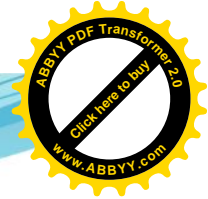
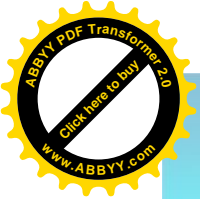


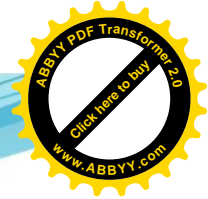
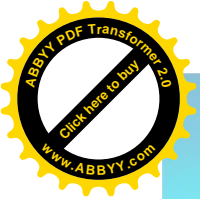
# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Введение



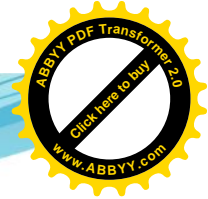
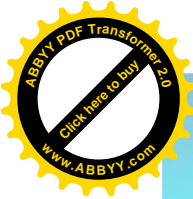
# При автоматизации

- повышается производительность труда
- улучшается качество получаемой продукции
- уменьшаются энергетические и сырьевые затраты
- улучшаются условия труда
- обеспечиваются безопасные условия работы



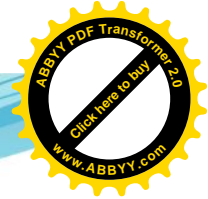
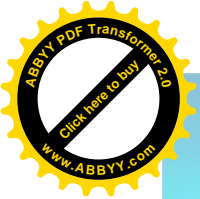
## Особое значение придается вопросам автоматизации процессов химической технологии в связи:

- с взрыво- и пожароопасностью перерабатываемых веществ
- с агрессивностью и токсичностью перерабатываемых веществ
- с необходимостью предотвращения вредных выбросов в окружающую среду
- с высокой чувствительностью к нарушениям заданного режима
- с наличием большого числа параметров контроля и управления процессом
- с необходимостью своевременного и соответствующего воздействия на процесс



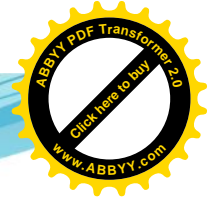
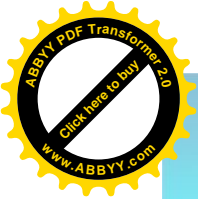
# Человек

- обладает конечной скоростью восприятия ограниченного объёма информации
- ему требуется некоторое время на её обдумывание, принятие решения и выполнение соответствующих мероприятий
- действия человека отличаются субъективностью



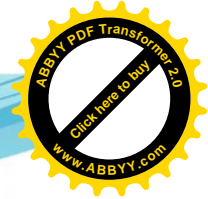
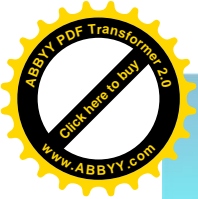
# Автоматизированные системы управления

- В настоящее время для управления все шире применяют *автоматизированные системы управления (АСУ)*. АСУ – это человеко-машинные системы
- АСУ обеспечивает автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для *оптимизации* управления
- Сбор и оперативная обработка информации, вычисление критериев, нахождение оптимальных значений управляющих воздействий в этих системах осуществляется с помощью различных технических средств и ЭВМ.



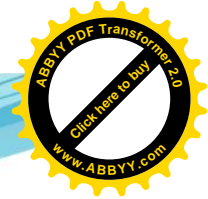
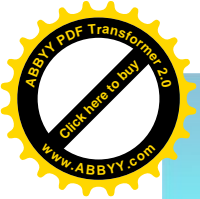
Управление химическими предприятиями посредством АСУ осуществляется по *иерархическому принципу* на трёх уровнях

- *Автоматизированная система управления предприятием (АСУП)*
- *Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП)*
- *Локальные автоматические системы*



# ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

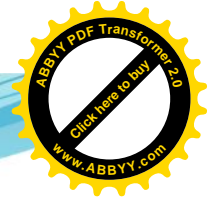
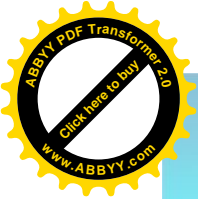
Основные понятия о АСР



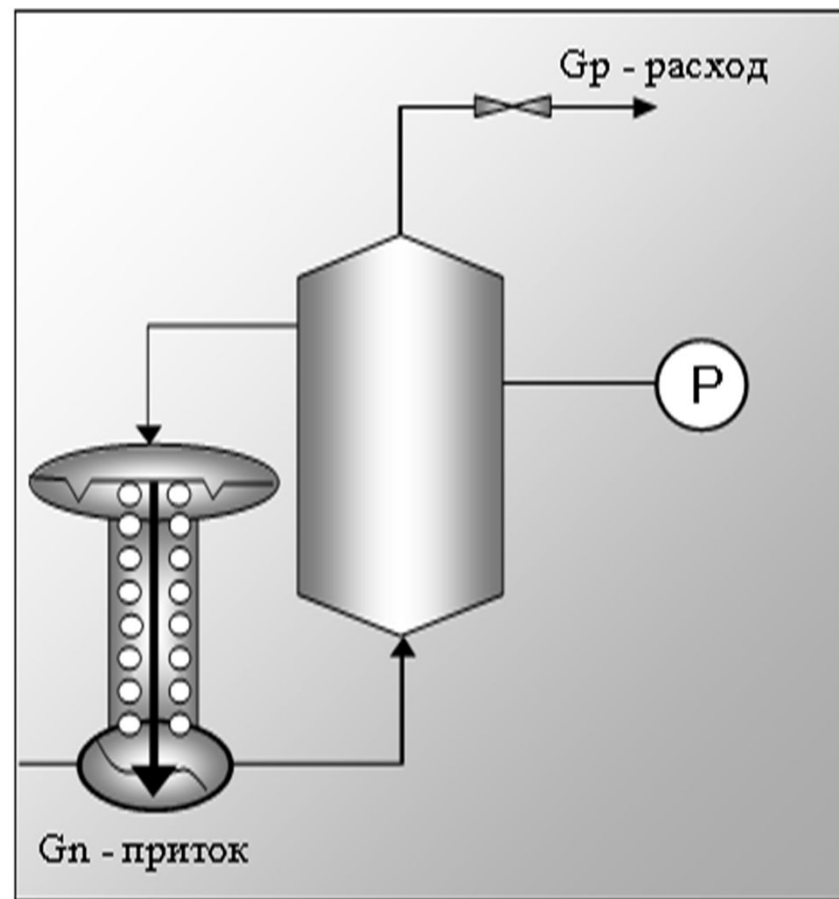
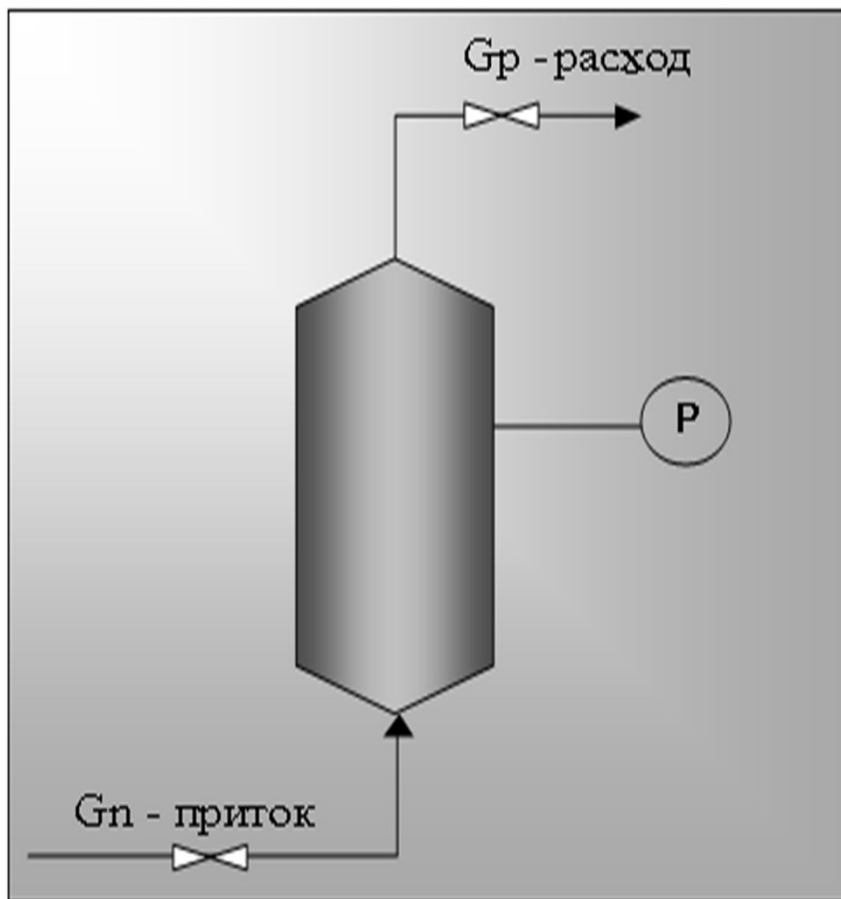
# Основные понятия о АСР

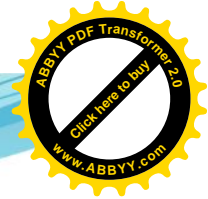
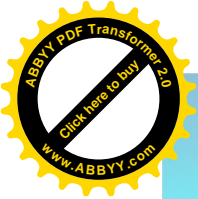
- Параметр, значение которого должно поддерживаться на заданном уровне или изменяться по заранее заданному закону, называется **регулируемым параметром (величиной)**.
- Внешние воздействия, вызывающие отклонение регулируемой величины от заданного значения, называются **возмущающими воздействиями (возмущениями)**.
- Аппарат, машина, агрегат или процесс, в котором регулируются параметры технологического режима, называются **объектом регулирования**.
- Техническое устройство, которое осуществляет автоматическое регулирование, называют **автоматическим регулятором**.
- Регулятор вместе с объектом образуют **автоматическую систему регулирования**.
- Значение регулируемой величины, которое следует поддерживать стабильным, называется **заданным значением**.
- Значение регулируемой величины в данный момент времени – **текущим значением**.
- Разность между текущим и заданным значениями называется **рассогласованием** или **отклонением**.
- Воздействие регулятора на объект с целью устранения рассогласования называется **регулирующим воздействием**.
- Устройство, при помощи которого обеспечивается регулирующее воздействие, называется **регулирующим органом**.
- Устройство, реагирующее на изменение регулируемой величины, называется **чувствительным элементом**.



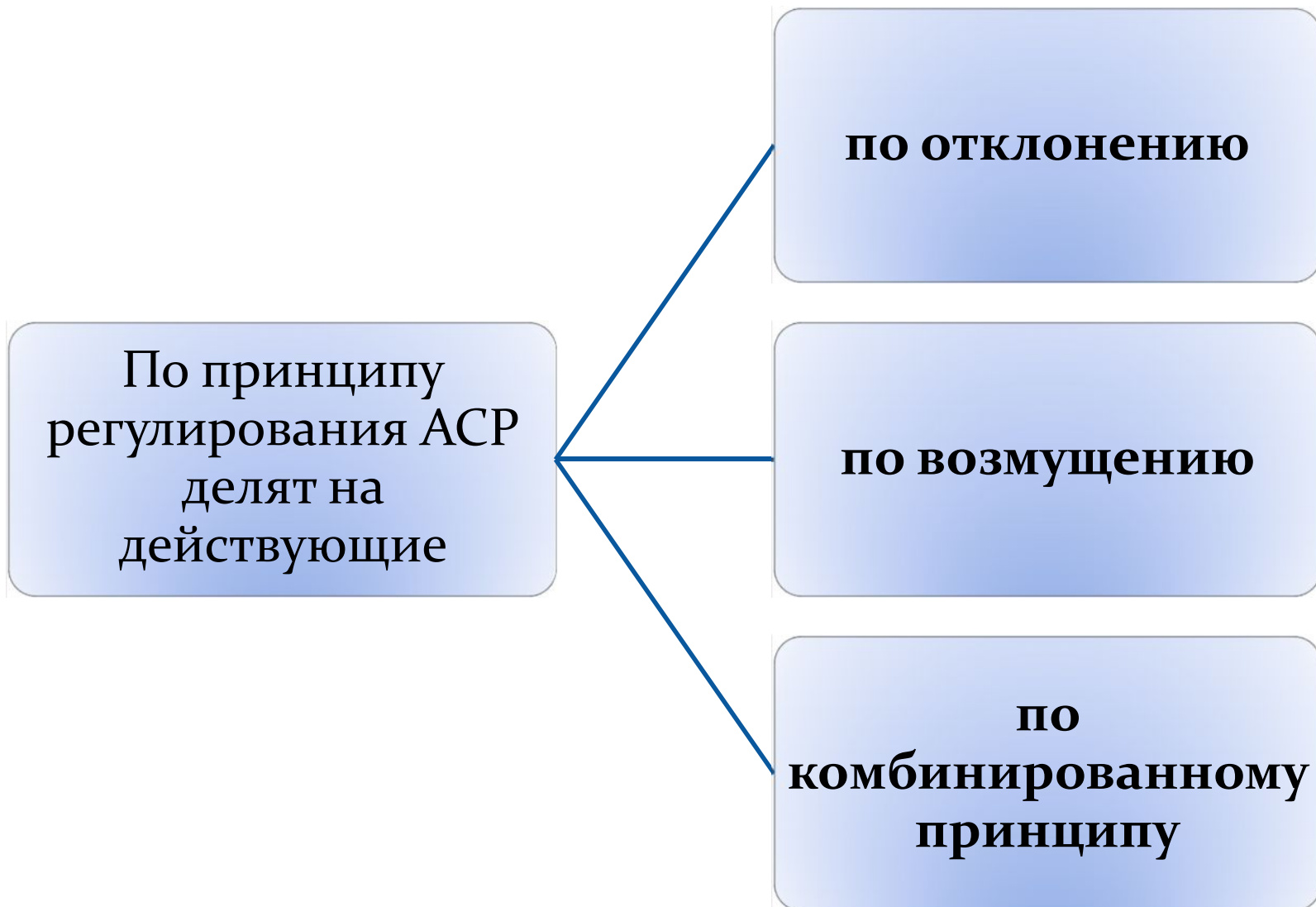


# Система регулирования давления в аккумуляторе газа

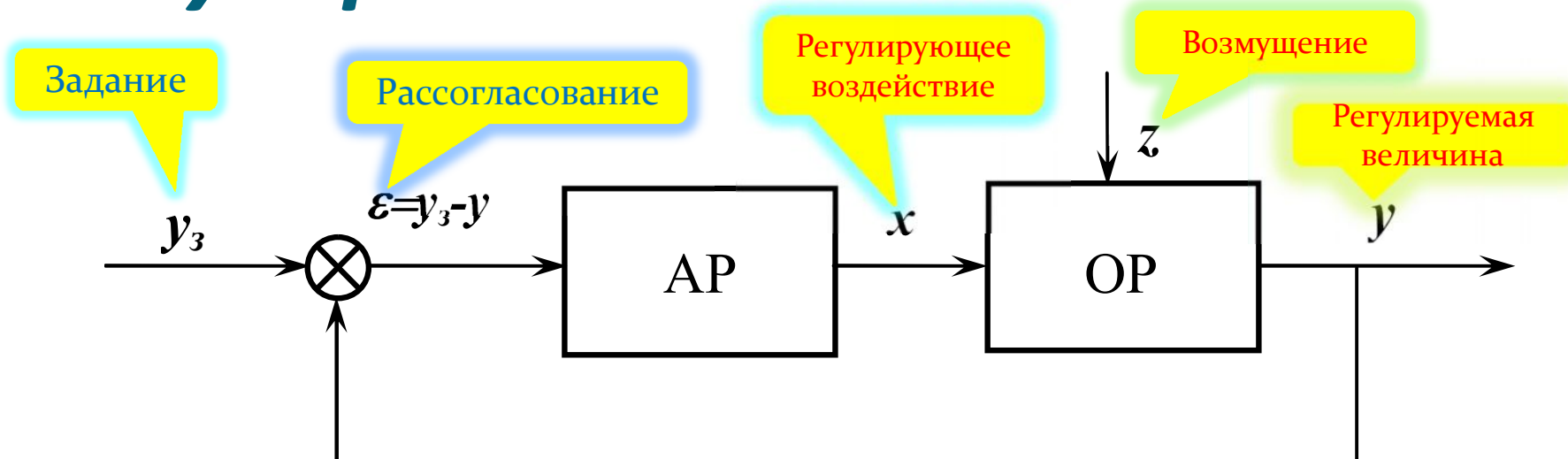




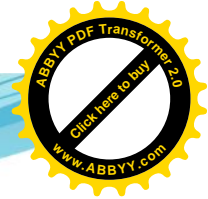
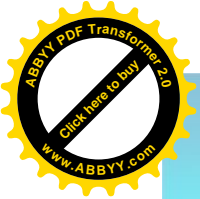
# Принципы действия АСР



# Регулирование по отклонению



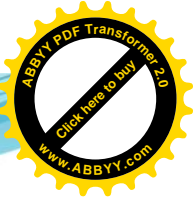
- В системах, работающих **по отклонению** регулируемой величины от **заданного значения**, возмущение  $z$  вызывает отклонение текущего значения регулируемой величины  $y$  от ее заданного значения  $y_z$ . Автоматический регулятор АР сравнивает значения  $y$  и  $y_z$ . При их рассогласовании вырабатывает **регулирующее воздействие**  $x$  соответствующего знака, которое через исполнительное устройство подается на объект регулирования ОР, и устраняет это рассогласование.



## Достоинства:

регулирующее воздействие  
осуществляется независимо от  
**числа, вида и места** приложения  
возмущающих воздействий

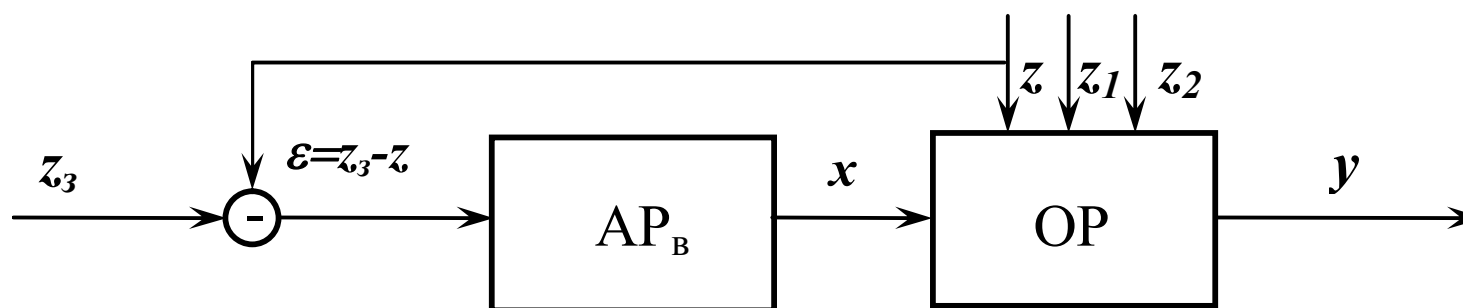
одним регулирующим  
воздействием часто достигается  
удовлетворительная компенсация  
нескольких возмущений



# Недостаток

- В системах регулирования по отклонению для формирования регулирующих воздействий необходимо **рассогласование**, в этом состоит их *недостаток*, поскольку задача регулятора состоит именно в том, чтоб не допускать рассогласование

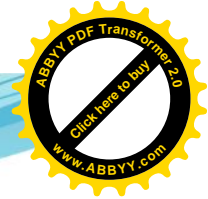
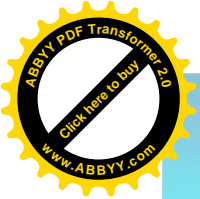
# Регулирование по возмущению



При регулировании по возмущению регулятор  $AP_B$ , получает информацию о текущем значении основного возмущающего воздействия  $z$

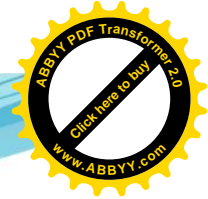
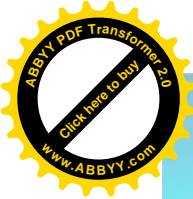
При изменении его и несовпадении с *номинальным* значением  $z_3$ , регулятор формирует регулирующее воздействие  $x$ , направляемое на объект

В системах, действующих по возмущению, сигнал регулирования проходит по контуру быстрее, чем в системах, построенных по принципу отклонения, вследствие чего возмущающее воздействие может быть устранено еще до появления рассогласования



# Регулирование по возмущению

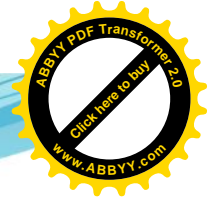
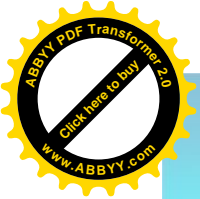
- Реализовать регулирование по возмущению для большинства объектов химической технологии практически не представляется возможным, так как это требует учета влияния всех возмущений объекта ( $z_1, z_2, \dots$ ), число которых, как правило, велико; кроме того, некоторые из них не могут быть оценены количественно.



## Достоинства:

- возмущающее воздействие может быть устранено **до возникновения рассогласования**

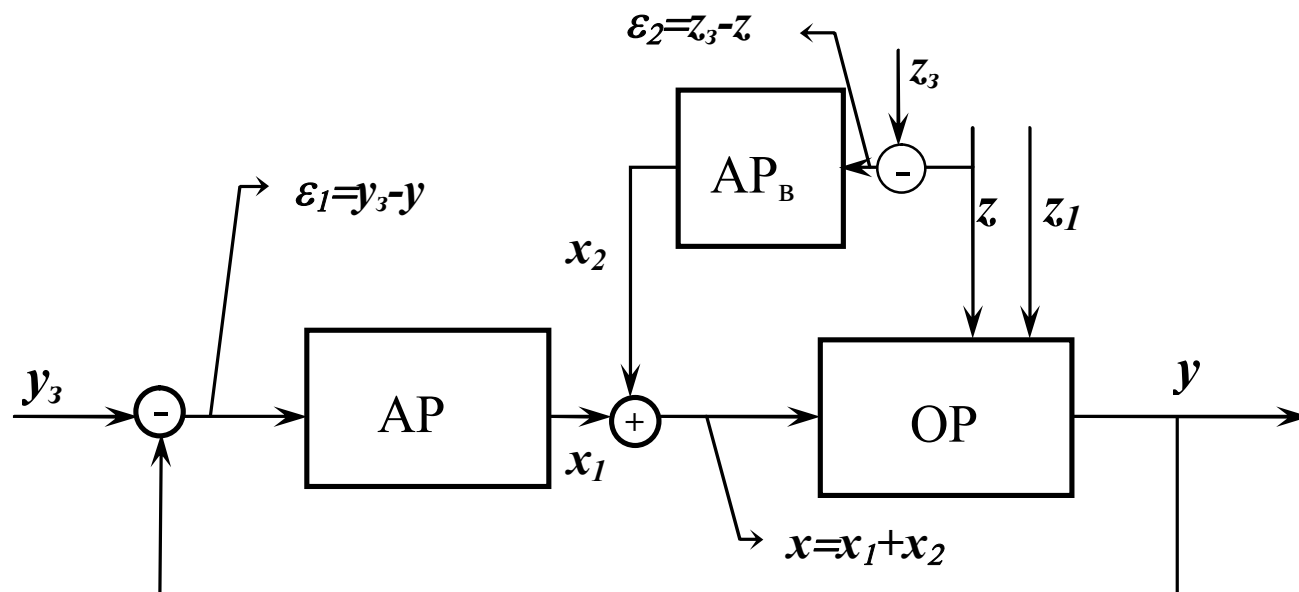




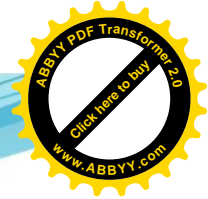
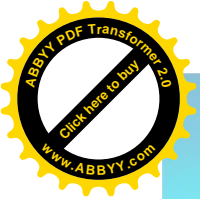
## Недостатки:

- регулятор реагирует только на **один вид возмущения**
- неточности в работе регуляторов будут со временем увеличивать величину **рассогласования**

# По комбинированному принципу

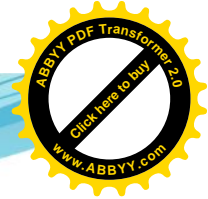
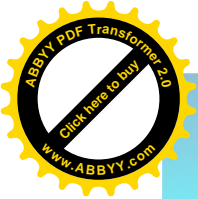


- ❑ При совместном использовании принципов регулирования **по отклонению и по возмущению**, удастся получить высококачественные системы
- ❑ Влияние основного возмущения  $z$  нейтрализуется регулятором  $AP_v$  работающим по принципу возмущения
- ❑ Влияние других возмущений (например,  $z_1$  и др.) - регулятором  $AP$ , реагирующим **на отклонение** текущего значения регулируемой величины от заданного значения



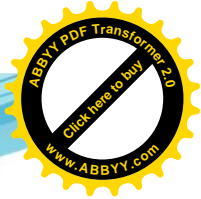
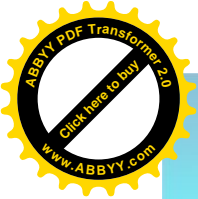
# Требования предъявляемые к АСР

- Изменение регулируемой величины  $U_{вых}$  во времени в результате возмущения и вызванного этим возмущением действия регулятора называется процессом регулирования или *переходным процессом*
- Обычно процесс регулирования представляют в виде *графика*, который называют кривой переходного процесса
- Если в процессе регулирования система снова придет в равновесное состояние  $U_{уст}$ , то такая система называется *устойчивой*

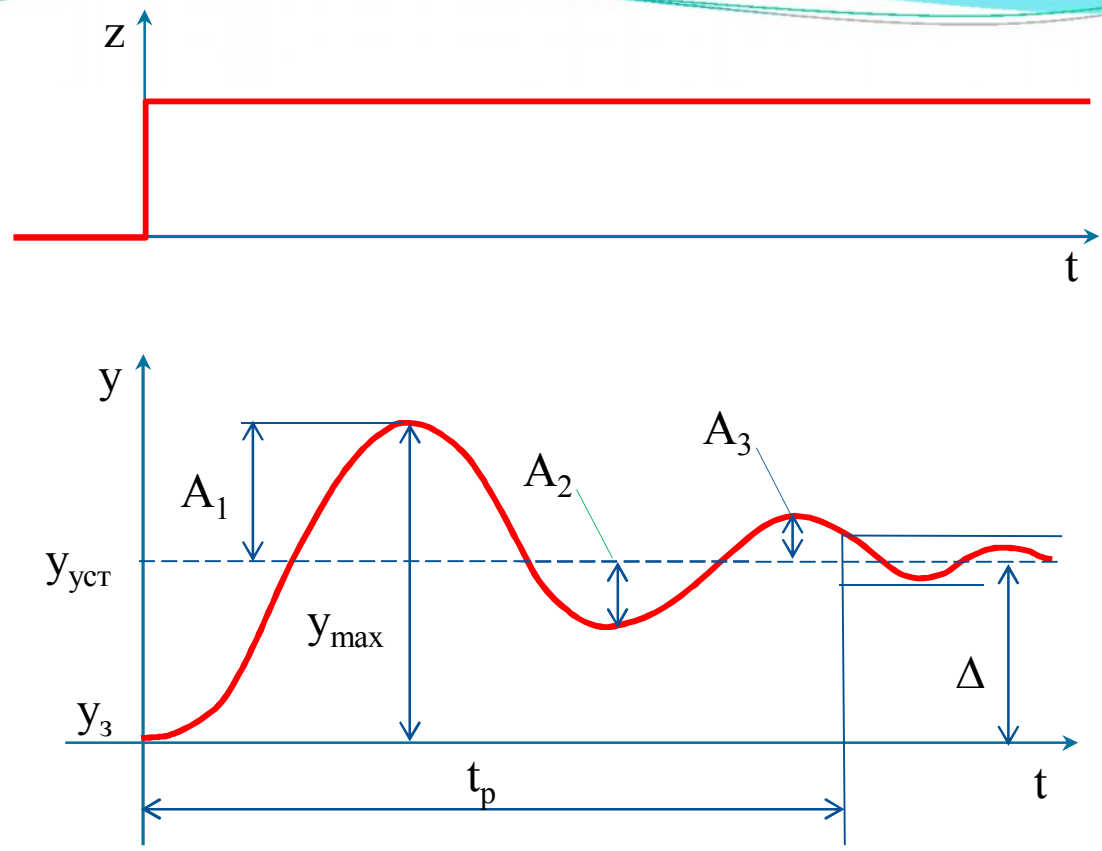


# Требования предъявляемые к АСР

- устойчивость АСР
- обеспечение необходимых показателей качества



# Показатели качества переходного процесса

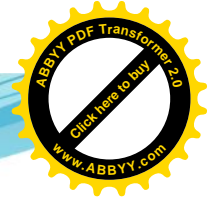
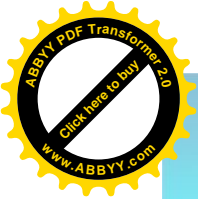


~~длительность переходного процесса  $t_p$  — время от момента изменения заданного значения до момента, когда выходная величина достигнет заданного значения  $y_{уст}$  и останется в пределах заданной погрешности  $\Delta$  от заданного значения  $y_3$ .~~  
~~Максимальное отклонение  $y_{max}$  — максимальное отклонение выходной величины от заданного значения  $y_3$ .~~  
~~Коэффициент перерегулирования  $\sigma_{пр}$  — отношение максимальной погрешности  $A_1$  к заданному значению  $y_3$ .~~  
~~Коэффициент колебательности  $\delta$  — отношение амплитуды  $A_1$  к заданному значению  $y_3$ .~~  
~~Коэффициент затухания  $\lambda$  — отношение амплитуды  $A_3$  к амплитуде  $A_1$ .~~  
~~Число колебаний  $n$  — количество полных колебаний, совершаемых за время  $t_p$ .~~  
~~Время установившегося процесса  $t_{уст}$  — время от момента изменения заданного значения до момента, когда выходная величина достигнет заданного значения  $y_{уст}$  и останется в пределах заданной погрешности  $\Delta$  от заданного значения  $y_3$ .~~  
~~Погрешность  $\Delta$  — разность между заданным значением  $y_3$  и установившимся значением  $y_{уст}$ .~~

$$\Delta = y_{уст} - y_3$$

или в процентах от заданного значения:

$$\sigma_{пр} = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} \times 100\% \quad \delta = \frac{y_{уст} - y_3}{y_3} \times 100\%$$



# Показатели качества переходного процесса:

- 1 **статическая ошибка** регулирования есть рассогласование между установившимся значением регулируемой величины после переходного процесса  $Y_{уст}$  и ее заданным значением  $Y_3$ :

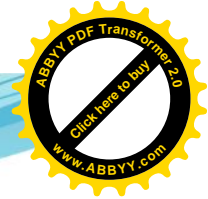
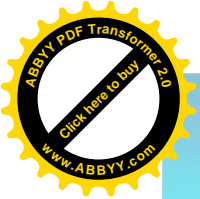
$$\Delta = Y_{уст} - Y_3$$

или в процентах от заданного значения:

$$\delta = \frac{Y_{уст} - Y_3}{Y_3} \times 100\%$$

- 2 **время регулирования**  $t_p$  есть отрезок, в течение которого регулируемая величина достигает нового установившегося значения с некоторой заранее установленной точностью  $\pm \varepsilon$ .
- 3 **динамическая ошибка** регулирования  $Y_{дин}$  представляет собой максимальное отклонение регулируемой величины в переходном процессе от ее заданного значения в процентах:

$$Y_{дин} = \frac{Y_{max} - Y_3}{Y_3} \times 100\%$$



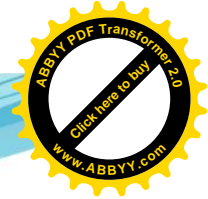
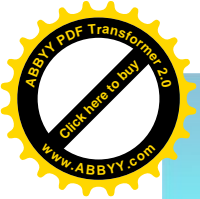
## Показатели качества переходного процесса:

- ④ *перерегулирование* представляет собой максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения, выраженное в процентах от установившегося

$$\sigma = \frac{U_{\max} - U_{\text{уст}}}{U_{\text{уст}}} \times 100\%$$

- ⑤ *степень затухания*  $\varphi$  показывает быстроту, с которой регулируемая величина придет к установившемуся значению:

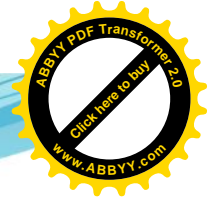
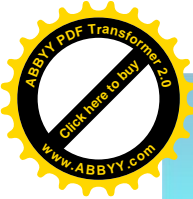
$$\varphi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}$$



# Многоконтурные системы регулирования

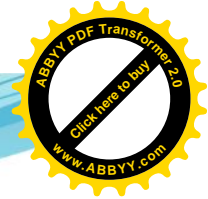
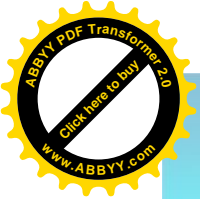
- ① По числу контуров прохождения сигналов АСР делятся на:
  - одноконтурные
  - многоконтурные
- ② Многие объекты химической технологии
  - обладают существенным запаздыванием и инерционностью
  - характеризуются значительными возмущениями
- ③ Использование одноконтурных систем при автоматизации таких объектов не позволяет обеспечить высокого качества регулирования
- ④ Поэтому для повышения качества регулирования этих объектов используют более сложные АСР





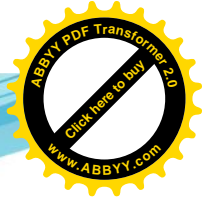
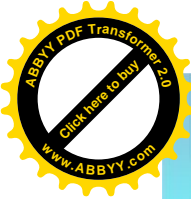
# Каскадные АСР

- В каскадных системах при регулировании основной технологической величины в объекте с *большим запаздыванием* используются также *вспомогательные величины*
- *Вспомогательная величина* реагируют на изменение *основных возмущений* объекта и *регулирующего воздействия* с меньшим запаздыванием
- В таких случаях *стабилизация вспомогательных величин* способствует более качественному регулированию основной величины



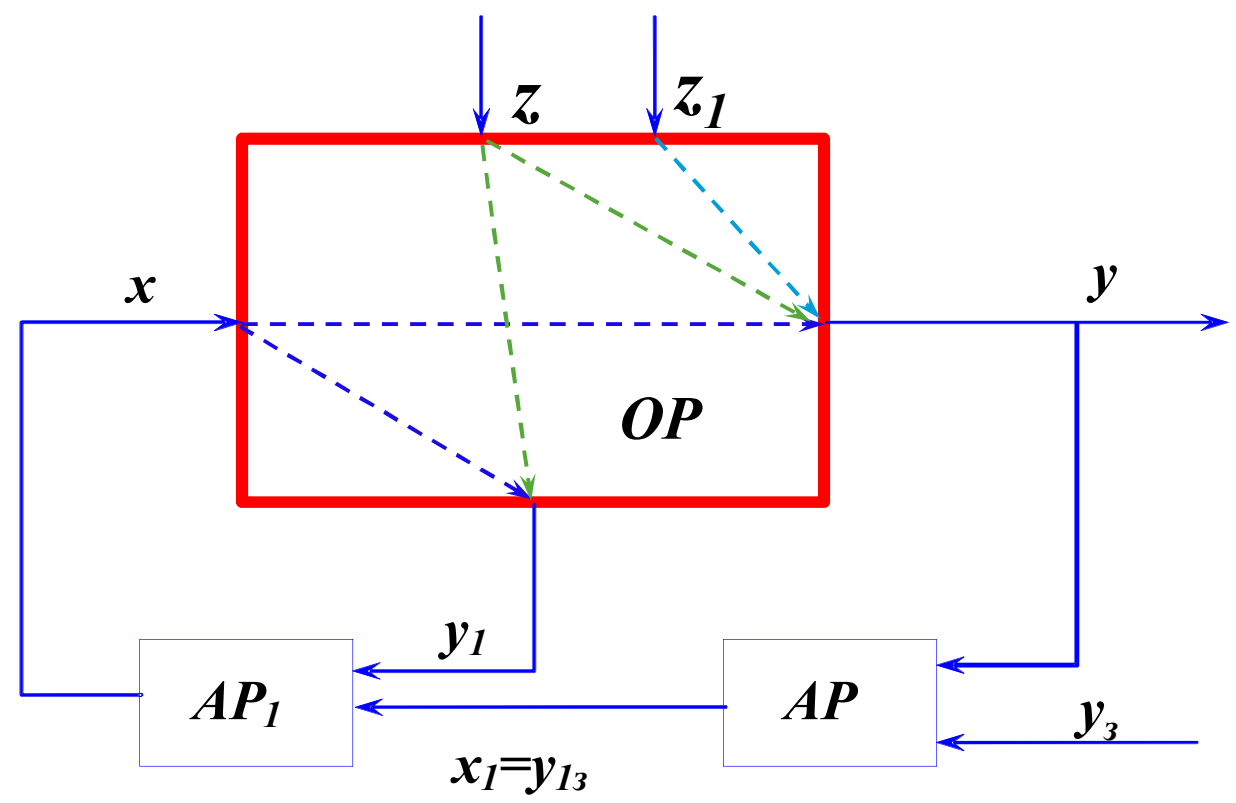
# Каскадные АСР

- Каскадная система состоит из нескольких контуров регулирования, каждый из которых регулирует свою технологическую (*основную* или *вспомогательную*) величину
- Однако применение каскадных схем эффективно только в том случае, когда *запаздывание* в контуре регулирования *основной величины* существенно больше, чем в контуре регулирования *вспомогательной величины*
- При автоматизации химико-технологических объектов чаще всего используют двухконтурные каскадные системы

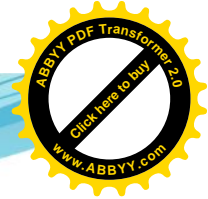
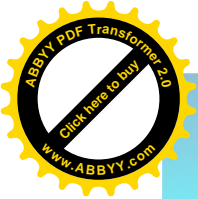


ДАСР

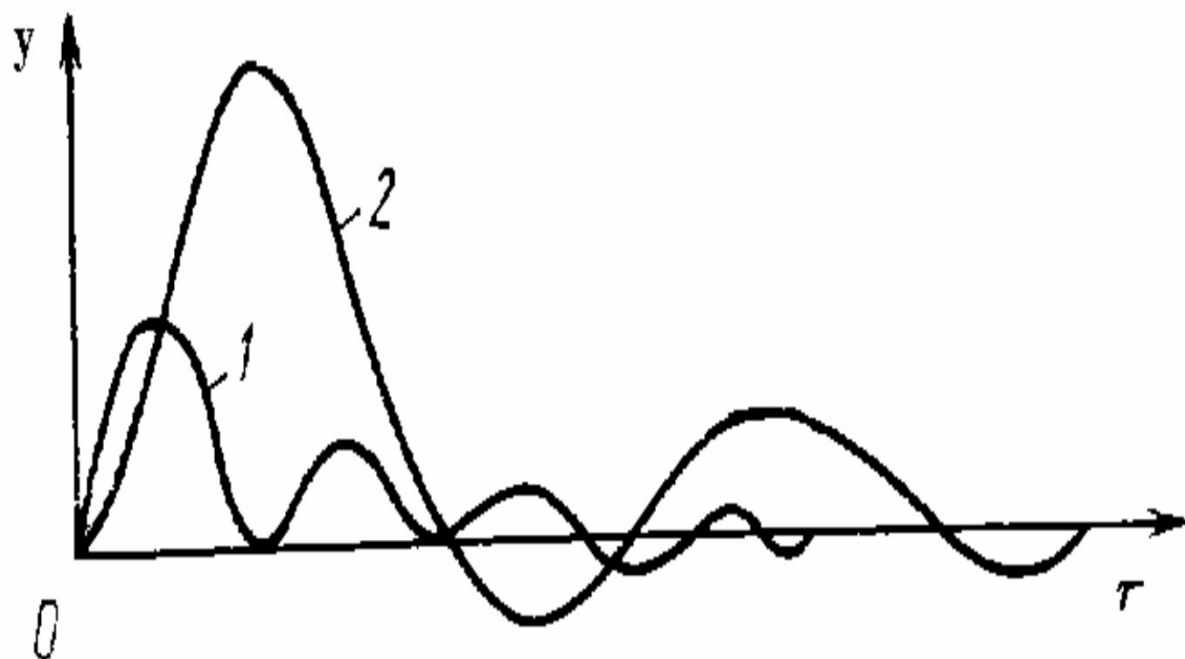
# Структурная схема двухконтурной системы

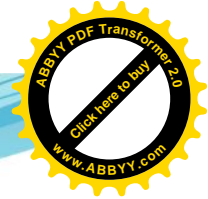
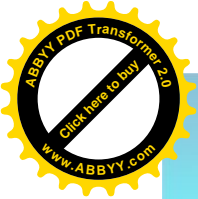


OP - объект регулирования; AP - корректирующий регулятор; AP<sub>1</sub> - стабилизирующий регулятор.

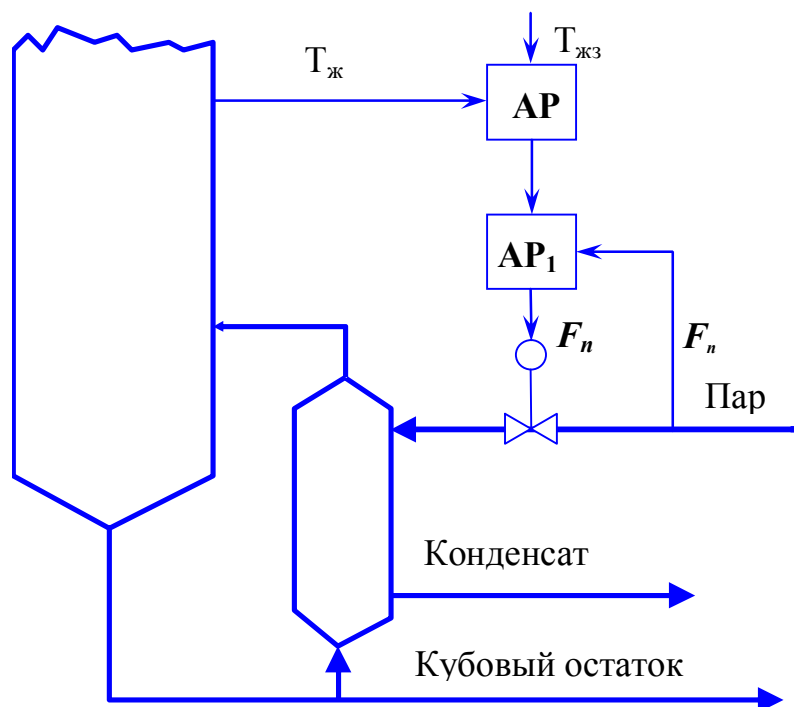


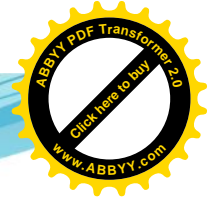
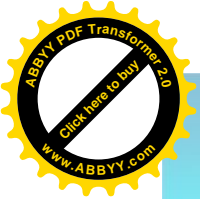
Переходные процессы в каскадной системе (кривая 1) и одноконтурной системе (кривая 2) при одинаковом ступенчатом возмущении  $z$





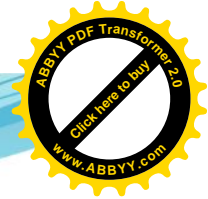
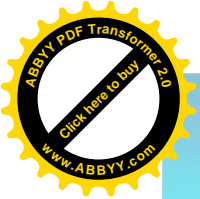
## Схема двухконтурной каскадной АСР температуры в отгонной части ректификационной колонны





# Преобразование Лапласа и передаточные функции

- АСР представляют собой *динамические системы*. В общем случае динамические свойства АСР описываются *дифференциальными уравнениями*, выражающими зависимость между *входными* и *выходными* величинами во времени. В результате решения дифуравнений получают  $y = f(x)$  (переходный процесс).
- Из-за громоздкости решения дифуравнений, динамические свойства АСР представляют *передаточными функциями*. Производить вычисления с передаточными функциями значительно легче, чем с дифуравнениями.
- Понятие передаточной функции связано с *преобразованием Лапласа*, которое является вспомогательным математическим аппаратом, значительно упрощает функции и действия над ними.
- *Преобразование Лапласа* представляет собой *функциональное преобразование*, при котором функция *вещественного переменного  $t$*  преобразуется в функцию *комплексного переменного  $p$* .



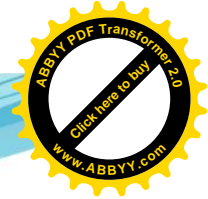
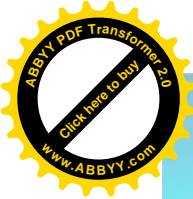
- Пусть имеем функцию времени  $f(t)$ .  
Преобразование для неё имеет вид:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

$$L[f(t)] = F(p)$$

$F(p)$  - изображение  
 $f(t)$  - оригинал

- Функция  $F(p)$  рассматривается не как функция времени, а как функция комплексного числа  $p$
- $p = \alpha + j\omega$
- $\alpha$  – действительная часть
- $\omega$  - мнимая часть



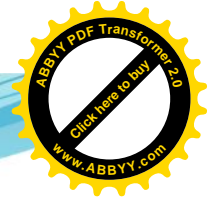
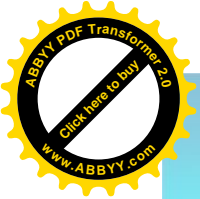
# Пример

$$f(t) = e^{-\alpha t}$$

$$F(p) = ?$$

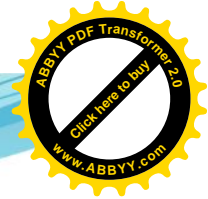
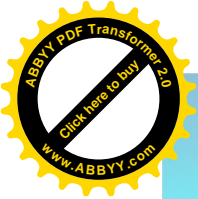
$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-(p+\alpha)t} dt = \frac{1}{-(p+\alpha)} e^{-(p+\alpha)t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{p+\alpha}$$





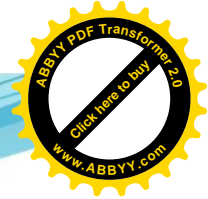
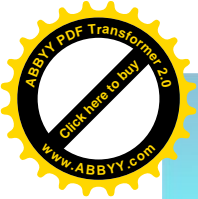
Преобразование Лапласа позволяет находить решение дифференциального уравнения без непосредственного его интегрирования

1. Находят изображение исходного уравнения
2. Решают изображение исходного уравнения относительно интересующей величины
3. По изображению находят оригинал



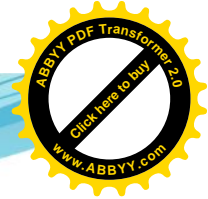
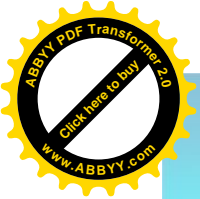
Для часто встречающихся функций изображения и оригиналы можно брать из таблиц

Оригинал	Изображение
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{p + \alpha}$
$\sin \alpha t$	$\frac{\alpha}{p^2 + \alpha^2}$
$\cos \alpha t$	$\frac{p}{p^2 + \alpha^2}$
$1(t)$	$\frac{1}{p}$
$t$	$\frac{1}{p^2}$
$te^{-\alpha t}$	$\frac{1}{(p + \alpha)^2}$



# Теоремы преобразования Лапласа

Оригинал	Изображение
$af(t)$	$aF(p)$
$f_1(t) \pm f_2(t)$	$F_1(p) \pm F_2(p)$
$df(t)/dt$	$pF(p)$
$\frac{d^n f(x)}{dt^n}$	$p^n F(p)$
$\int f(t)dt$	$F(p)/p$



Пусть система описывается дифференциальным уравнением  $n$ -ого порядка:

$$\sum_0^n a_i \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_0^m b_i \frac{d^i x}{dt^i}$$

где  $a_i, b_i$  - постоянные коэффициенты

$y$  и  $x$  - выходная и входная величины системы

Пример

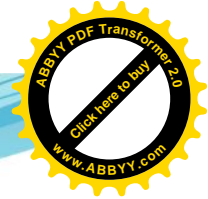
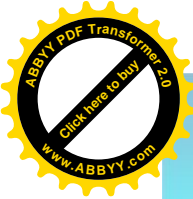
$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

Запишем уравнение в операторной форме:

$$y(p) \sum_0^n a_i p^i = x(p) \sum_0^m b_i p^i$$

Пример

$$a_2 p^2 \cdot y(p) + a_1 p \cdot y(p) + a_0 \cdot y(p) = b_1 p \cdot x(p) + b_0 \cdot x(p)$$



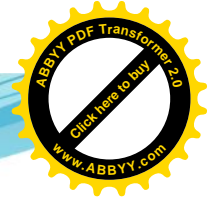
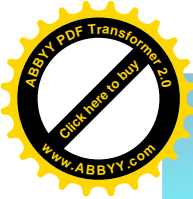
Если из этого выражения взять отношение  $y(p)/x(p)$  и обозначить его через  $W(p)$ , получим выражение передаточной функции:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{\sum_0^m b_i p^i}{\sum_0^n a_i p^i}$$

Пример

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_1 p + 1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}$$

**Передаточной функцией** системы называется отношение изображения по Лапласу **выходной** величины к изображению по Лапласу **входной** величины



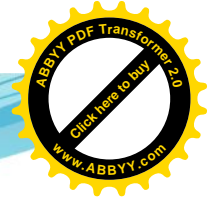
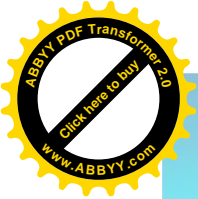
Из последнего выражения получим:

$$y(p) = \frac{\sum_0^m b_i p^i}{\sum_0^n a_i p^i} x(p) = W(p) \cdot x(p)$$

Для оценки АСР по их переходным процессам обычно на вход подают скачкообразный единичный сигнал  $x(t)=1(t)$ . Известно  $L[1(t)]=1/p$ . Тогда получим

$$y(p) = W(p) \cdot \frac{1}{p}$$

Обратным преобразованием получают уравнение переходного процесса  $y(t)$ .



## Пример

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \quad x(p) = \frac{1}{p}$$

$$y(p) = W(p)x(p) = \frac{k}{Tp + 1} \frac{1}{p} = \frac{k}{p(Tp + 1)}$$

$$y(t) = L^{-1}[y(p)]$$

$$\frac{k}{p(Tp + 1)} = \frac{M_1}{p} + \frac{M_2}{Tp + 1} = \frac{M_1(Tp + 1) + M_2p}{p(Tp + 1)} = \frac{M_1Tp + M_1 + M_2p}{p(Tp + 1)}$$

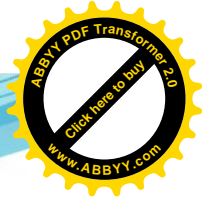
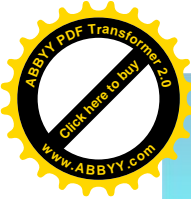
$$k = M_1T + M_1 + M_2p$$

$$k = M_1$$

$$M_1T + M_2 = 0$$

$$M_2 = -M_1T = -kT$$

$$\frac{M_1}{p} + \frac{M_2}{Tp + 1} = \frac{k}{p} + \frac{-kT}{Tp + 1} = k \left[ \frac{1}{p} - \frac{T}{Tp + 1} \right]$$



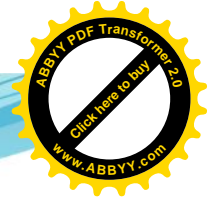
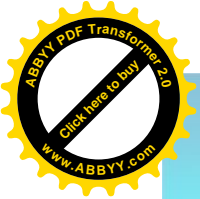
## Пример

$$y(p) = \frac{k}{p(Tp+1)} = k \left[ \frac{1}{p} - \frac{T}{Tp+1} \right]$$

$$y(t) = L^{-1}[y(p)] = L^{-1} \left[ \frac{k}{p(Tp+1)} \right] = L^{-1} \left[ k \left[ \frac{1}{p} - \frac{T}{Tp+1} \right] \right] = kL^{-1} \left[ \frac{1}{p} - \frac{T}{Tp+1} \right] =$$

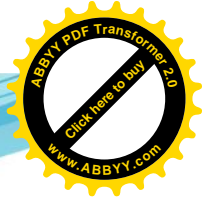
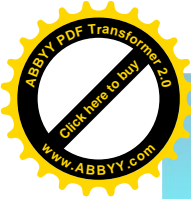
$$= k \left\{ L^{-1} \left[ \frac{1}{p} \right] + L^{-1} \left[ \frac{1}{p + \frac{1}{T}} \right] \right\} = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$





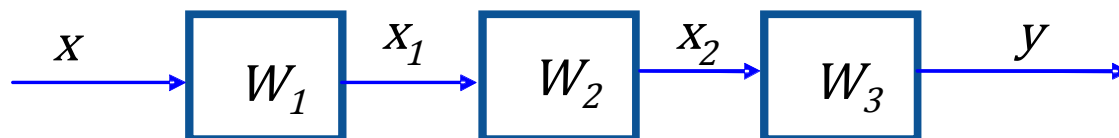
# Структурные схемы и составление передаточных функций

- Элементы АСР можно представить **типовым динамическим звеном** (ТДЗ) или совокупностью звеньев. Поэтому любую АСР можно рассматривать как состоящую из типовых звеньев, соединенных определенным образом между собой.
- Схемы АСР, составленные из ТДЗ, называются **структурными**. Составление структурных схем облегчает нахождение передаточных функций и дифуравнений системы и оценку их динамических свойств. Динамические свойства определяются не только ДХ составляющих её элементов, но и **порядком соединения** их между собой.



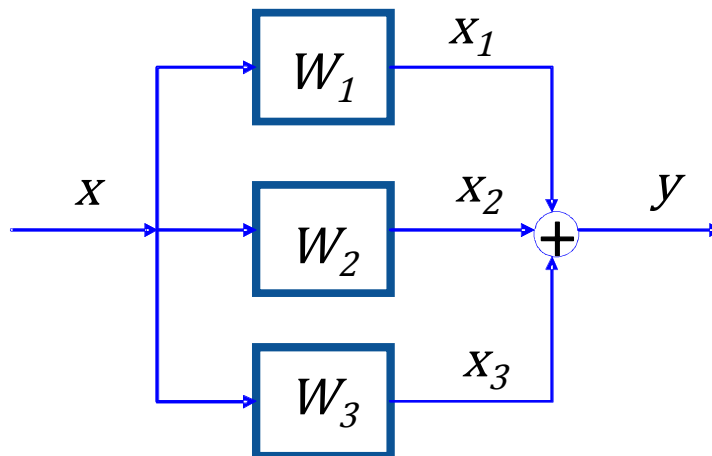
# Способы соединения ТДЗ

## ➤ Последовательное соединение



- ❖ Передаточная функция каждого звена:  
 $W_1(p) = x_1(p)/x(p); W_2(p) = x_2(p)/x_1(p); W_3(p) = y(p)/x_2(p)$
- ❖ Нетрудно убедиться, что общая передаточная функция  
 $W(p) = y(p)/x(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p)$
- ❖ Таким образом, передаточная функция *последовательно* соединенных звеньев равна *произведению* передаточных функций отдельных звеньев

## ➤ Параллельное соединение

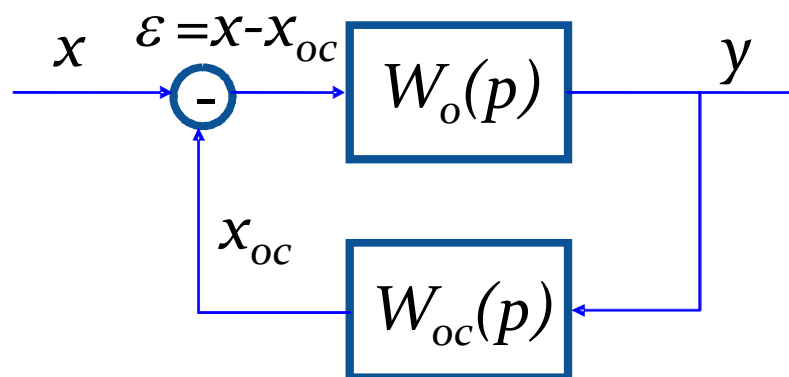


- Величины на выходе звеньев суммируются  $y = x_1 + x_2 + x_3$
- Общая передаточная функция определится как:  

$$W(p) = y(p)/x(p) = [x_1(p) + x_2(p) + x_3(p)]/x(p) =$$

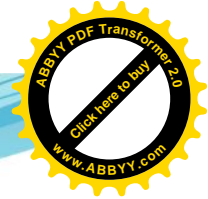
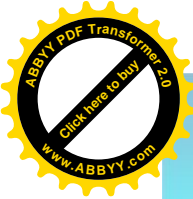
$$= x_1(p)/x(p) + x_2(p)/x(p) + x_3(p)/x(p) = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p)$$
- Таким образом, передаточная функция звеньев, соединенных *параллельно*, равна *сумме* передаточных функций отдельных звеньев

## ➤ Передаточная функция системы охваченной отрицательной обратной связью



Из структурной схемы видно, что

- $\varepsilon = x - x_{oc}$
- $y = W_o(p) \cdot \varepsilon$
- $x_{oc} = W_{oc}(p) \cdot y$



# Статические и динамические характеристики элементов АСР

- *Статические* и *динамические* свойства АСР определяется *статическими* и *динамическими* характеристиками элементов, входящих в систему

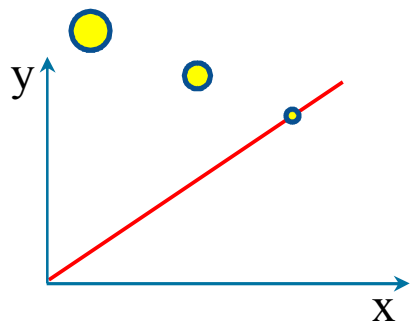
- *Статической характеристикой* элемента называется зависимость его выходной величины от входной в равновесных состояниях:

$$y = f(x)$$

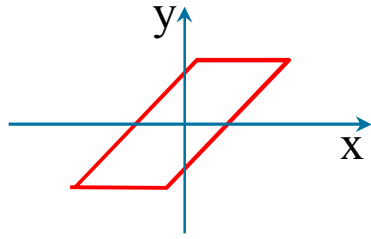
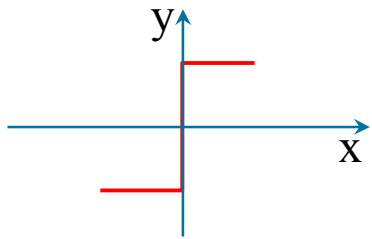
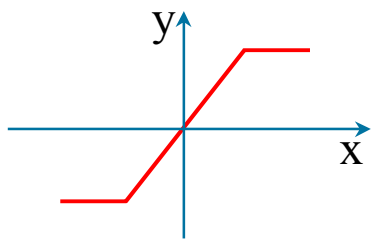
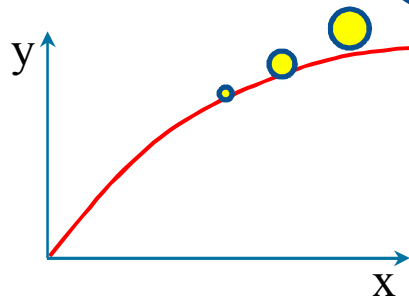
- Статическая характеристика называется *линейной*, если она описывается линейным уравнением и имеет форму прямой линии. Элемент с такой статической характеристикой также называется линейным.
- Статическая характеристика называется *нелинейной*, если она описывается нелинейным уравнением или системой уравнений. Соответствующий элемент будет также нелинейным.

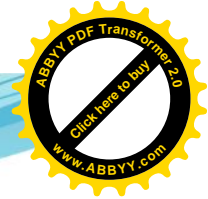
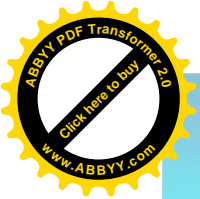
# Примеры статических характеристик

Линейная  
СХ



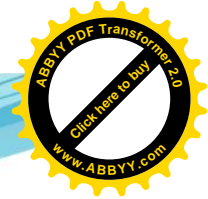
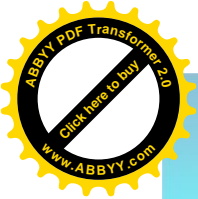
Нелинейная  
СХ



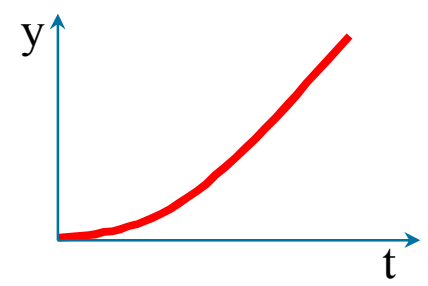
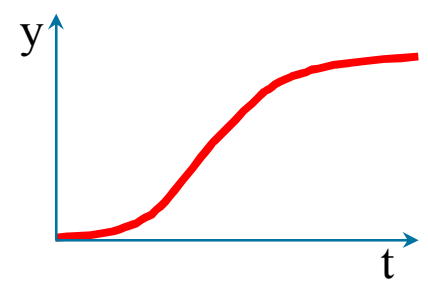
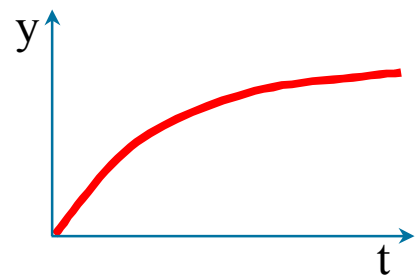


# Динамическая характеристика элемента

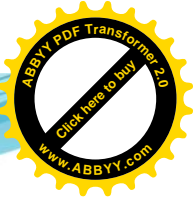
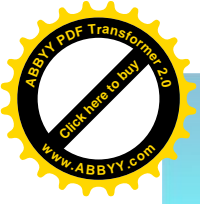
- *Динамической характеристикой* элемента называется зависимость изменения во времени выходной величины от входной в переходном режиме
- Математически динамические свойства выражаются дифференциальными уравнениями. Для определения *динамических характеристик* обычно используют *скачкообразный сигнал*, который является самым нежелательным возмущением.



# Примеры динамических характеристик

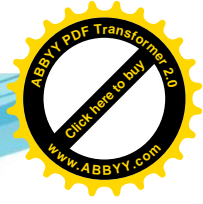
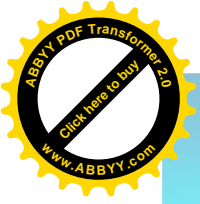






# Типовые динамические звенья

- При исследовании АСР для простоты вычислений и удобства, их разбивают на так называемые,  *типовые динамические звенья*
- Типовые динамические звенья описываются дифференциальными уравнениями не выше  *второго порядка*



# Усилительное звено

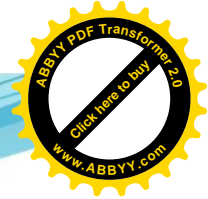
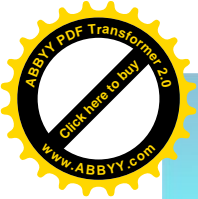
- *Усилительными* называются такие звенья, у которых выходная величина изменяется во времени по тому же закону, что и входная величина
- Такое звено описывается алгебраическим уравнением:

$$y = kx$$

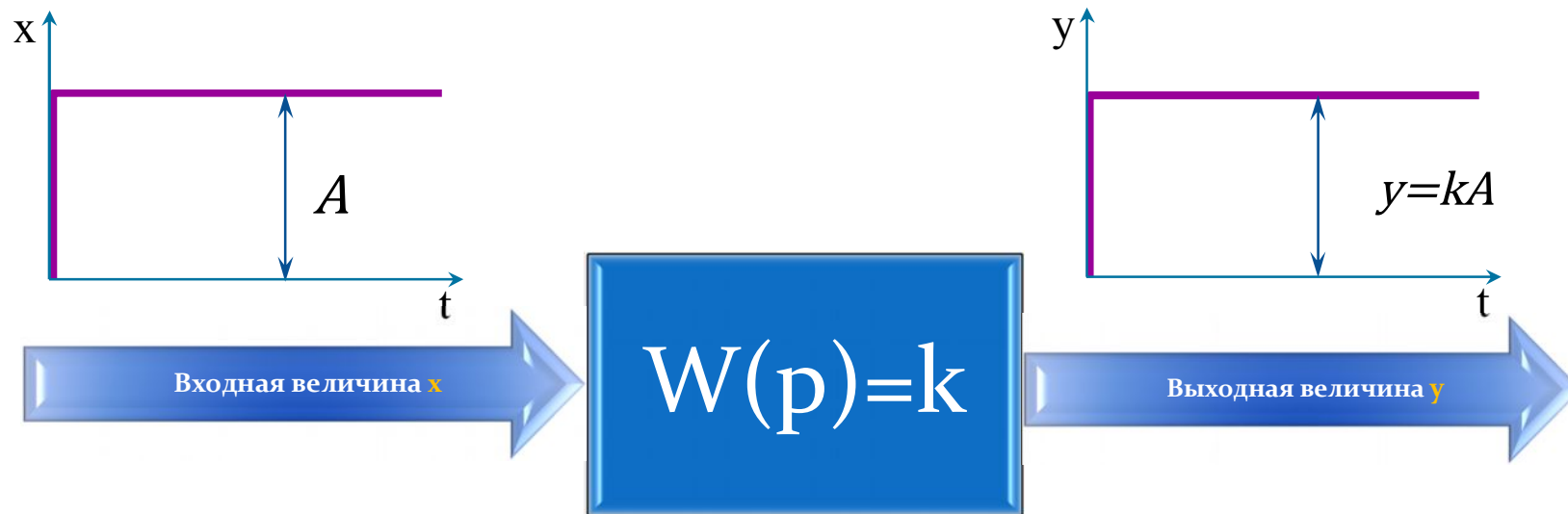
где  $k$  – коэффициент усиления.

- Передаточная функция

$$W(p) = y(p) / x(p) = k$$

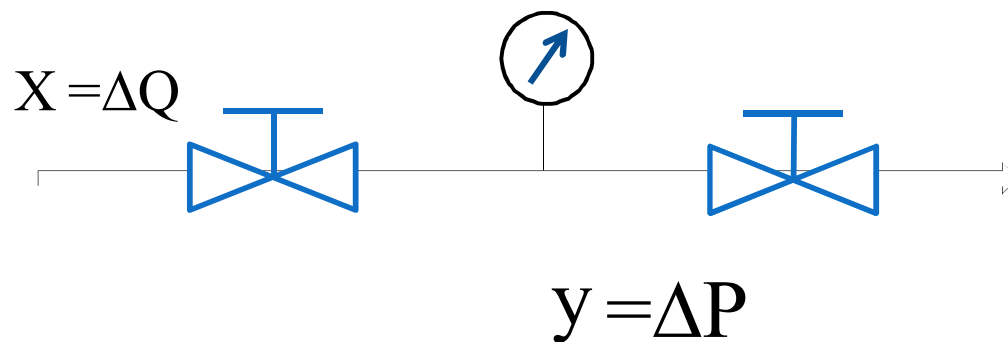
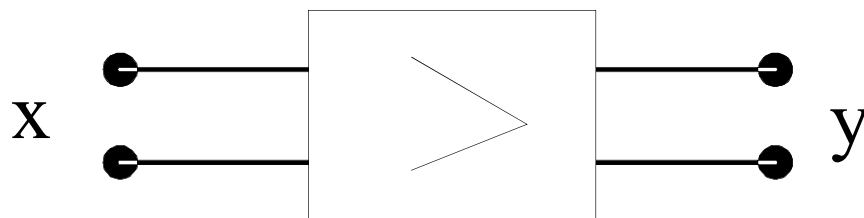


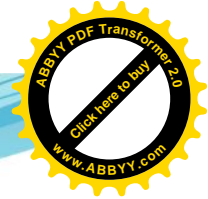
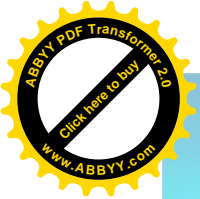
# График переходного процесса



# Примеры усилительного звена

- электронный усилитель
- участок трубопровода с потоком жидкости





# Апериодическое звено первого порядка

- *Апериодическим* (одноёмкостным, инерционным, статическим) называют звено, которое описывается дифференциальным уравнением *первого* порядка вида:

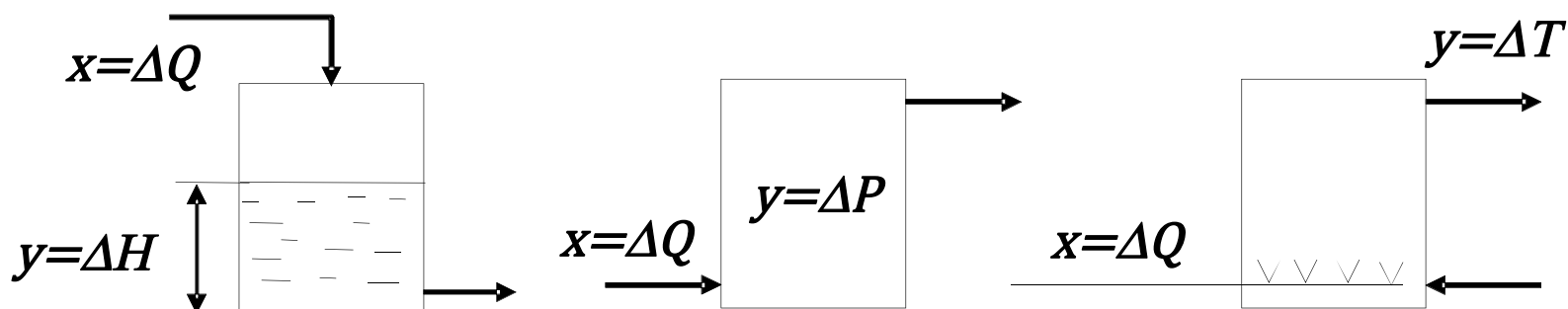
$$T \frac{dy}{dt} + y = kx$$

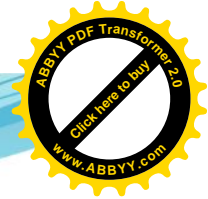
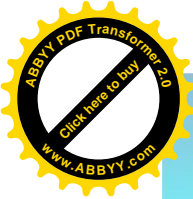
где  $T$  – постоянная времени

$k$  – коэффициент усиления

# Примеры апериодического звена

- бак с жидкостью со свободным сливом
- теплообменник смешения
- аккумулятор сжатого воздуха
- термопара





- Применяя преобразование Лапласа получим

$$(Tp+1)y(p)=kx(p)$$

- Передаточная функция:

$$W(P)=k/(Tp+1)$$

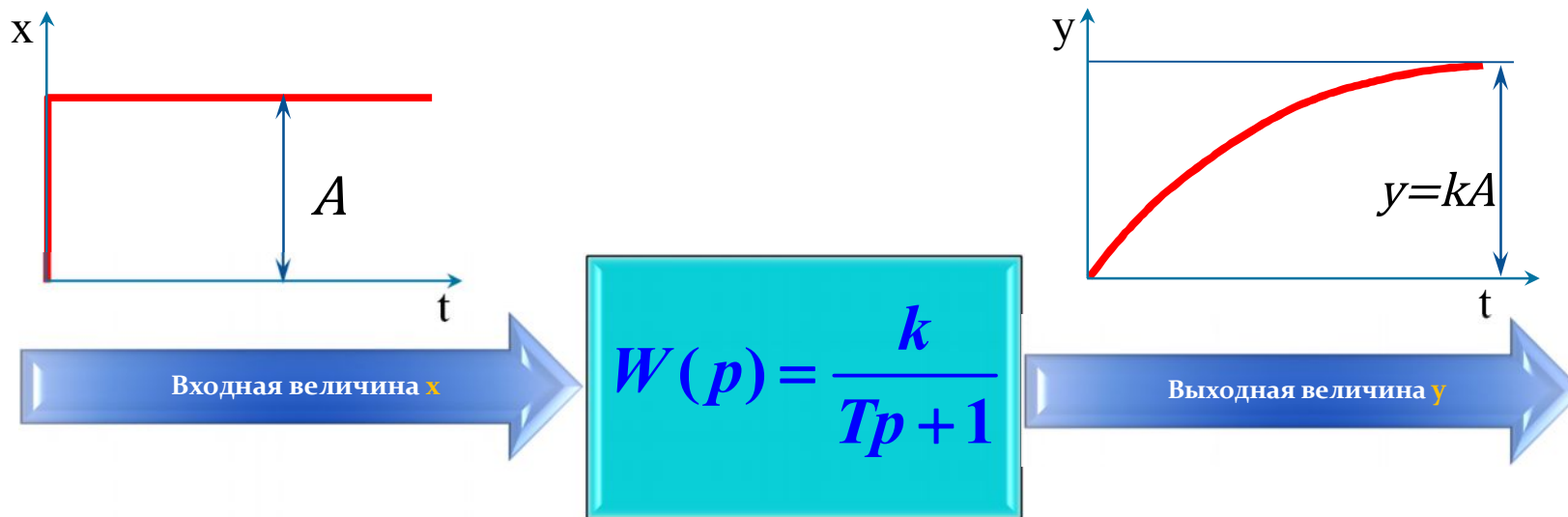
- Изображение выходной величины  $y(p)$

$$y(p) = W(p)x(p) = \frac{k}{Tp+1} \frac{1}{p}$$

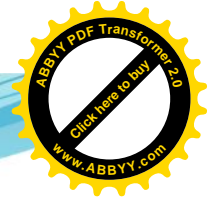
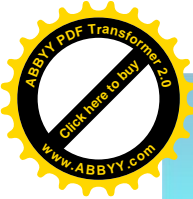
- Применяя обратное преобразование Лапласа, получим

$$y(t) = k \left( 1 - e^{-t/T} \right)$$

# График переходного процесса





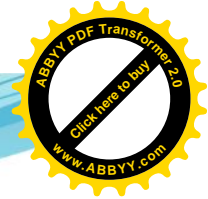
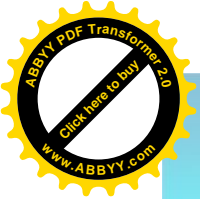


# Апериодическое звено второго порядка

- *Апериодическим* звеном *второго* порядка называют звено, которое описывается дифференциальным уравнением *второго* порядка вида:

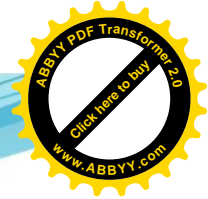
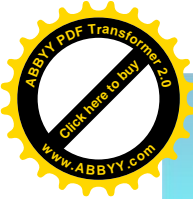
$$T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$$

где  $T_1$  и  $T_2$  - постоянные времени звена  
 $k$  – коэффициент усиления



# Примеры апериодического звена второго порядка

- теплообменник
- нагревательная печь

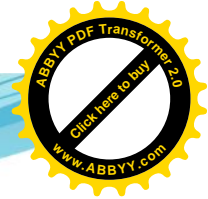
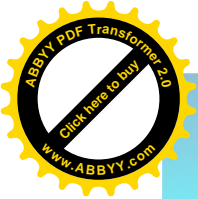


- Передаточная функция имеет вид

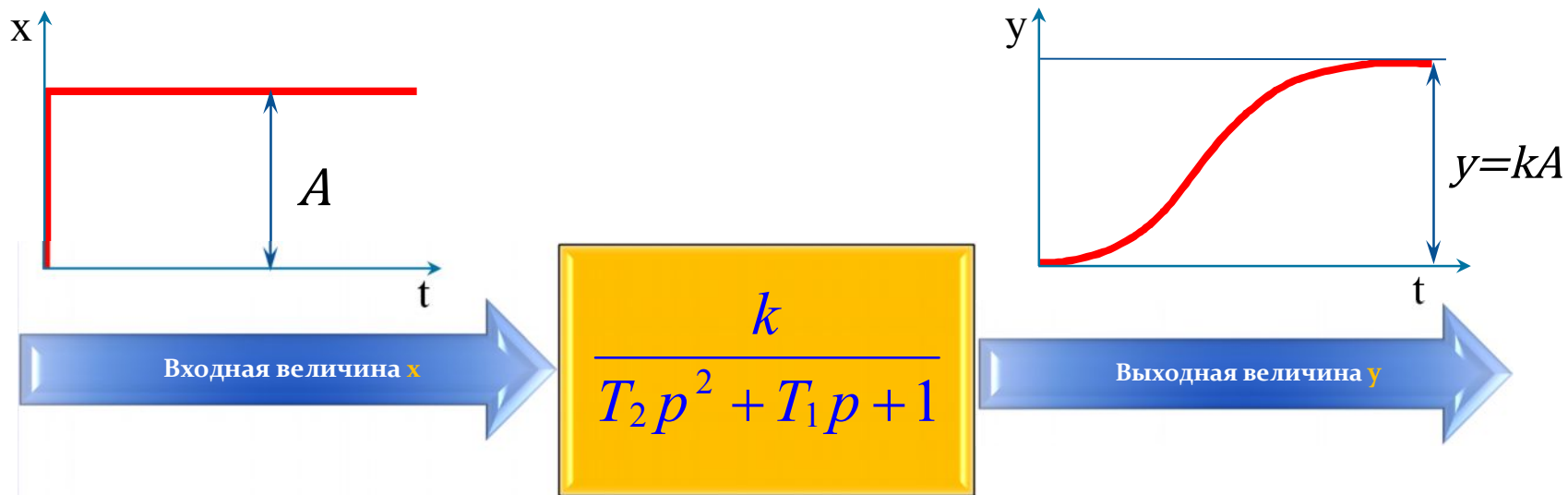
$$W(p) = \frac{k}{T_2 p^2 + T_1 p + 1}$$

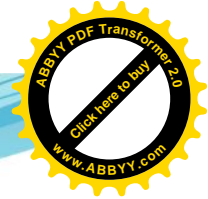
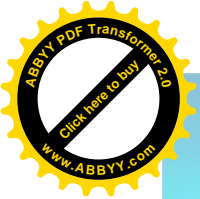
- Решение дифференциального уравнения

$$y(t) = k \left( 1 + c_1 e^{-\alpha_1 t} + c_2 e^{-\alpha_2 t} \right)$$



# График переходного процесса





# Интегрирующее звено

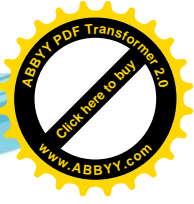
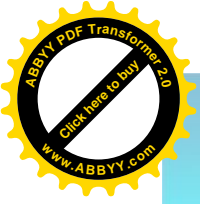
- Интегрирующим называется такое звено, у которого выходная величина пропорциональна интегралу по времени от входной величины

$$y = \frac{1}{T_u} \int_0^t x dt$$

где  $T_u$  - постоянная времени звена

- Дифференциальное уравнение интегрирующего звена

$$T_u \frac{dy}{dt} = x$$



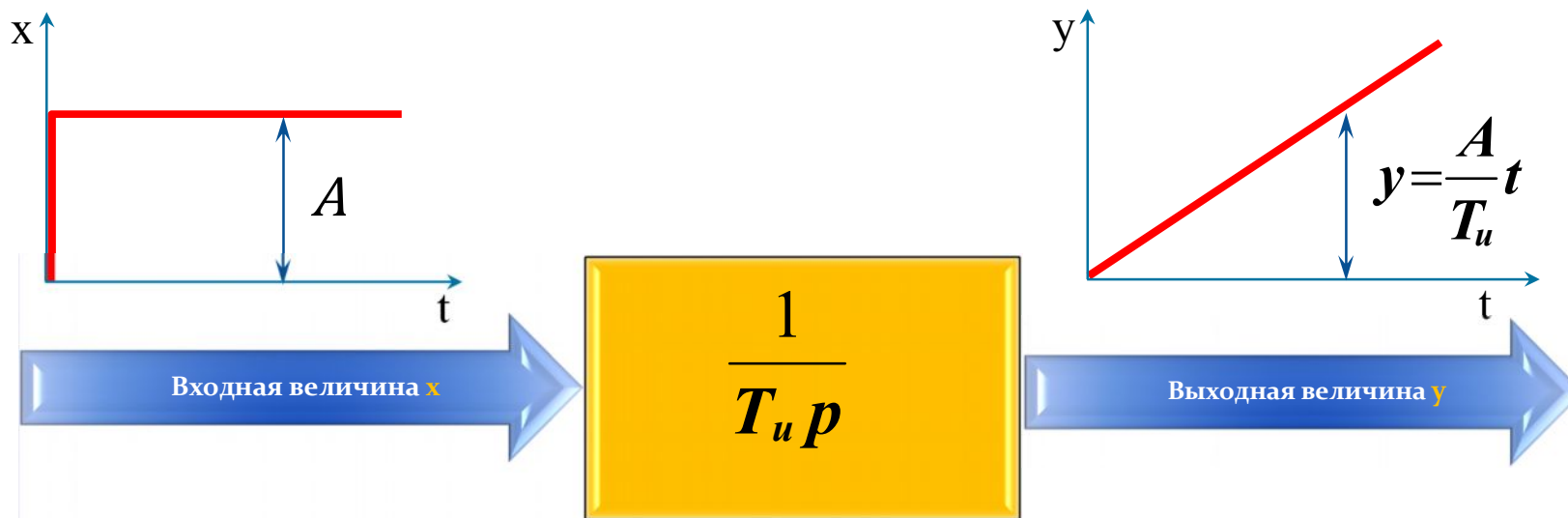
# Передаточная функция

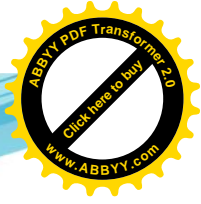
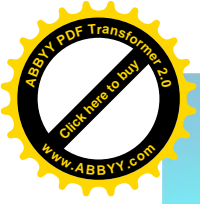
$$W(p) = \frac{1}{T_u p}$$

# Переходный процесс

$$y(t) = \frac{1}{T_u} t$$

# График переходного процесса





# Дифференцирующее звено

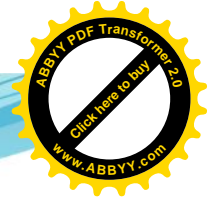
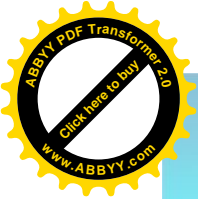
- *Дифференцирующим* называется такое звено, если изменение его выходной величины пропорционально *скорости* изменения входной

$$y = k \frac{dx}{dt}$$

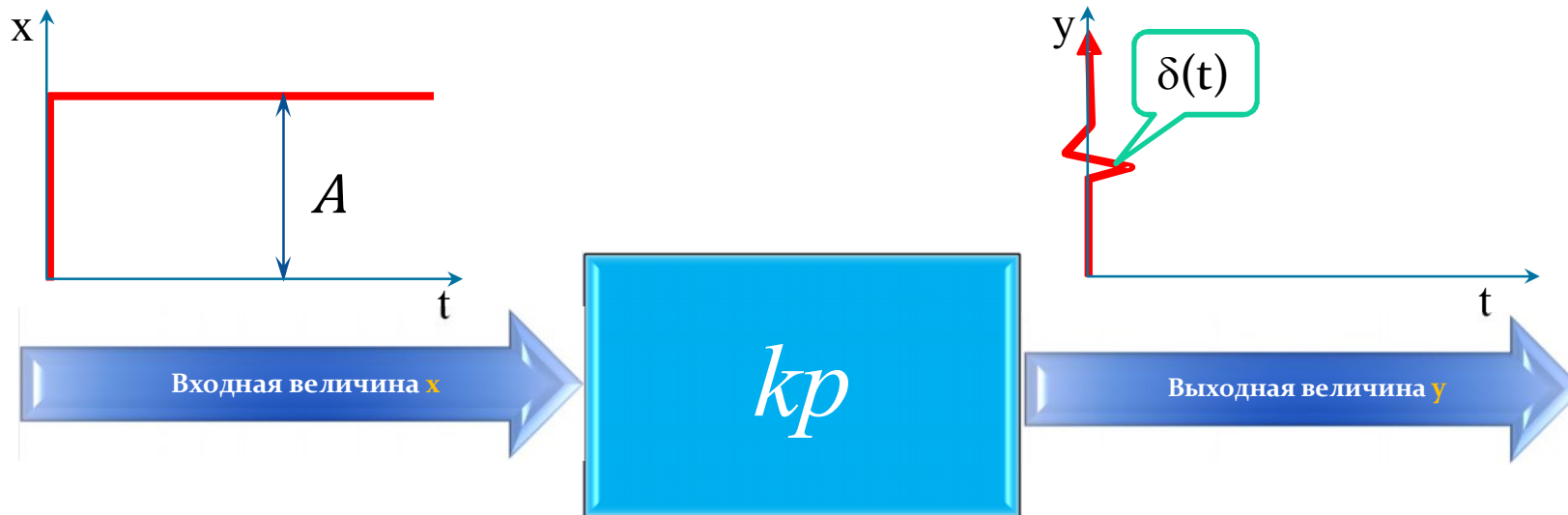
- Передаточная функция

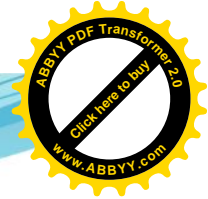
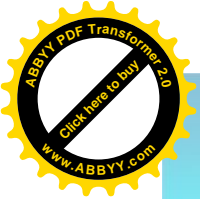
$$W(p) = kp$$





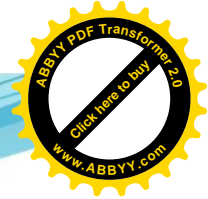
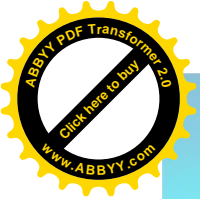
# График переходного процесса





# Автоматические регуляторы

- Основной характеристикой регулятора (*независимо от его конструкции и принципа действия*) является осуществляемый им **закон регулирования**
- В зависимости от закона регулирования различают следующие типы регуляторов:
  - - *позиционные*
  - - *пропорциональные (П-регулятор)*
  - - *пропорционально-интегральные (ПИ-регулятор)*
  - - *пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регулятор)*
  - *нечёткие*



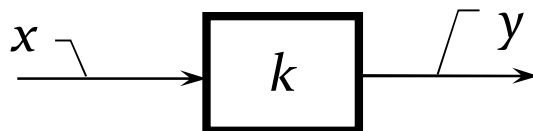
# Пропорциональный регулятор

- **Пропорциональными** называют такие регуляторы, у которых изменение **выходной** величины пропорционально изменению **входной**

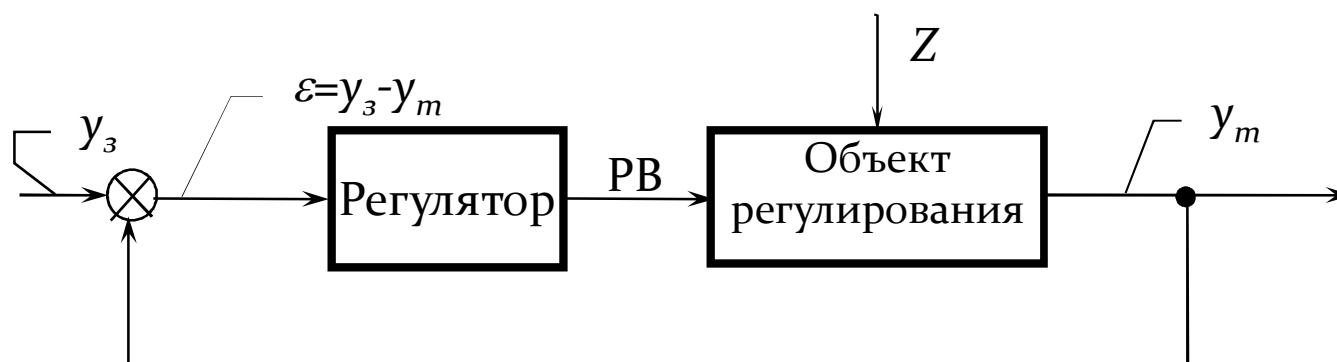
$$y=kx,$$

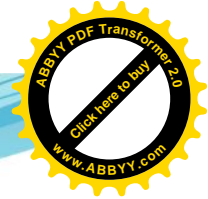
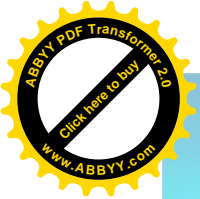
где  **$k$**  - коэффициент усиления регулятора, являющейся его параметром настройки

- Структурная схема:

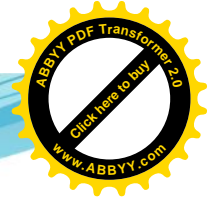
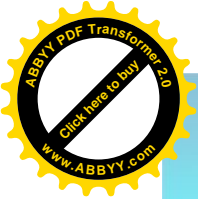


- Передаточная функция П-регулятора  $W(p)=k$
- П-регулятор является усилительным звеном
- Входной величиной регулятора является разность между текущим  $y_z$  и заданным  $y_m$  значениями регулируемой величины  $y_z - y_m$
- Выходным сигналом является *регулирующее воздействие* **PВ** (положение регулирующего органа)
- Структурная схема АСР





- Из уравнения  $y=kx$  следует, что каждому значению регулируемой величины соответствует только одно положение регулирующего органа
- Это свойство является причиной того, что в процессе регулирования П-регулятор при *изменениях нагрузки* объекта не обеспечивает *поддержание регулируемой величины на заданном значении*
- В зависимости от степени изменения нагрузки объекта новое установившееся регулируемой величины отличается от заданного на некоторую величину, называемую *остаточным отклонением*

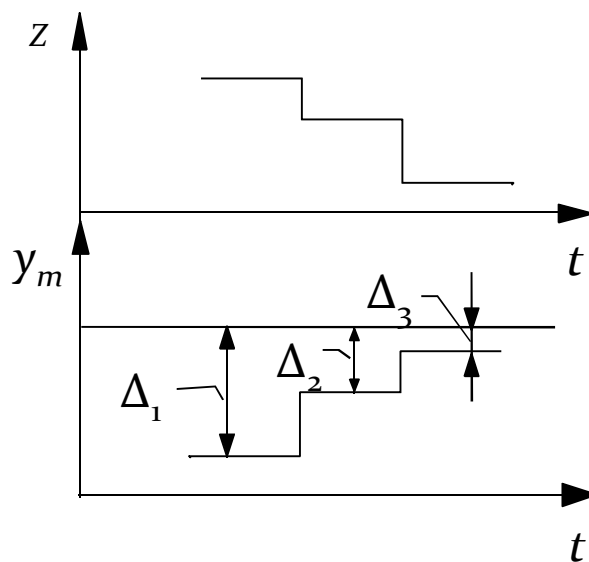


- Из структурной схемы видно, что в *статическом* режиме  $y_m = y_{уст}$  и  $PB = k (y_z - y_{уст})$
- После решения относительно текущего значения регулируемой величины получим

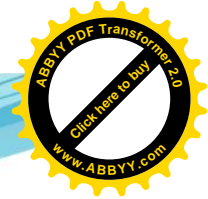
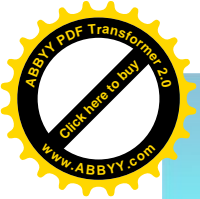
$$y_{уст} = y_z - \frac{PB}{k}$$

- Так как  $PB$  регулятора зависит от нагрузки объекта  $PB = f(z)$ , то и установившееся значение  $y_{уст}$  будет определяться величиной нагрузки  $z$ :

$$y_{уст} = y_z - \frac{f(z)}{k}$$



- ❑ Это обстоятельство ограничивает область применения П-регуляторов
- ❑ П-регуляторы применяются в объектах со *средней емкостью*, с *небольшим запаздыванием* и *при небольших изменениях нагрузки*



# Пропорционально-интегральный регулятор

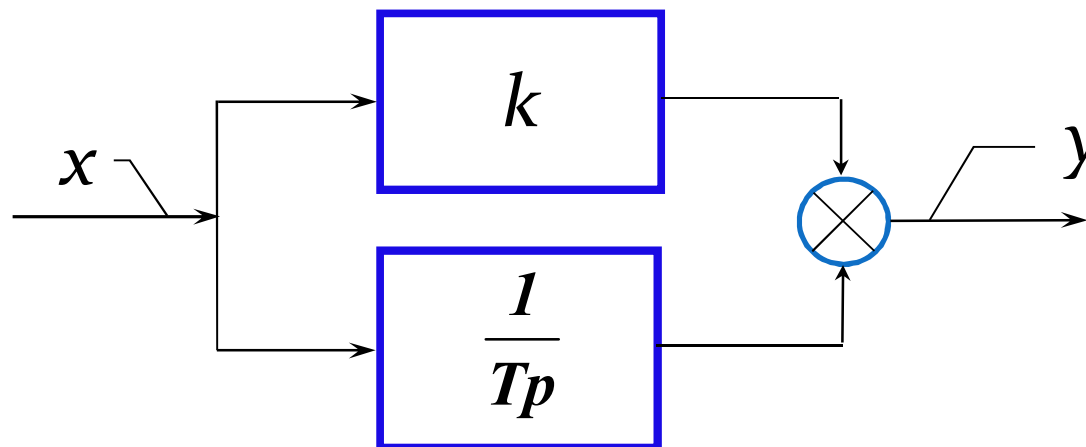
- *Пропорционально-интегральными* называются такие регуляторы, у которых изменение выходной величины пропорционально *отклонению* и *интегралу* отклонения входной величины:

$$y = kx + \frac{1}{T_u} \int_0^t x dt$$

- где  $k$  и  $T_u$  - соответственно *коэффициент усиления* и *постоянная времени регулятора*, являющиеся его параметрами настройки

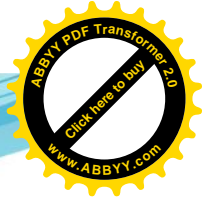
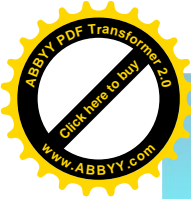


# Структурная схема



Передаточная функция:

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



# Временная характеристика ПИ-регулятора

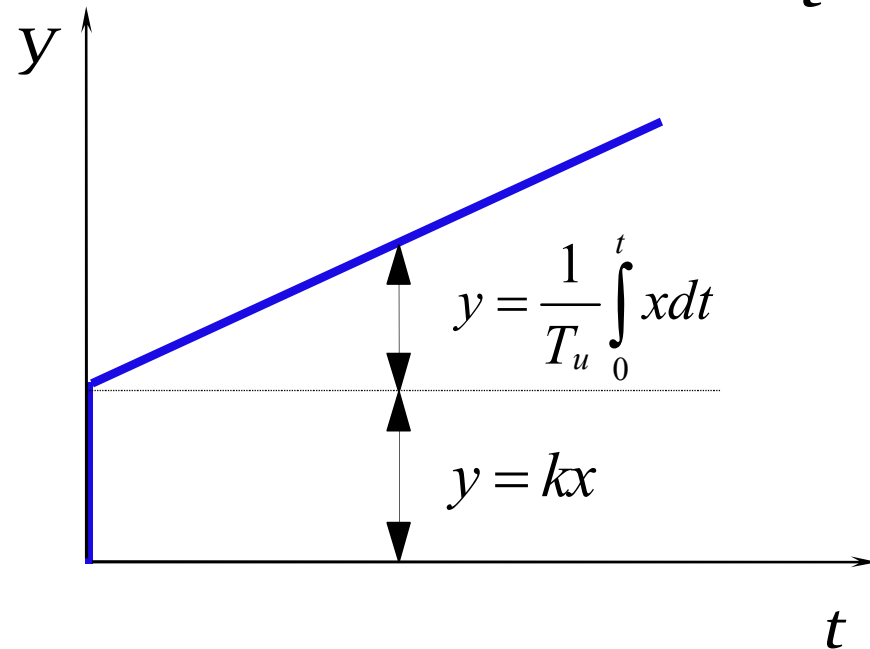
□ Из временной характеристики следует, что сначала выходная величина изменяется под действием

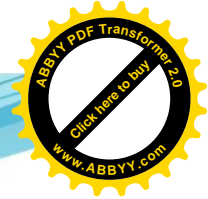
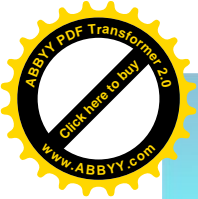
*пропорциональной*

составляющей, а затем под действием

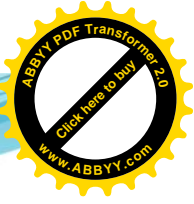
*интегральной*

□ Результирующее изменение  $Y$  представляет собой сумму воздействий П- и И-регуляторов





- ПИ-регулятор особенно пригоден для регулирования объектов с *изменяющейся нагрузкой*
- Плунжер регулирующего органа ПИ-регулятора для *поддержания регулируемой величины* может занимать *любое положение* в пределах его хода
- Регулятор поддерживает *регулируемую величину* на заданном значении при *изменениях нагрузки объекта*



- Из уравнения регулятора

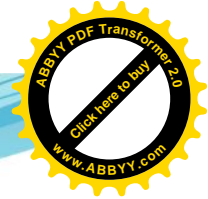
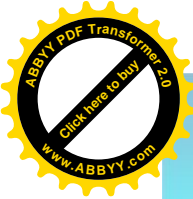
$$y = kx + \frac{1}{T_u} \int_0^t x dt$$

следует, что

$$\frac{dy}{dt} = \frac{d(kx)}{dt} = \frac{1}{T_u} (y_m - y_z)$$

и  $y_m = y_{уст} = y_z$

- ПИ-регулятор применяются в объектах с любой емкостью, с большим запаздыванием и большими, но медленными изменениями нагрузки



# Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

- Изменение выходной величины пропорционально *отклонению*, *интегралу* и *скорости отклонения* входной величины:

$$y = kx + \frac{1}{T_u} \int_0^t x dt + T_d \frac{dx}{dt}$$

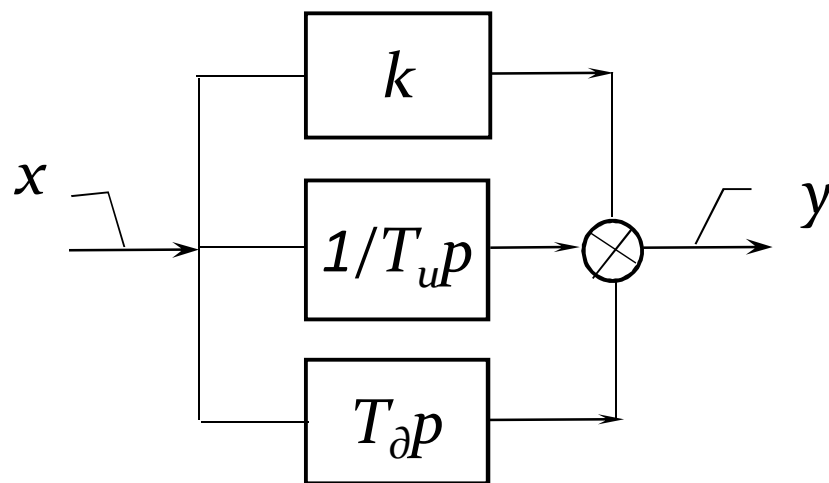
где  $k$  - коэффициент усиления

$T_u$  - постоянная времени

$T_d$  - время предварения регулятора

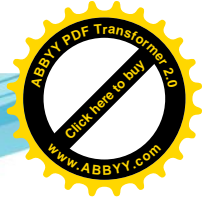
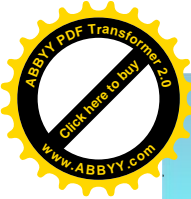
$k, T_u, T_d$  - являются параметрами настройки регулятора

# Структурная схема



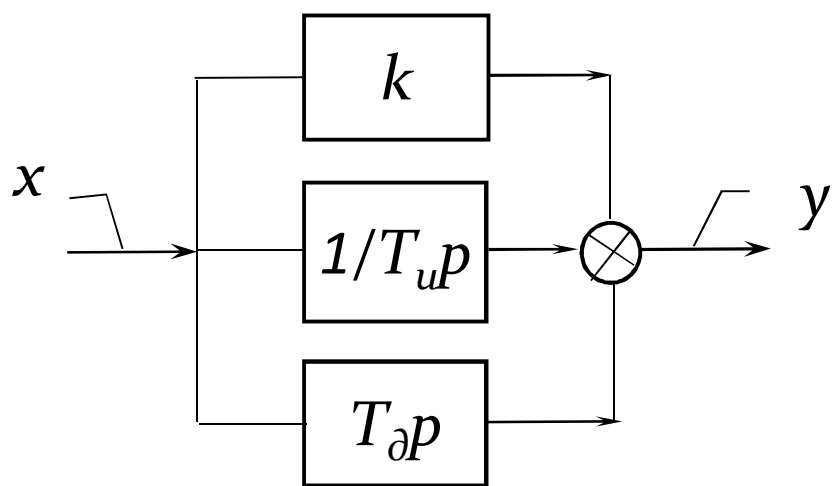
Передаточная функция:

$$W(p) = k + \frac{1}{T_u p} + T_d p$$



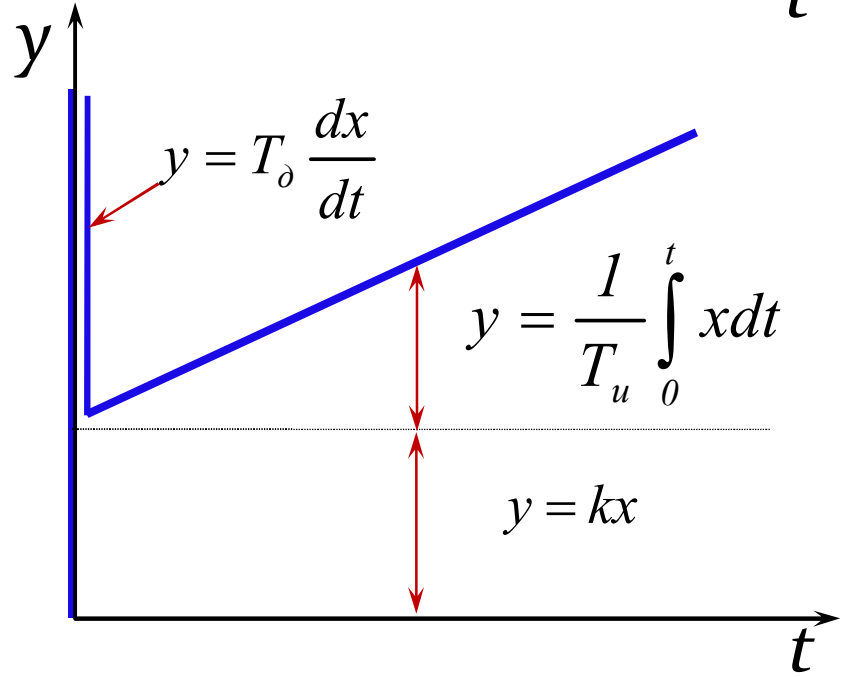
# Структурная схема

# Временная характеристика ПИД-регулятора

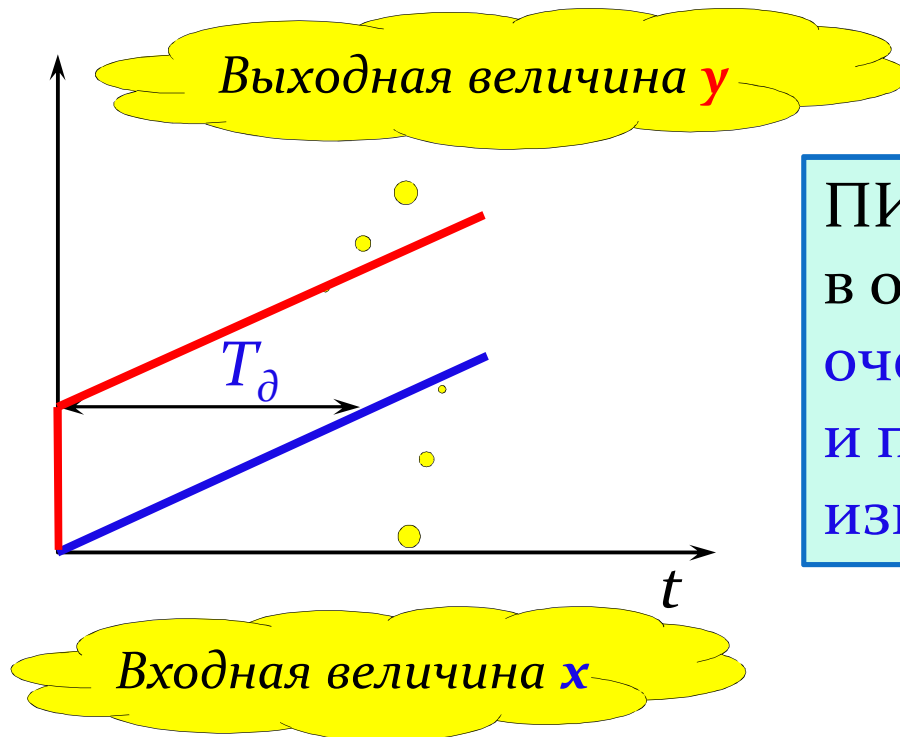


Передаточная функция:

$$W(p) = k + \frac{1}{T_u p} + T_d p$$



- Автоматические регуляторы с воздействием *по скорости отклонения* входной величины увеличивают *быстродействие* системы (позволяют завершать процесс регулирования в более короткое время)
- Регуляторы как бы “*предваряют*” большие отклонения регулируемой величины за счет некоторого *опережения* изменения выходного сигнала по отношению к входному



ПИД-регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с очень большим запаздыванием и при больших и резких изменениях нагрузки