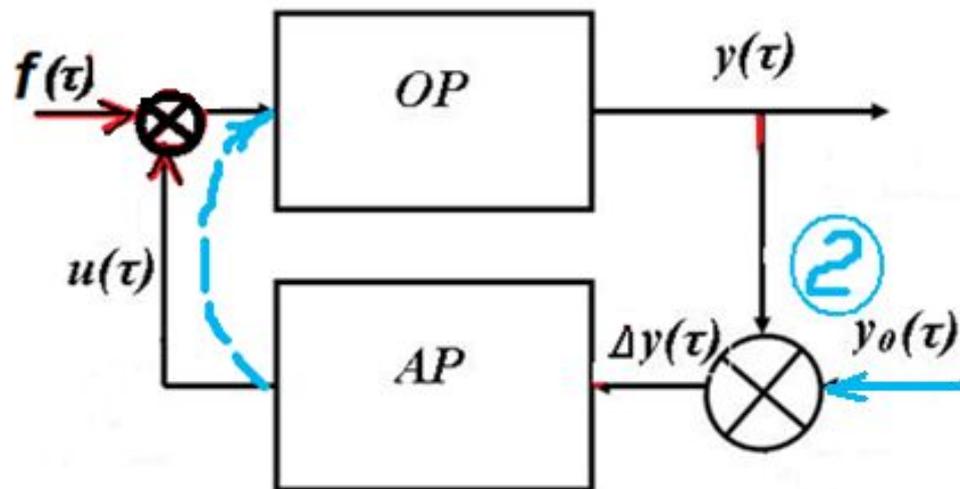


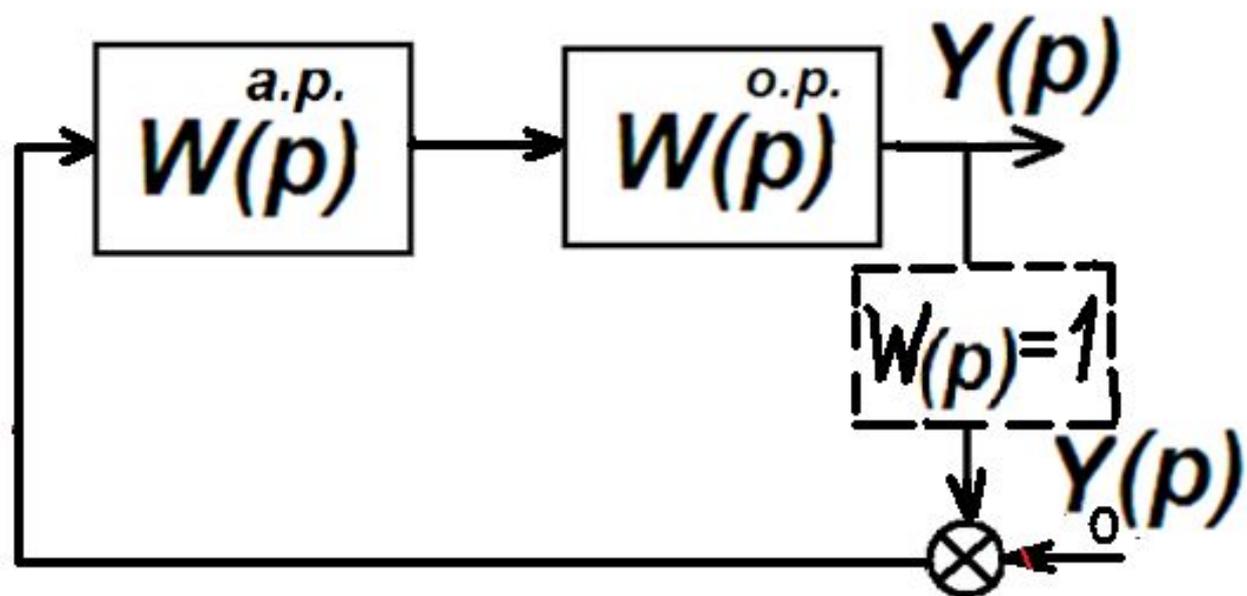
# Режим стабилизации:



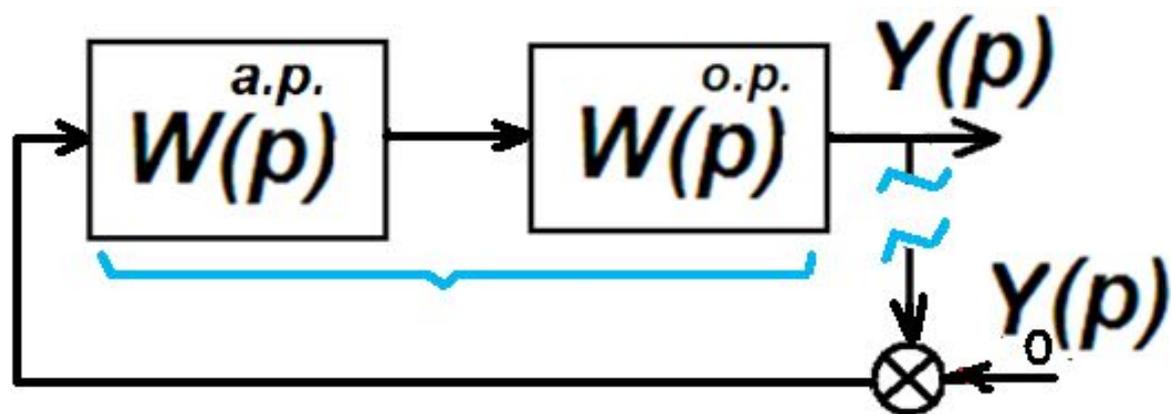
$$W(p)_{cm}^{ACP} = \frac{W(p)_{1}^{o.p.}}{1 + W(p)^{o.p.} \cdot W(p)^{a.p.}}$$

# Режим слежения:





$$W(p)_{\text{АСР сл}} = \frac{W(p)_{\text{o.p.}} \cdot W(p)_{\text{a.p.}}}{1 + W(p)_{\text{o.p.}} \cdot W(p)_{\text{a.p.}}}$$



*передаточная функция  
условно разомкнутой АСР*

$$W(p)_{\text{раз}}^{\text{АСР}} = W(p)^{\text{a.p.}} \cdot W(p)^{\text{o.p.}}$$

# 5) Автоматические регуляторы и микропроцессорные контроллеры

- **Автоматический регулятор** – прибор, выполняющий автоматическое регулирование какого-либо технологического параметра (температуры, давления, уровня ...)
- Автоматические регуляторы классифицируются по назначению, виду используемой энергии, характеру изменения регулирующего воздействия, принципу действия, конструктивным особенностям и т.

## а) По функциональному назначению:

- *специализированные* – для регулирования какого-либо одного параметра



- *универсальные* – для регулирования различных параметров;



## **б) По виду используемой энергии :**

- *электрические,*
- *пневматические,*
- *гидравлические,*
- *без использования специального источника энергии* - регуляторы прямого действия

Регуляторы прямого действия для процесса управления используют энергию самого объекта управления .

Примером таких регуляторов являются механические регуляторы давления, ТРВ ...

## **в) По характеру изменения регулирующего воздействия :**

- *непрерывного действия,*
- *дискретного действия.*

Дискретные регуляторы подразделяются на релейные (позиционные), цифровые и импульсные.

## **г) По закону регулирования :**

- *двухпозиционные и трехпозиционные,*
- *пропорциональные,*
- *интегральные,*
- *пропорционально-интегральные,*
- *пропорционально-дифференциальные,*
- *пропорционально-интегрально-дифференциальные.*

- **Микропроцессорный контроллер (МК)– программно управляемое** средство обработки информации, предназначенное для управления какими-либо технологическими объектами.
- **Программируемые логические контроллеры (ПЛК)** – это промышленные мини-компьютеры, которые сканируют сигналы от датчиков, обрабатывают их в соответствии с хранимой программой и генерируют выходные сигналы для управления технологическими процессами, а также осуществляют связь с другими