ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Курс читает: Годовников Евгений Александрович

План курса

1.Комплексные числа (напоминание).

2.Общие сведения о системах управления.

3. Математические модели.

4. Типовые динамические звенья.

5. Структурные схемы.

6. Анализ систем автоматического управления

Комплексные числа

$z = x + i \cdot y$ - алгебраическая форма записи комплексного числа, где $i = \sqrt{-1}$, x – действительная часть комплексного числа, y–мнимая часть комплексного числа.

$Z = |z| \cdot e^{i \cdot \varphi}$ - показательная форма записи комплексного числа, где $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$- модуль комплексного числа, $\varphi = arctg\left(\frac{y}{x}\right)$ - аргумент комплексного числа.

$Z = |z| \cdot (\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi))$ - тригонометрическая форма записи комплексного числа, где $x = |z| \cdot \cos(\varphi)$, $y = |z| \cdot \sin(\varphi)$

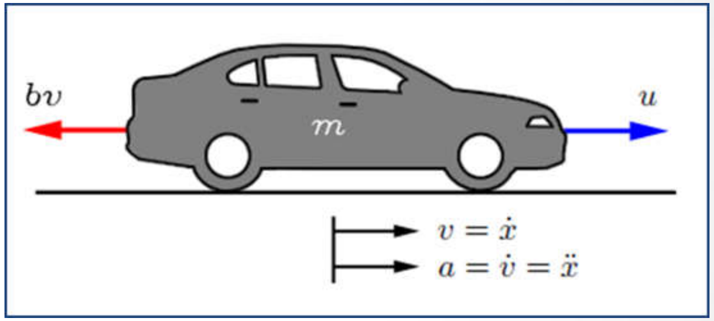
Теория автоматического управления (ТАУ):

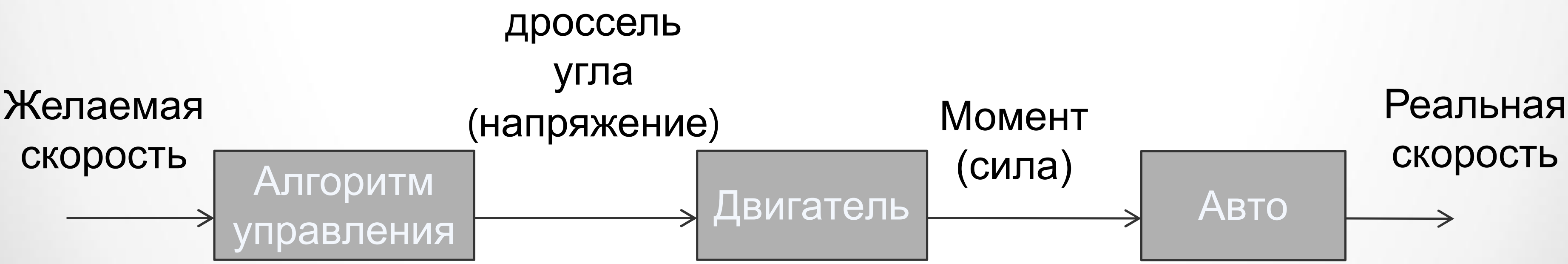
1. Принцип управления (как нужно управлять).
2. Математические модели.
3. Устойчивость работы.
4. Качество управления.
5. Синтез систем

Общие сведения о системах управления

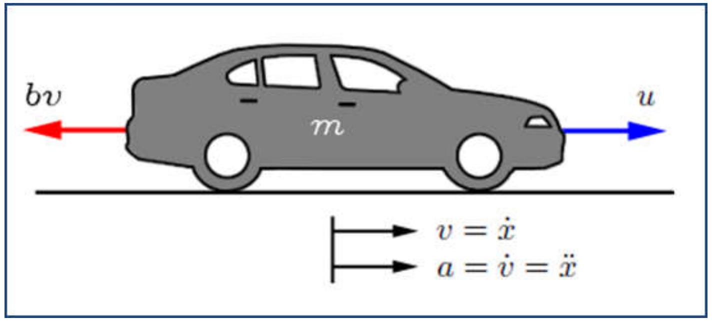
Системы управления

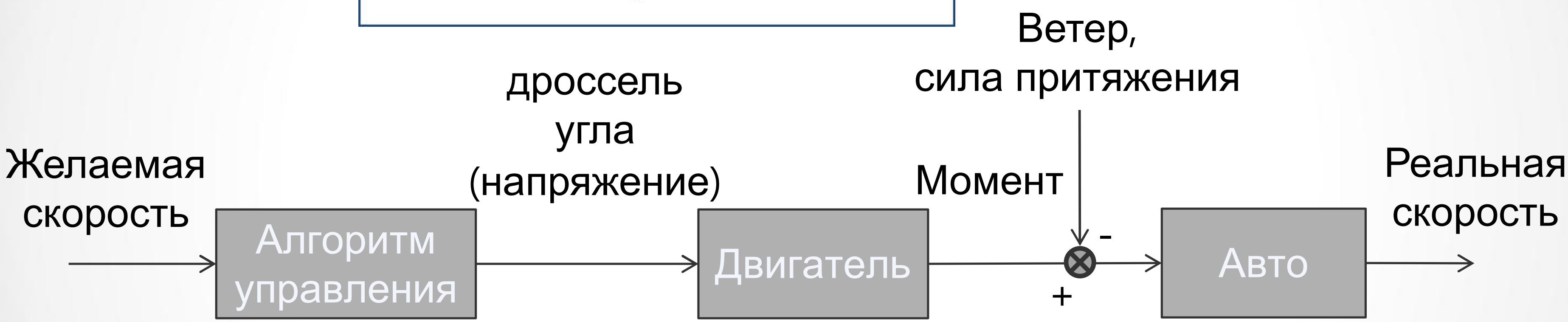
- Например: круиз-контроль





Разомкнутая система (Open-loop Control)

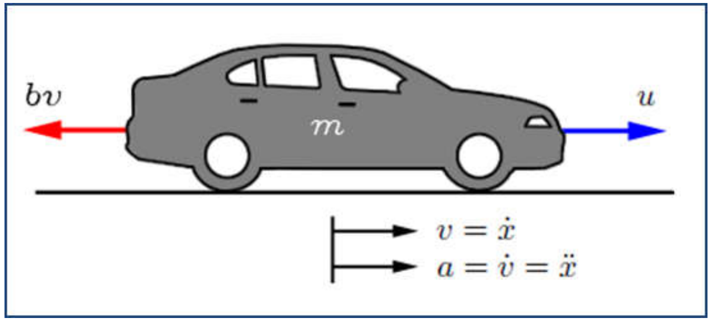


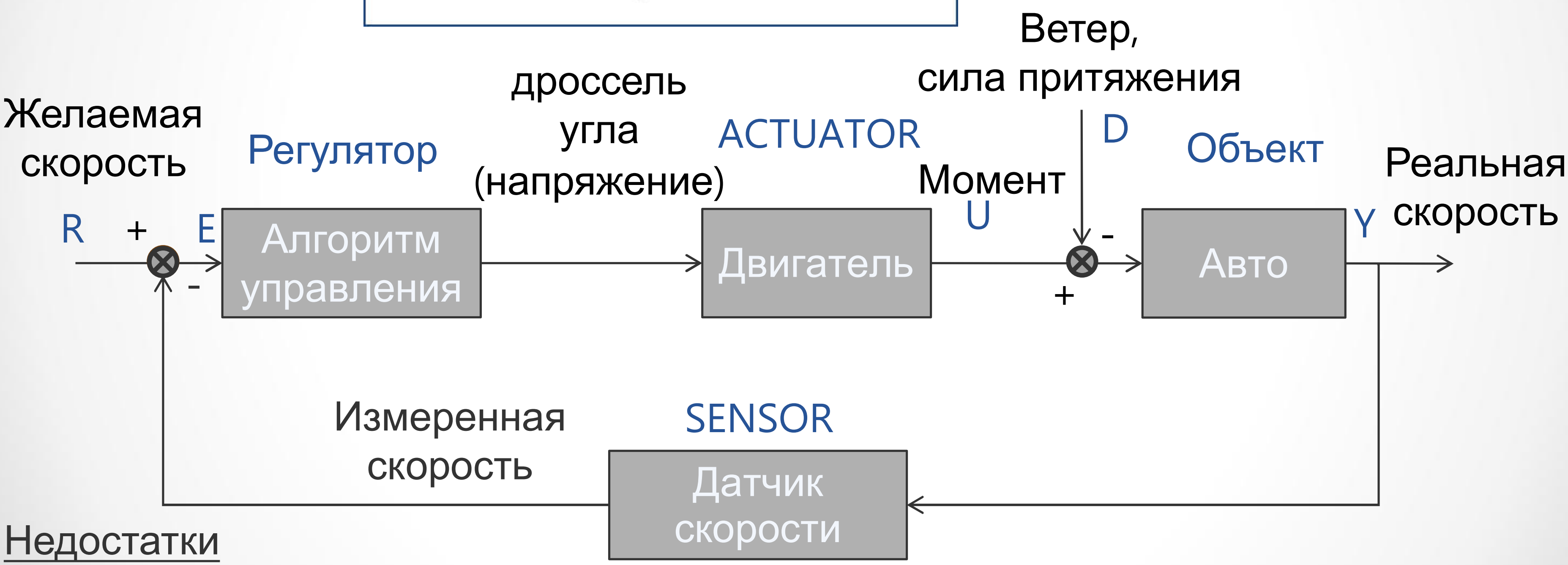


<u>Недостатки</u>
- Чувствительна к изменению параметров
- Чувствительна к возмущениям
- Нуждается в периодической настройке

<u>Достоинства</u>
- Проста в разработке
- не дорогая
- не влияет на устойчивость
- быстрая отработка задания

Замкнутая система (Closed-loop Control)





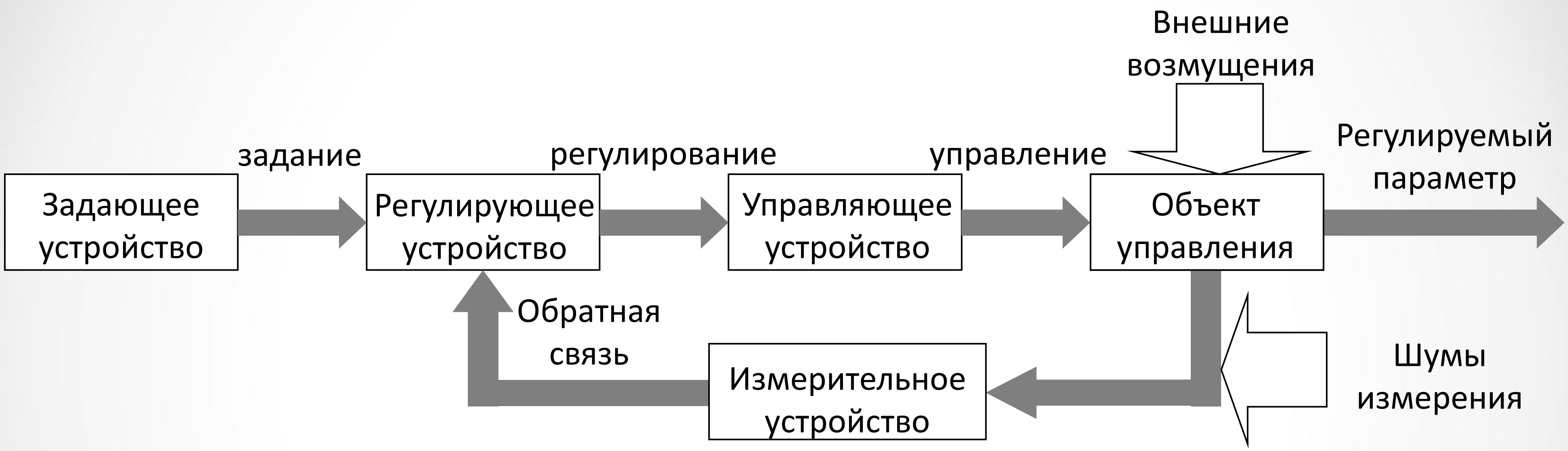
<u>Недостатки</u>

- Сложность
- Дороговизна
- Возможна потеря устойчивости
- Возможна медленная отработка задания

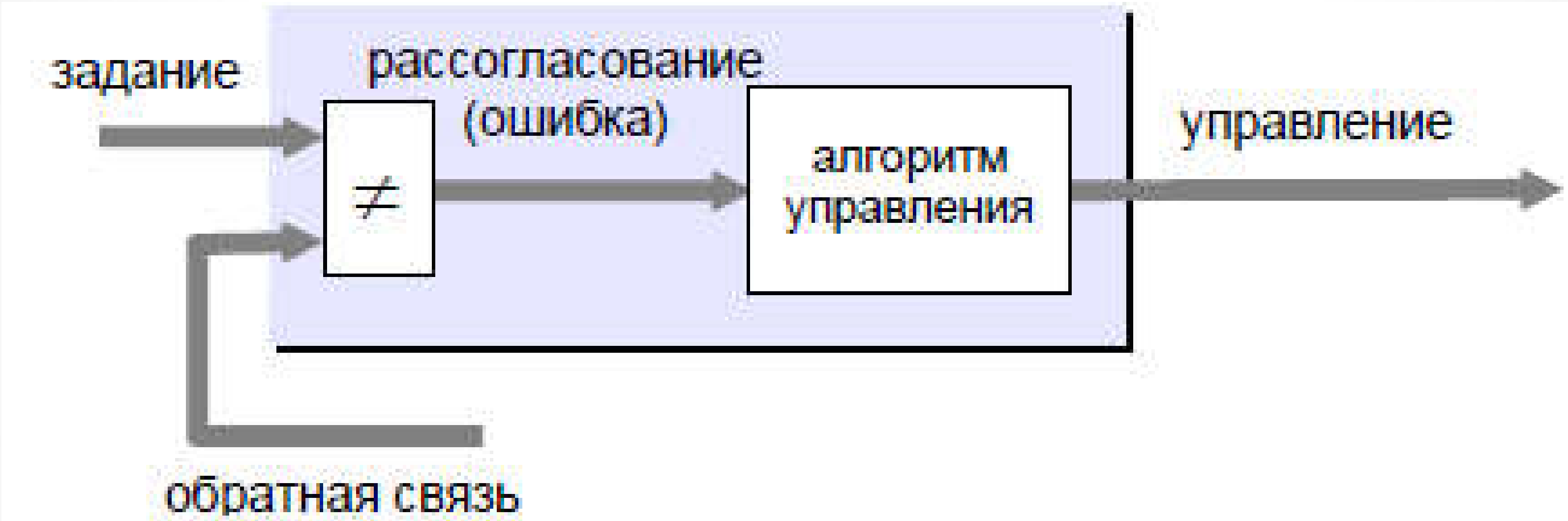
<u>Достоинства</u>

- Не чувствительна к изменению параметров
- Не чувствительна к возмущениям

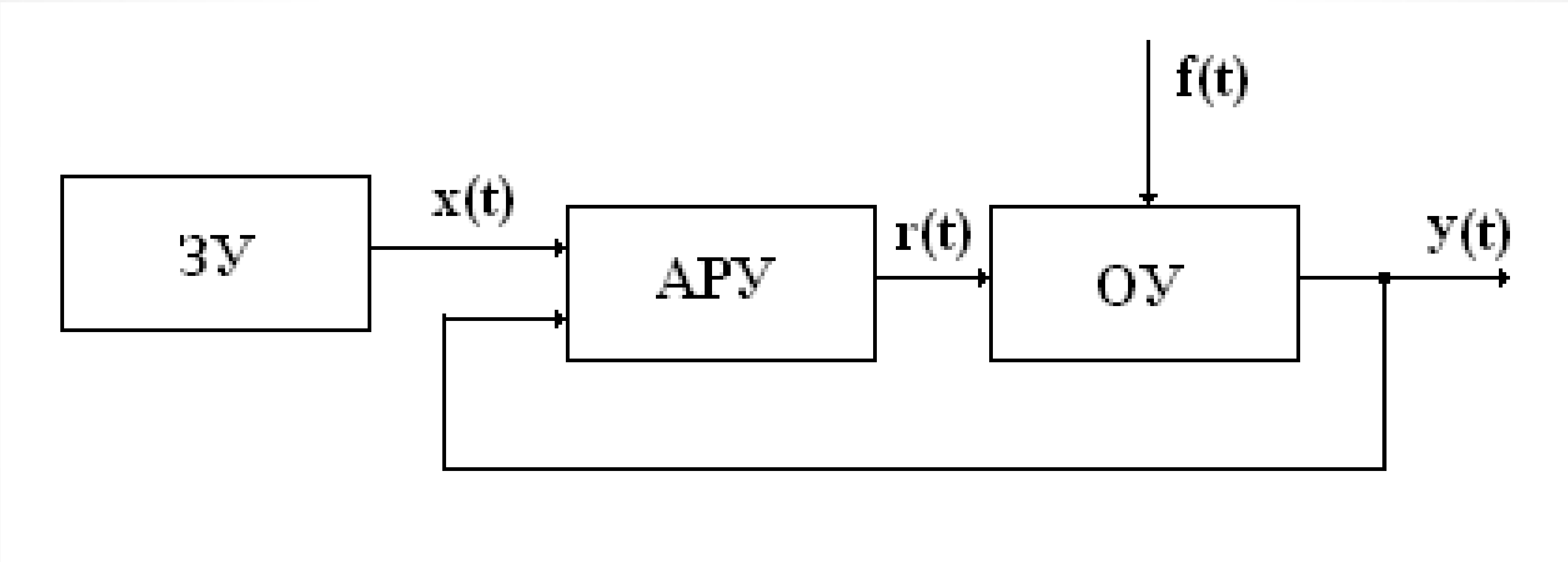
Система управления
(из чего состоит?)



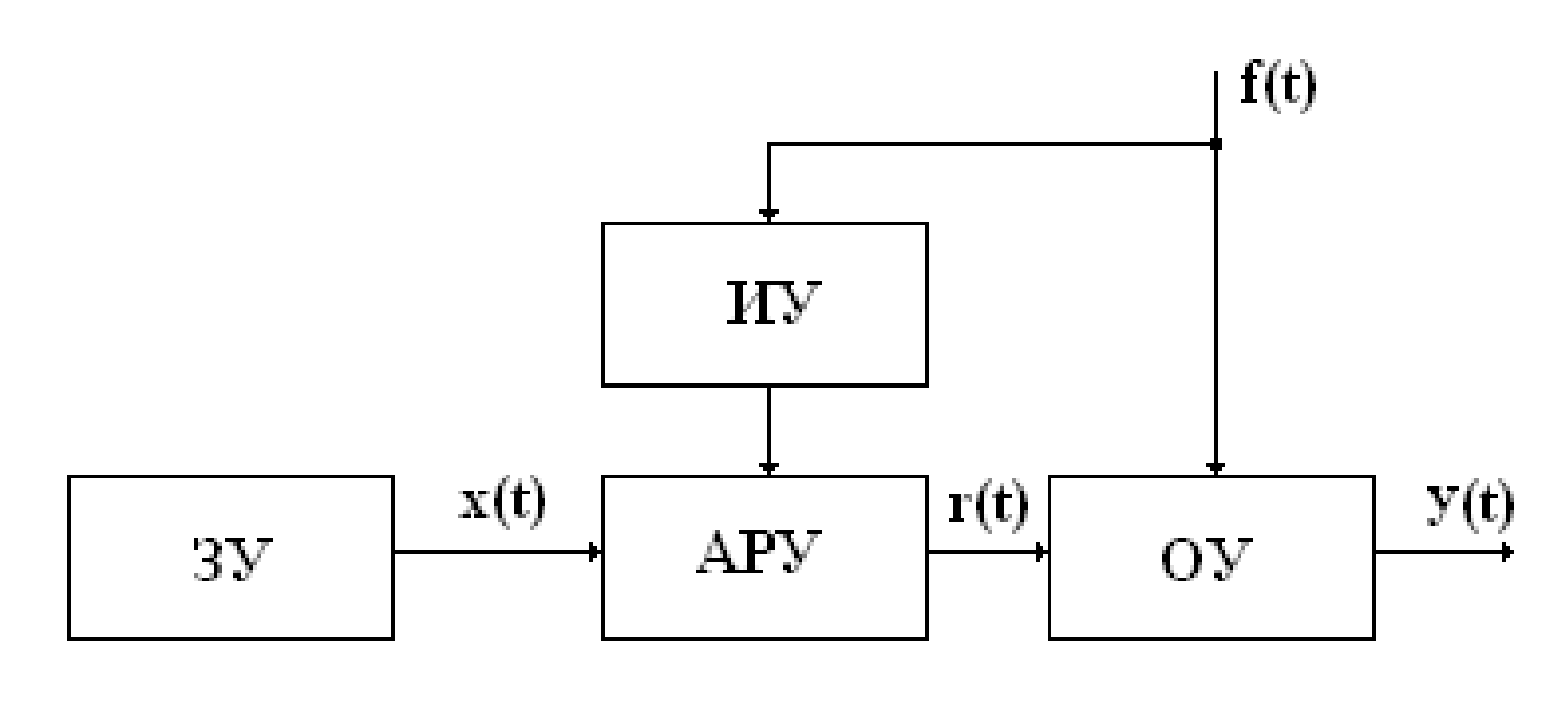
Система управления (регулятор)



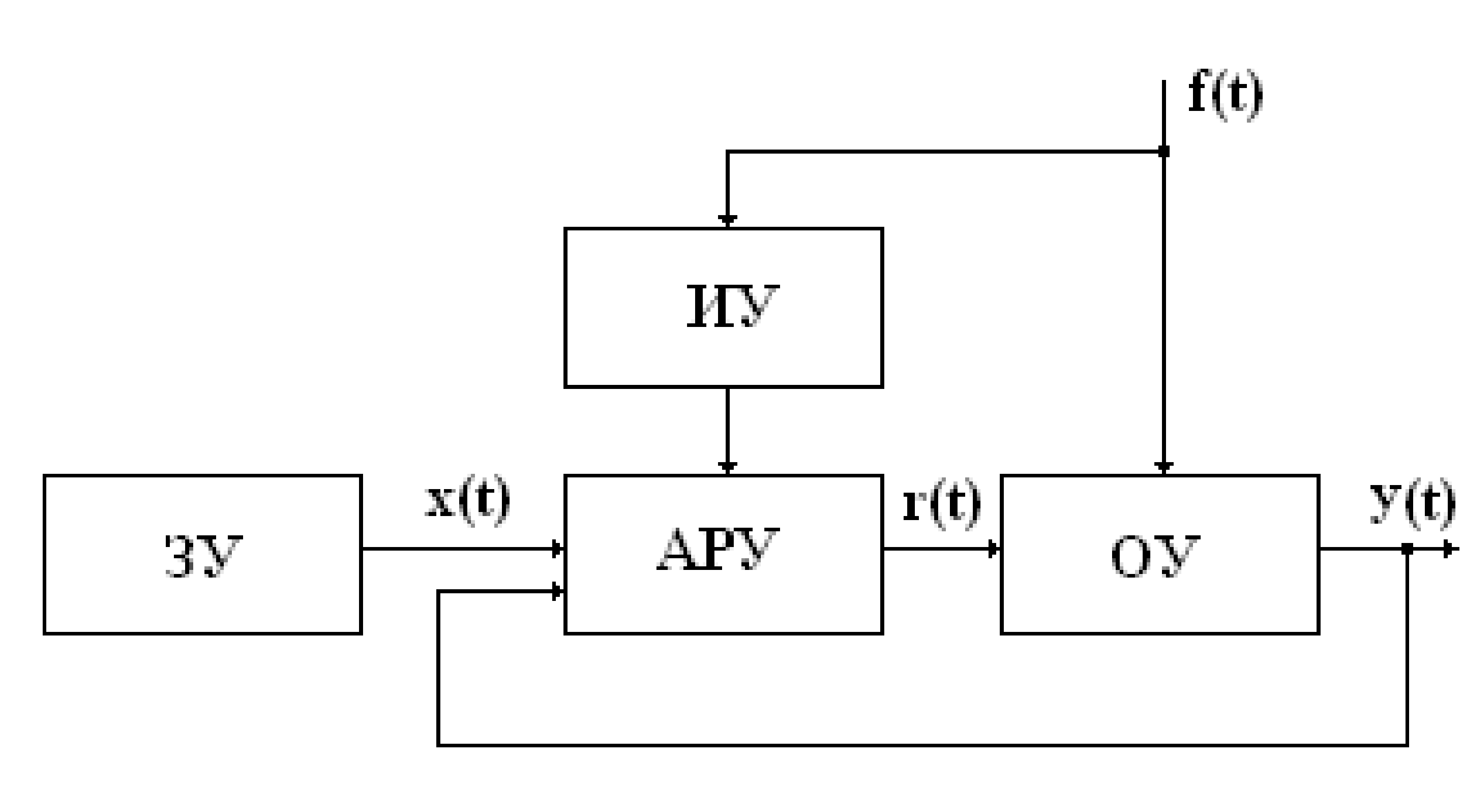
Классификация систем управления (СУ по отклонению)



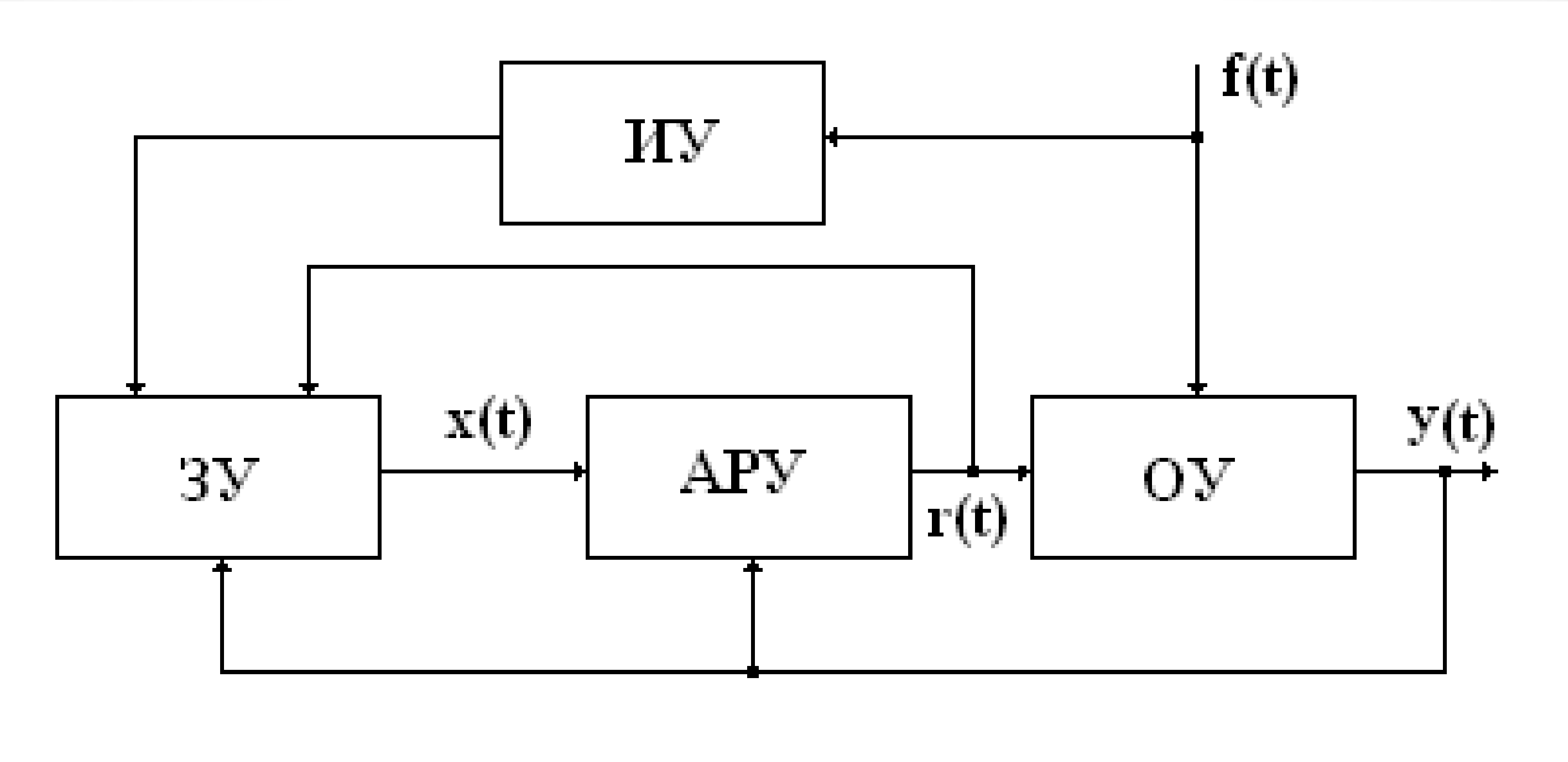
Классификация систем управления (СУ по возмущению)



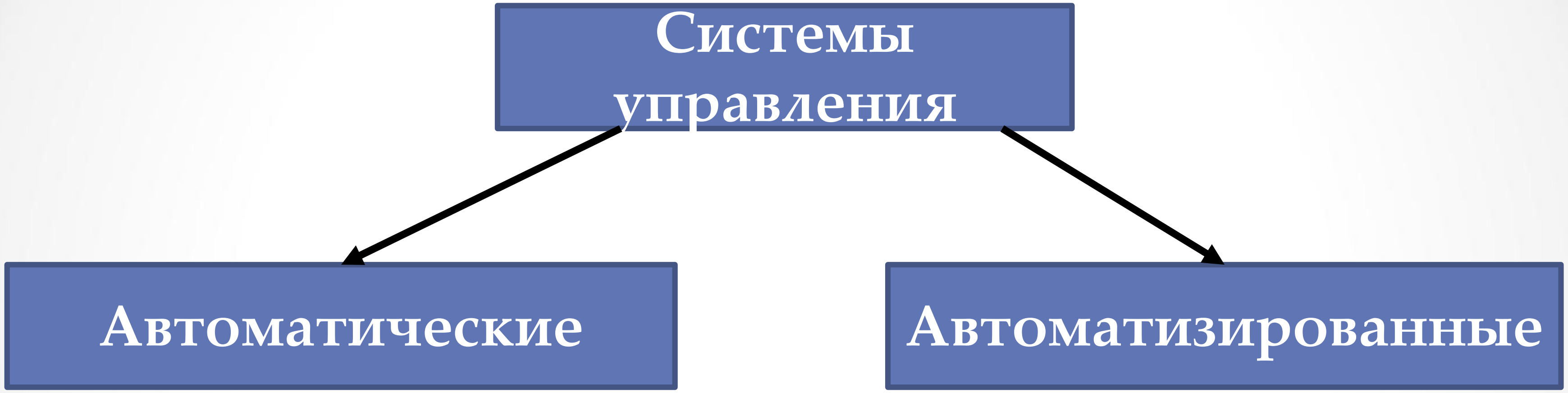
Классификация систем управления (СУ с комбинированным управлением)



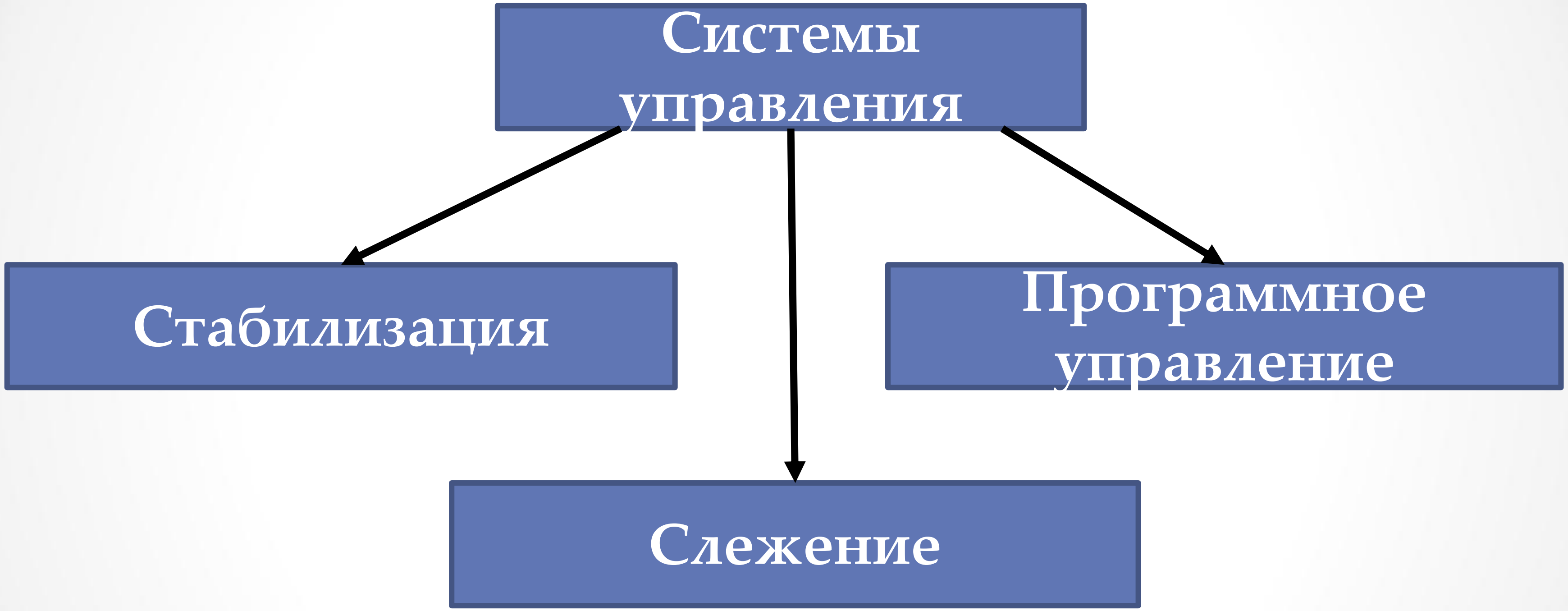
Классификация систем управления (адаптивная СУ)



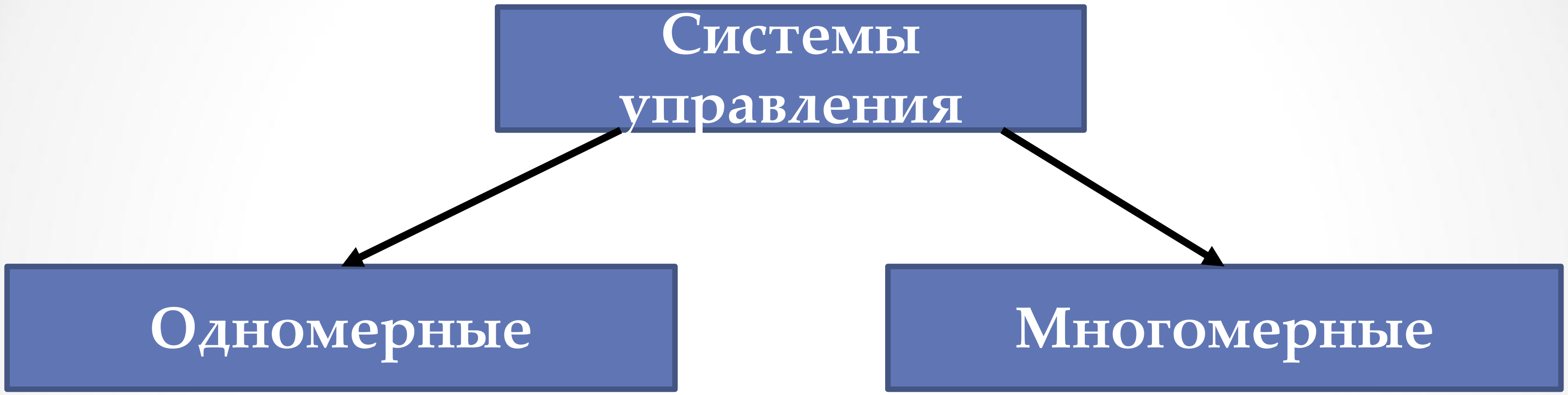
Классификация систем управления (Уровень автоматизации)



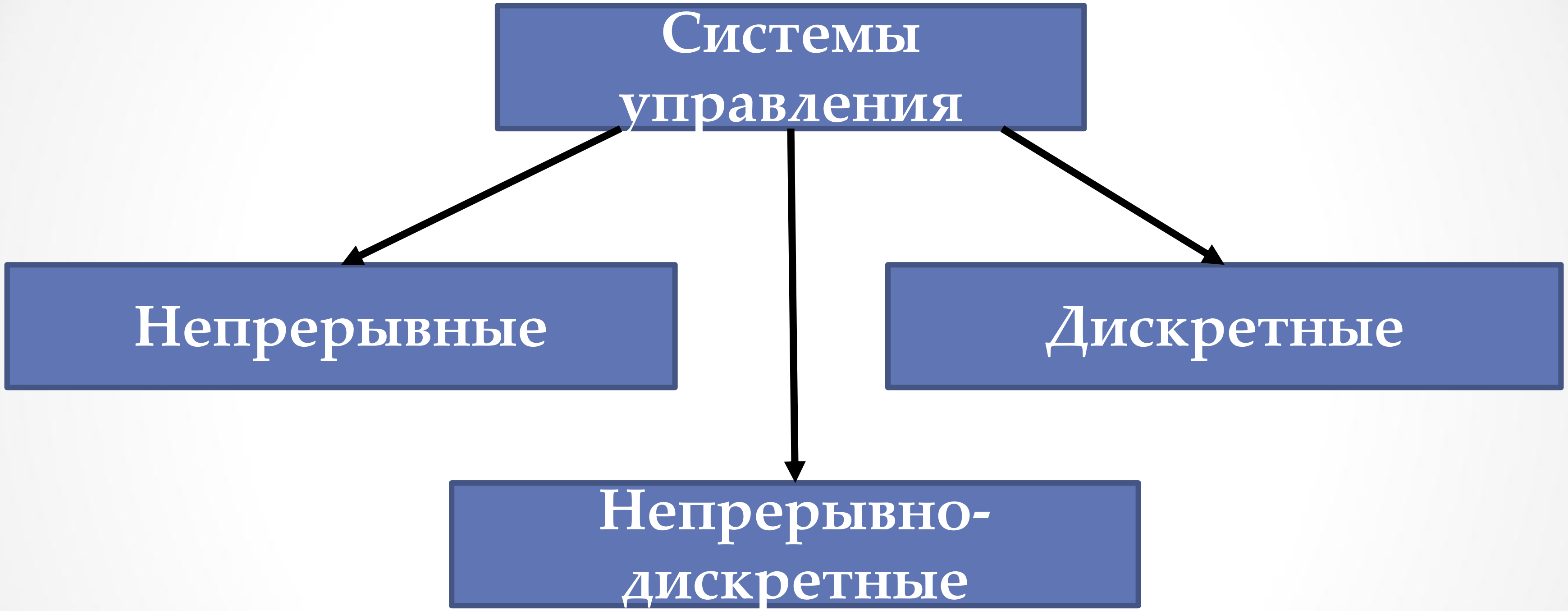
Классификация систем управления (Задачи систем управления)



Классификация систем управления (По количеству входов и выходов)



Классификация систем управления (Характер сигналов системы)



Классификация систем управления (Характер сигналов системы)

Системы

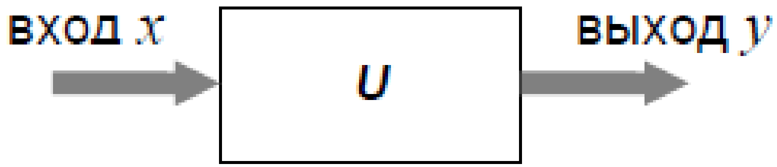
- Автоматического управления (САУ)
- Автоматического регулирования (САР)

Математические модели

Линейность и нелинейность

Цель любого управления – изменить состояние объекта нужным образом.

Модель – это объект, который используется для изучения другого объекта (оригинала).



Оператор

Линейный | **Нелинейный**

Свойства:

$$U[\alpha \cdot x] = \alpha \cdot U[x]$$

$$U[x_1 + x_2] = U[x_1] + U[x_2]$$

Описание элементов

Режимы

Статический | **Динамический**

Способы описания динамических свойств:

-Дифференциальные уравнения;

-Передаточные функции *W(p)*;

-Временные функции;

-Частотные характеристики.

Дифференциальные уравнения

$$a_2 y^{(2)}(t) + a_1 y^{(1)}(t) + a_0 y(t) = b_2 x^{(2)}(t) + b_1 x^{(1)}(t) + a_0 x(t)$$

Здесь:

$y(t)$ – временная функция выходного сигнала;

$x(t)$ – временная функция входного сигнала;

$y^{(j)}(t)$ – j-я производная функции $y(t)$;

$x^{(j)}(t)$ – j-я производная функции $x(t)$;

a_m, b_m – постоянные коэффициенты уравнения при соответствующих переменных.

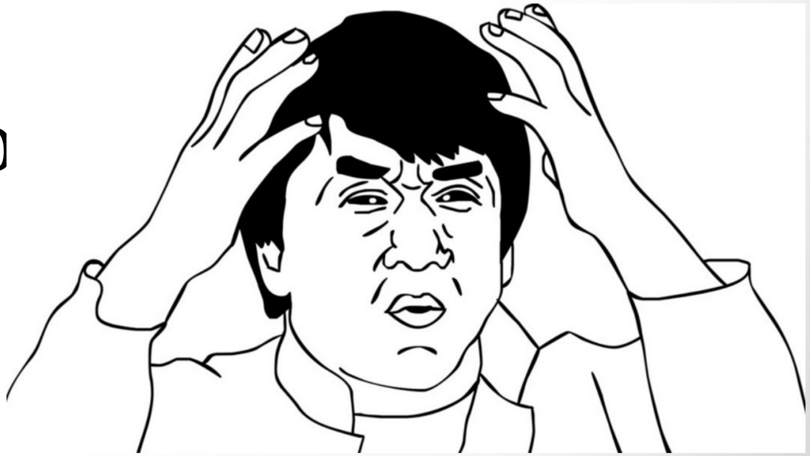
Преобразования Лапласа

Прямое преобразование Лапласа

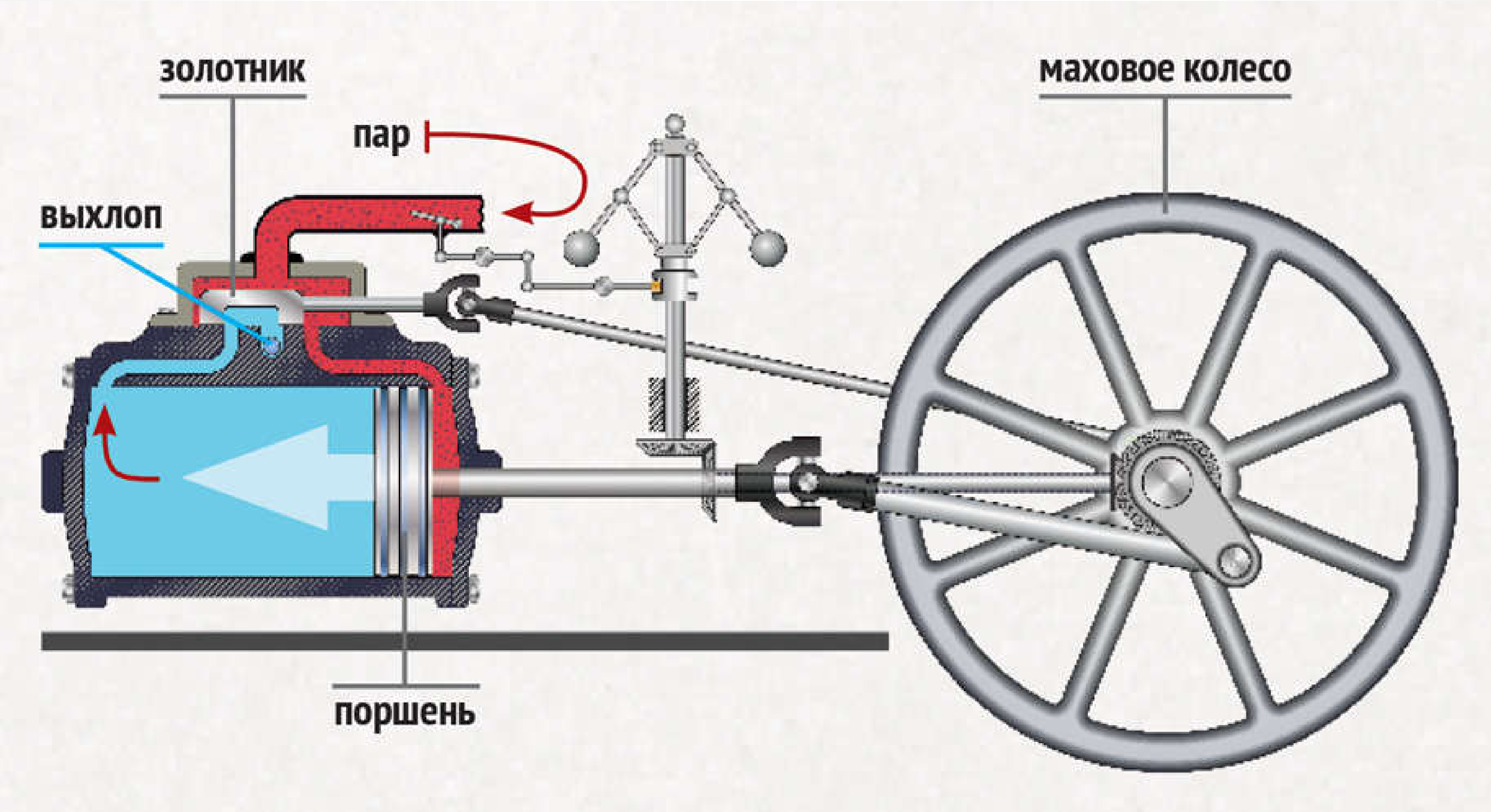
$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st}dt \qquad Y(s) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st}dt$$

Обратное преобразование Лапласа

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t}d\omega$$



Паровая машина Уатта



Уравнения движения

- Примем:
  - ω – скорость вращения маховика,
  - u – перемещение муфты регулятора,
- Уравнение движения регулятора:

$$\Delta\ddot{u} = -A \cdot \Delta u - B \cdot \Delta\dot{u} + C \cdot \Delta\omega,$$

где $A \cdot \Delta u$ – сила тяжести, $B \cdot \Delta\dot{u}$ – сила вязкого трения, $C \cdot \Delta\omega$ – центробежная сила.

- Уравнение движения маховика:

$$\Delta\dot{\omega} = -M \cdot \Delta u,$$

где M – постоянная, включающая инерцию маховика и расход пара.

Уравнения движения

- Уравнение: $\dddot{\Delta u} + B \cdot \ddot{\Delta u} + A \cdot \dot{\Delta u} + CM \cdot \Delta u = 0$
- Решение: $\Delta u(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + C_3 e^{\lambda_3 t}$
- Характеристическое уравнение: $\lambda^3 + B\lambda^2 + A\lambda + CM = 0$
- Сделаем замены $\tilde{\lambda} = \dfrac{\lambda}{\sqrt[3]{CM}}, x = \dfrac{B}{\sqrt[3]{CM}}, y = \dfrac{A}{(CM)^{2/3}}$
- Получаем уравнение:

$$P(\tilde{\lambda}) = \tilde{\lambda}^3 + x \cdot \tilde{\lambda}^2 + y \cdot \tilde{\lambda} + 1 = 0$$

Передаточная функция

Передаточная функция $W(p)$ есть отношение выходного сигнала к входному сигналу, представленное в операторной форме:

$$W(p) = \frac{\text{выход}}{\text{вход}} = \frac{y(p)}{x(p)}$$

Заменим d/dt на оператор Лапласа – p и получим:

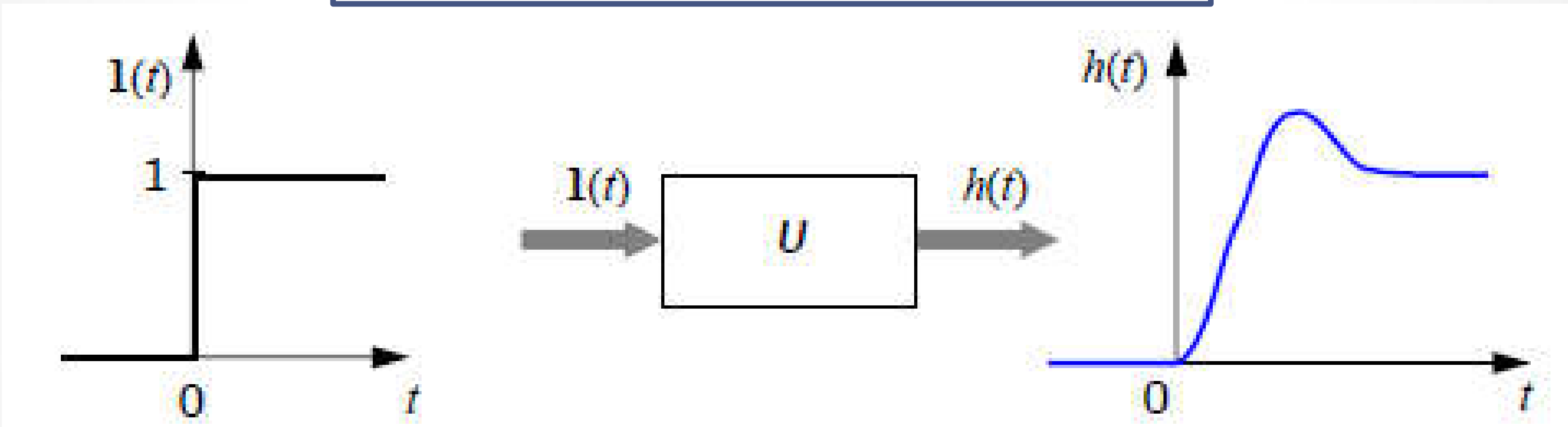
$$W(p) = \frac{\text{выход}}{\text{вход}} = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_2 p^2 + b_1 p^1 + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p^1 + a_0}$$

$$= \frac{(b_0 / a_0) \cdot (b_2 / b_0 p^2 + b_1 / b_0 p^1 + 1)}{a_2 / a_0 p^2 + a_1 / a_0 p^1 + 1}$$

Переходная характеристика

$$1(t)=\begin{cases}0, & t<0\\ 1, & t\geq 0\end{cases}$$

Единичный ступеньчатый сигнал

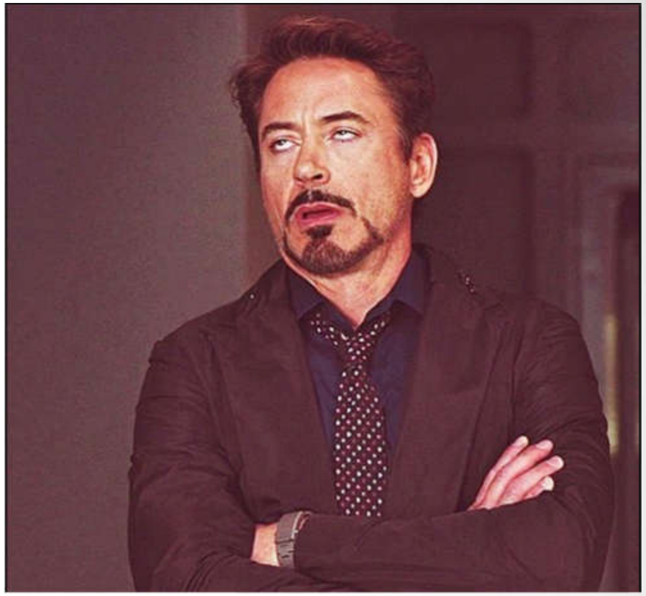


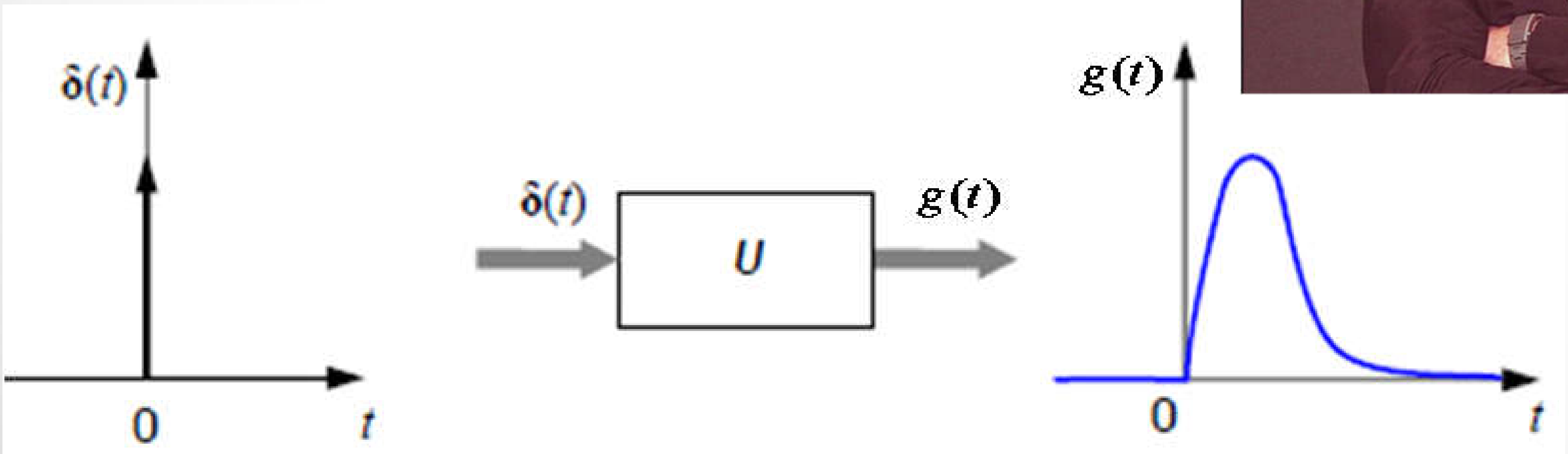
$$W(p)=\frac{y(p)}{x(p)}\Rightarrow L\{h(t)\}=H(p)=W(p)\cdot\frac{1}{p}$$

Импульсная характеристика (весовая функция)

$$\delta(t)=\begin{cases}\infty, & t=0\\ 0, & t\neq 0\end{cases},\qquad \int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\,dt=1.$$

Единичный импульсный сигнал





$$W(p)=\frac{y(p)}{x(p)}\Rightarrow L\{g(t)\}=G(p)=W(p)\cdot 1$$

Разложение дроби на сумму элементарных дробей

Имеем рациональную дробь *R(x)* вида:

$$R(x) = \frac{P_n(x)}{Q_m(x)} = \frac{a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n}{b_0x^m + b_1x^{m-1} + \ldots + b_{m-1}x + a_m},$$

где степени $m>n$.

Дробь такого вида можно представить, притом единственным образом, в виде суммы элементарных дробей:

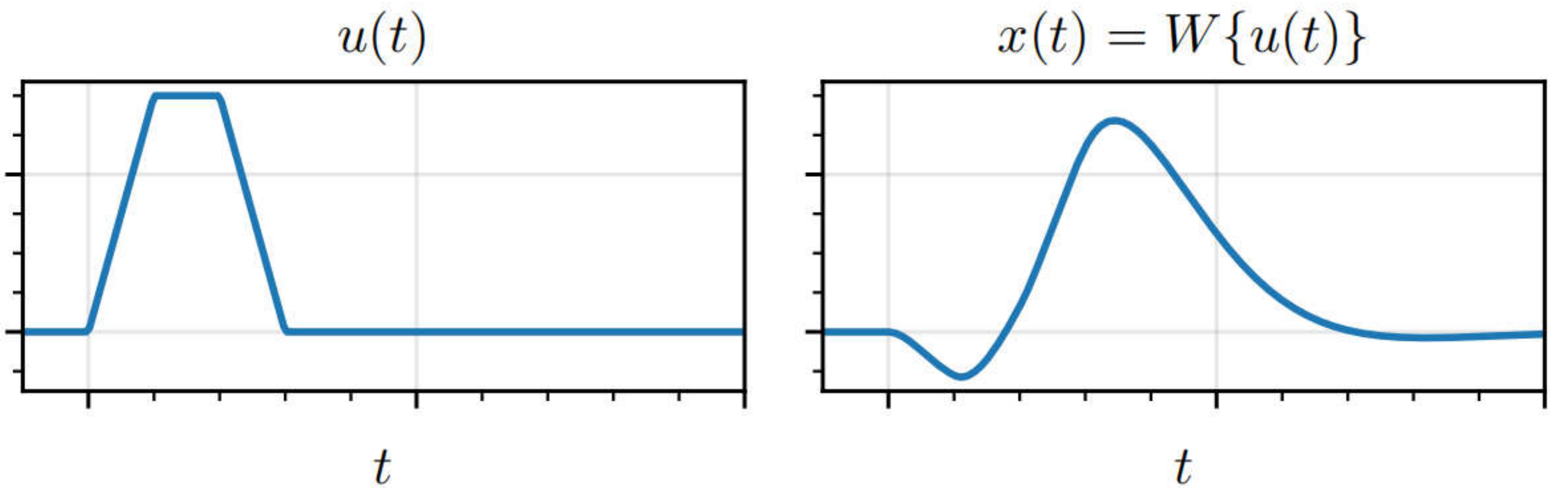
$$R(x) = \frac{P_n(x)}{Q_m(x)} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k_n}\frac{A_{ij}}{(x-x_i)^j} + \sum_{l=1}^{m}\sum_{t=1}^{s_m}\frac{B_{lt} + C_{lt}x}{(x^2 + p_l x + q_l)^t}.$$

где A, B, C — некоторые действительные коэффициенты, обычно вычисляемые с помощью метода неопределённых коэффициентов.

Определение

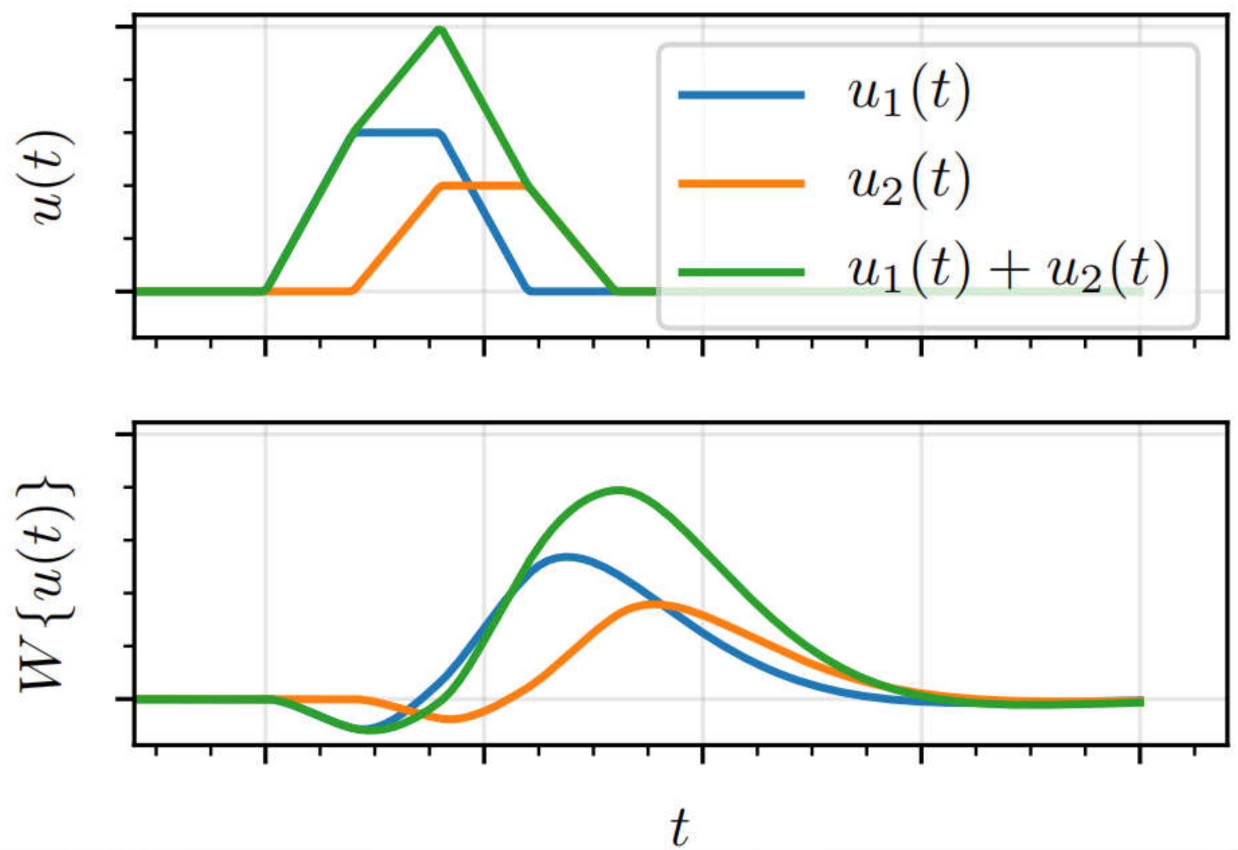
Динамическое звено W – это оператор $W : \mathbb{D}' \to \mathbb{D}'$ со следующими свойствами:

- линейность,
- причинность,
- стационарность (не всегда).



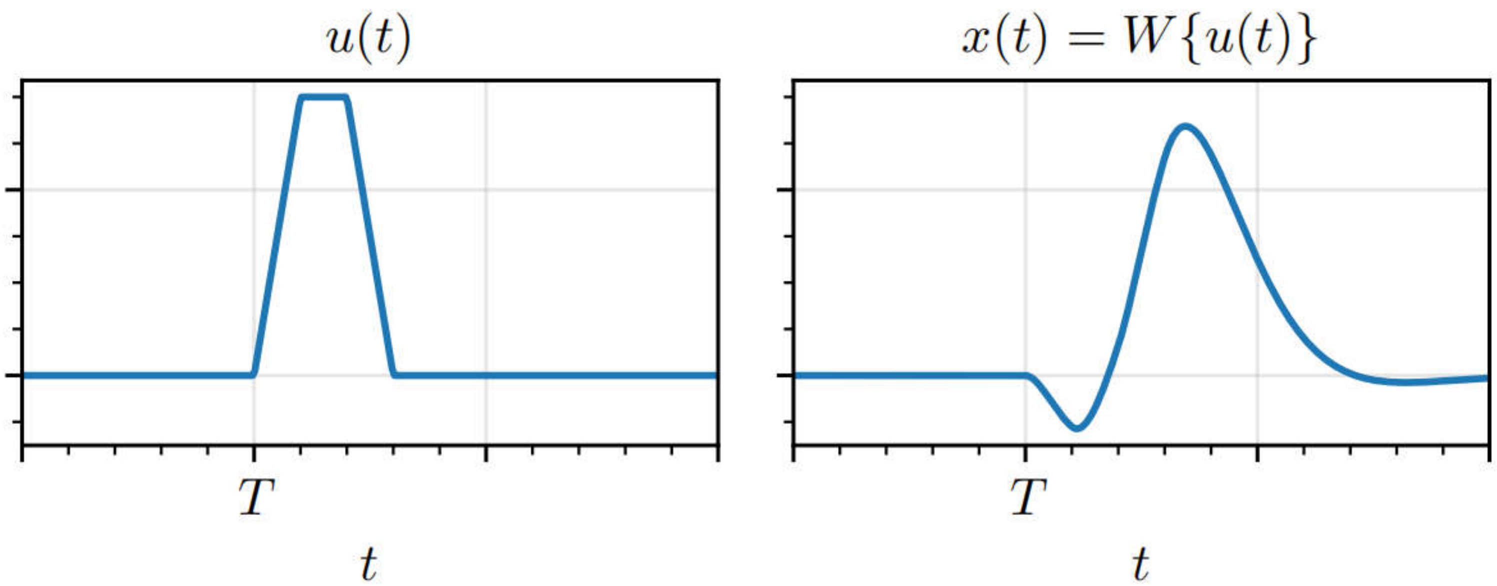
Линейность

$$W\{\alpha \cdot u(t) + \beta \cdot v(t)\} = \alpha \cdot W\{u(t)\} + \beta \cdot W\{v(t)\}$$



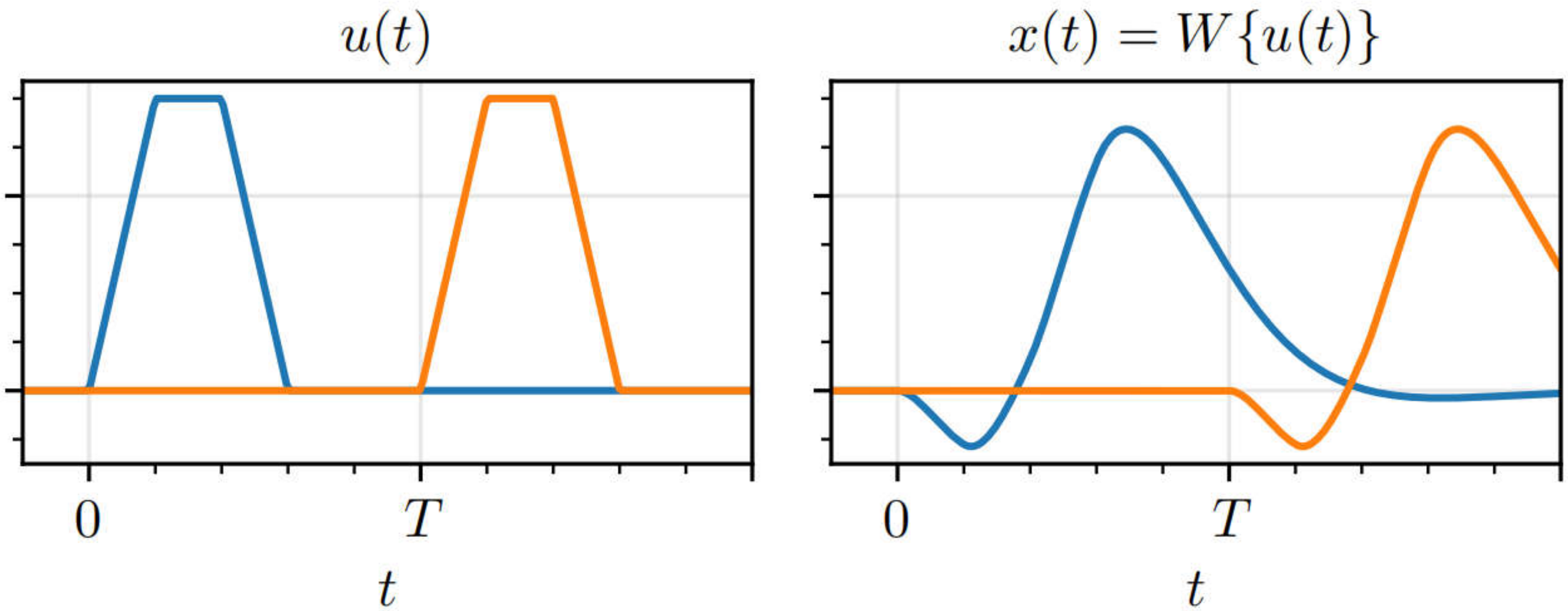
Причинность

- Из $u(t) = 0$ при $t < T$ следует $x(t) = 0$ при $t < T$
- Т.е. звено W не является оракулом, при формировании текущего выхода $x(t)$ оно не угадывает будущие значения входящего сигнала $u(t)$.



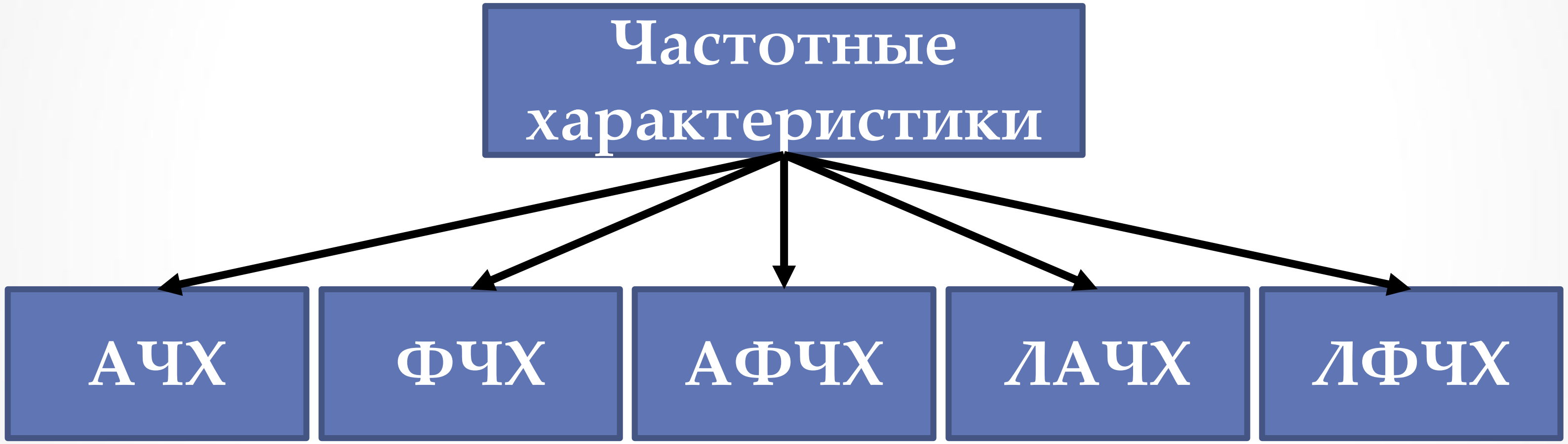
Стационарность

- Из $x(t) = W\{u(t)\}$ следует $x(t-T) = W\{u(t-T)\}$ для всех T.
- Т.е. при сдвиге входного сигнала по времени на T, выходной сигнал так же сдвигается на время T.



Частотные характеристики

Частотные характеристики САУ характеризуют реакцию систем на синусоидальное входное воздействие в установившемся режиме.



$$x(t) = \sin(\omega \cdot t) \;\Rightarrow\; y(t) = A(\omega) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi(\omega))$$

Частотные характеристики

Зная передаточную функцию *W(p)*, можно получить амплитудно-фазовую частотную характеристику, путем замены оператора Лапласа – *p*, на мнимое число – *jw*.

$$W(p) \Rightarrow замена\ \langle p = j\omega \rangle \Rightarrow W(j\omega)$$

- АФЧХ

$$W(j\omega) = |W(j\omega)| \cdot e^{j \cdot \arg(W(j\omega))} = N(\omega) + j \cdot M(\omega)$$

- АЧХ

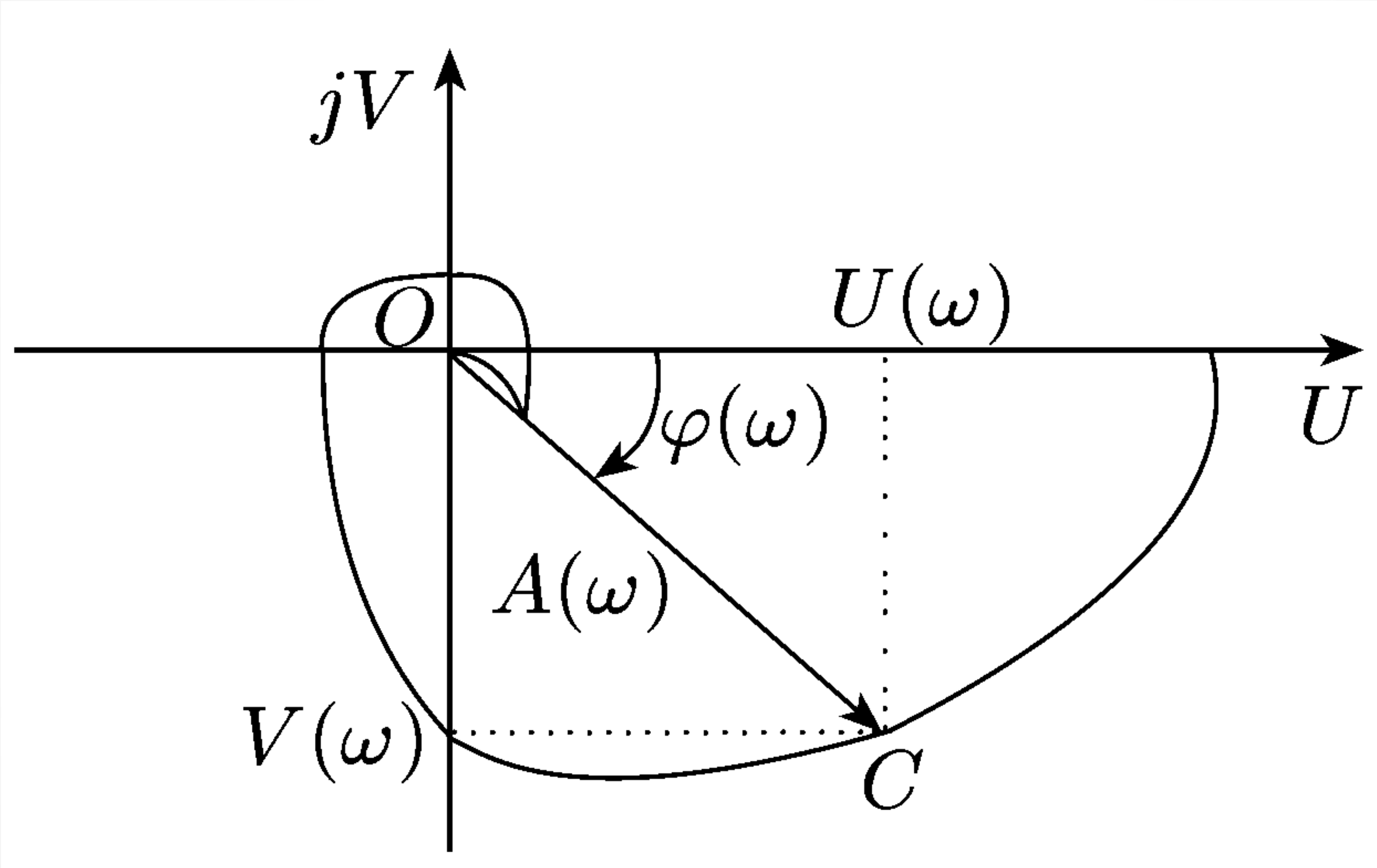
$$|W(j\omega)| = A(\omega) = \sqrt{N(\omega)^2 + M(\omega)^2},$$

- ФЧХ

$$\arg(W(j\omega)) = \varphi(\omega) = arctg\left(\frac{M(\omega)}{N(\omega)}\right),$$

где - $N(\omega) = \mathrm{Re}(W(j\omega));\ M(\omega) = \mathrm{Im}(W(j\omega))$

Частотные характеристики



Логарифмические частотные характеристики

ЛАЧХ

$$A(\omega) \Rightarrow L(\omega) = 20 \cdot \lg(A(\omega))$$ (Дб) - ось ординат

$$\omega \Rightarrow \lg(\omega)$$ (Декада) - ось абсцисс

ЛФЧХ

$$\varphi(\omega) \Rightarrow (\textit{не меняется}\ )\ \varphi(\omega)$$ - ось ординат

$$\omega \Rightarrow \lg(\omega)$$ (Декада) - ось абсцисс

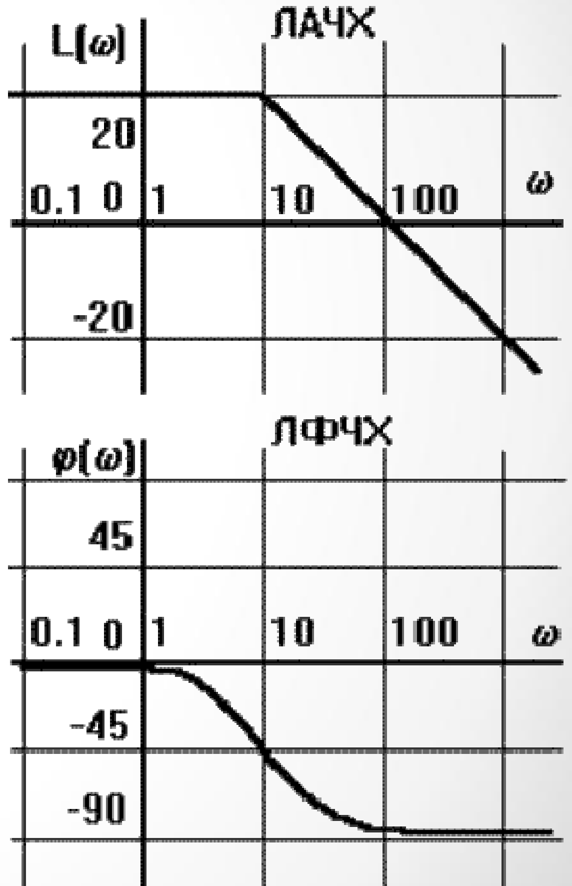


Рис. 49

Свойства:

1) $$W_1(\omega) \cdot W_2(\omega) \Rightarrow \begin{cases} L(\omega) = 20 \cdot \lg(A_1(\omega)) + 20 \cdot \lg(A_2(\omega)) \\ \varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) \end{cases}$$

2) *Асимптотические ЛАЧХ*

Асимптотические ЛАЧХ

1.Определить все сопрягающие частоты $\omega_к$ т.е. корни полиномов числителя и знаменателя, взятые с обратным знаком.

2.Преобразуется частотная передаточная функция к виду

$$W(j\omega) = K \cdot \frac{\prod_m \left(j\frac{\omega}{\omega_m} + 1 \right)}{\prod_n \left(j\frac{\omega}{\omega_n} + 1 \right)}$$

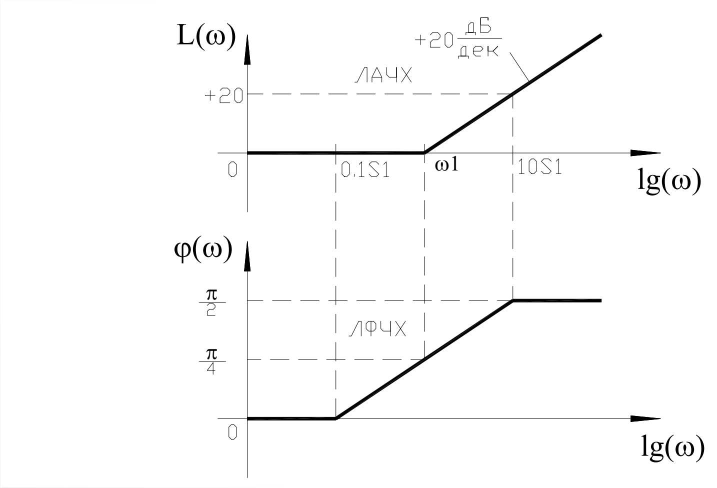
3.Выполняется построение асимптотических характеристик отдельных элементов передаточной функции. Т.е. для компонент

$$\left(j\frac{\omega}{\omega_к} + 1 \right)$$

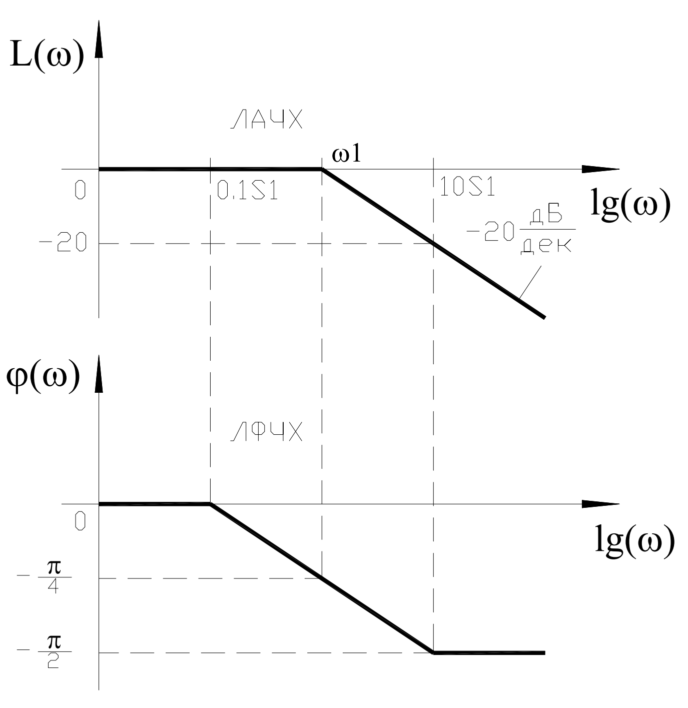
4.Суммируем асимптоты. Причем асимптоты числителя со знаком «+», а асимптоты знаменателя со знаком «-».

Особенности построения асимптот

Для сомножителя $\left(j\frac{\omega}{\omega_к}+1\right)$ в знаменателе (числителе) $W(j\omega)$ асимптота имеет вид:



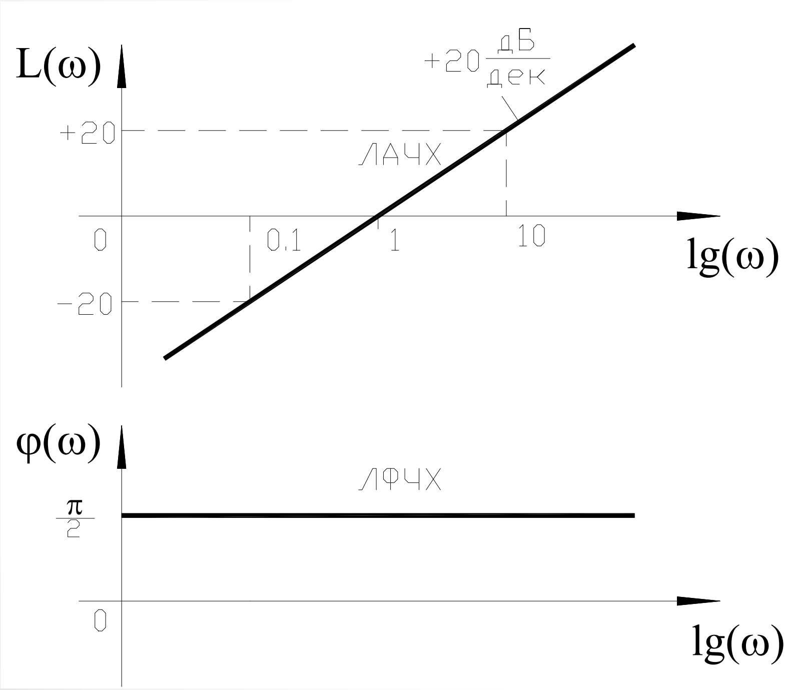
В числителе



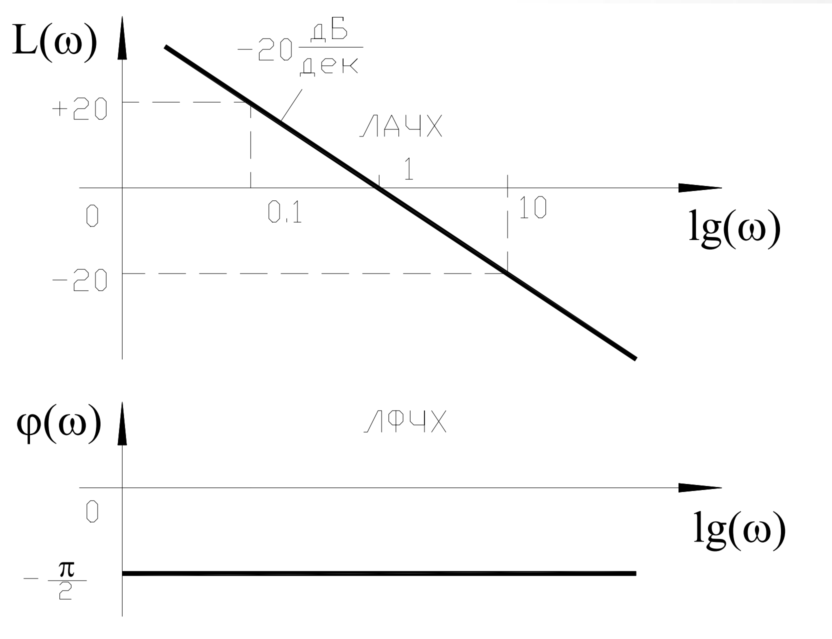
В знаменателе

Особенности построения асимптот

Для сомножителя $j\omega$ в знаменателе (числителе) $W(j\omega)$ асимптота имеет вид:



В числителе



В знаменателе

Пример

$$W(s) = \frac{5s + 50}{s^2 + 25s + 100}$$

1.Определим сопрягающие частоты

- корни числителя $s_1 = -10$

- корни знаменателя $s_2 = -5$ $s_3 = -20$

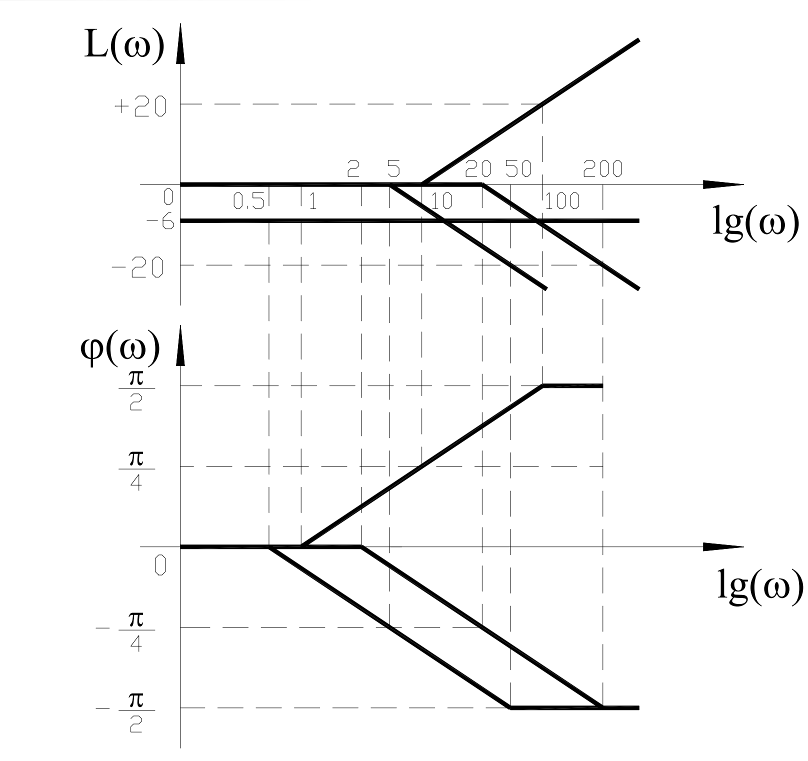
$$W(j\omega) = \frac{5(j\omega + 10)}{(j\omega + 5)(j\omega + 20)}$$

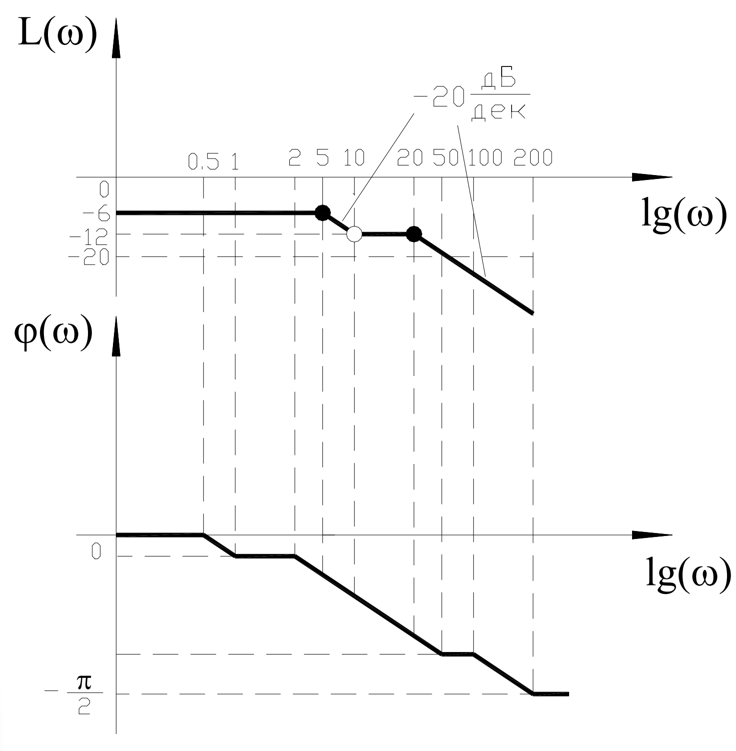
тогда сопрягающие частоты:

$$\omega_1 = 10, \quad \omega_2 = 5, \quad \omega_3 = 20$$

Пример

$$W(j\omega)=\frac{50}{100}\frac{(j\frac{\omega}{10}+1)}{(j\frac{\omega}{5}+1)(j\frac{\omega}{20}+1)}=0.5\frac{(j\frac{\omega}{10}+1)}{(j\frac{\omega}{5}+1)(j\frac{\omega}{20}+1)}$$





Типовые динамические звенья

Усилитель

$W(p) = k$ - Передаточная функция

$h(t) = k$ - Переходная характеристика

$g(t) = k \cdot \delta(t)$ - Импульсная характеристика

$A(\omega) = k$ - АЧХ

$\varphi(\omega) = 0$ - ФЧХ, ЛФЧХ

$L(\omega) = 20 \cdot \lg(k)$ - ЛАЧХ

Апериодическое звено

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1}$$ - Передаточная функция

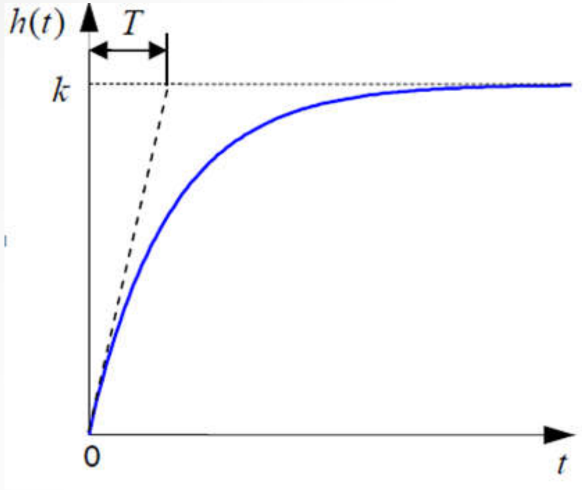
$$h(t) = k\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$ - Переходная характеристика

$$g(t) = \frac{k}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$ - Импульсная характеристика

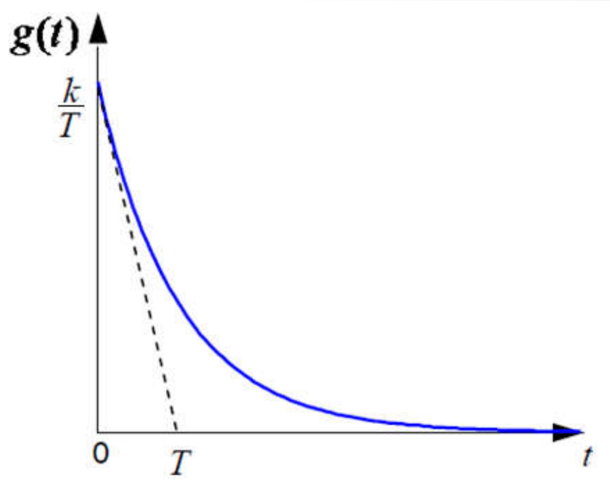
$$W(j\omega) = \frac{k}{\sqrt{1+(\omega \cdot T)^2}} \cdot e^{-j \cdot arctg(\omega T)}$$ - АФЧХ

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg(k) - 20 \cdot \lg(\sqrt{1+\left(\omega T\right)^2})$$ - ЛАЧХ

Апериодическое звено

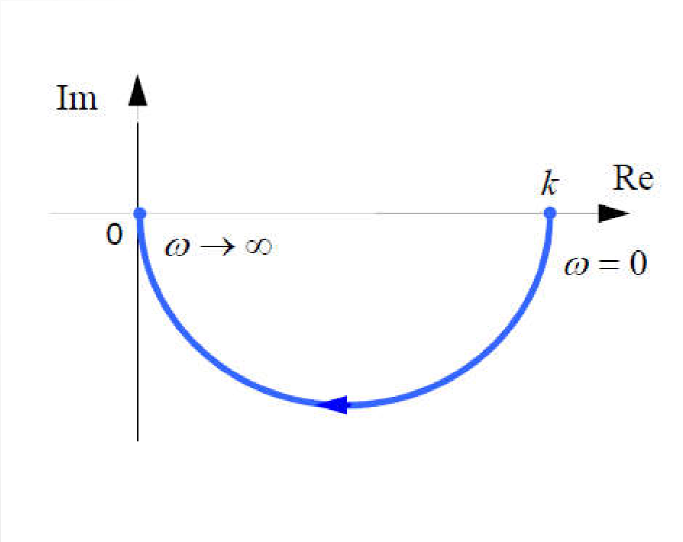


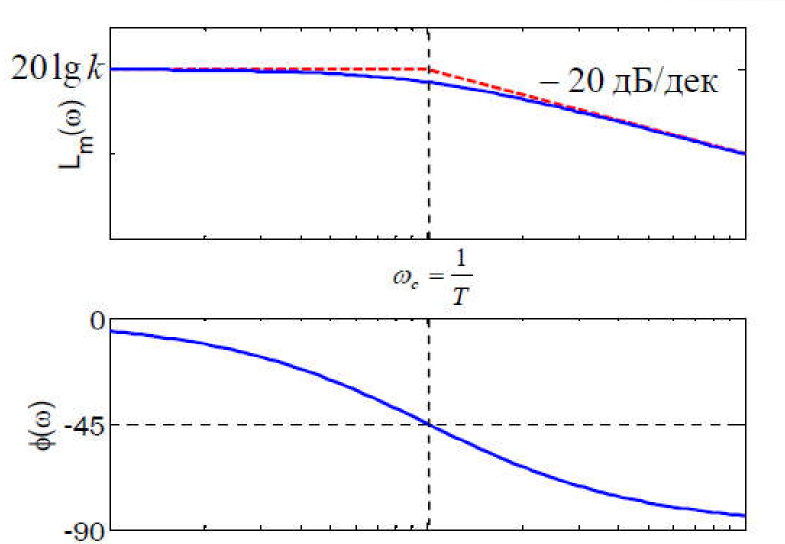
Переходная характеристика



Импульсная характеристика

АФЧХ





ЛАЧХ

ЛФЧХ

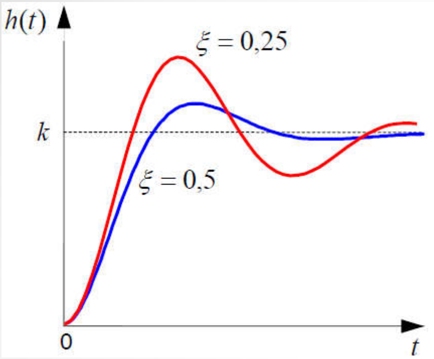
Колебательное звено

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}$$ - Передаточная функция

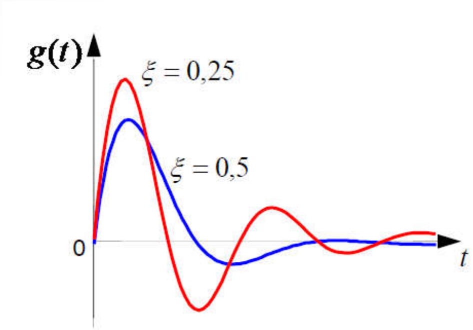
$$W(j\omega) = \frac{k}{\sqrt{\left[1 + (\omega \cdot T)^2\right]^2 + 4(\xi \cdot T \cdot \omega)^2}} \cdot e^{-j \cdot arctg\left(\frac{2\xi\omega T}{1-(\omega T)^2}\right)}$$ - АФЧХ

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg(k) - 20 \cdot \lg(\sqrt{\left[1 - (\omega \cdot T)^2\right]^2 + 4(\xi \cdot T \cdot \omega)^2})$$ - ЛАЧХ

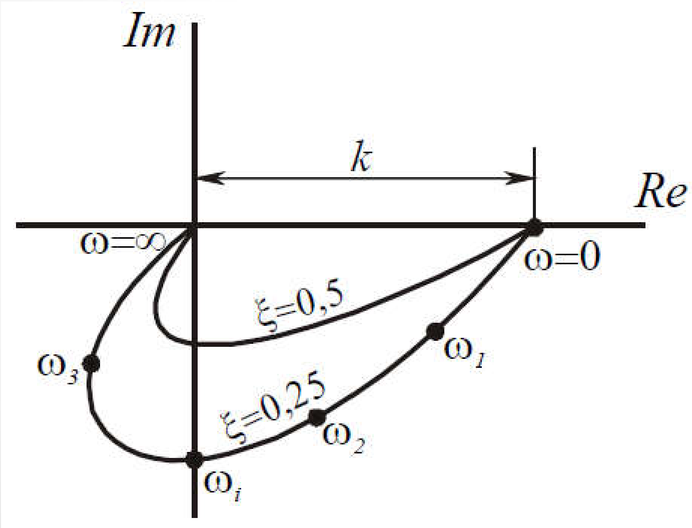
Колебательное звено



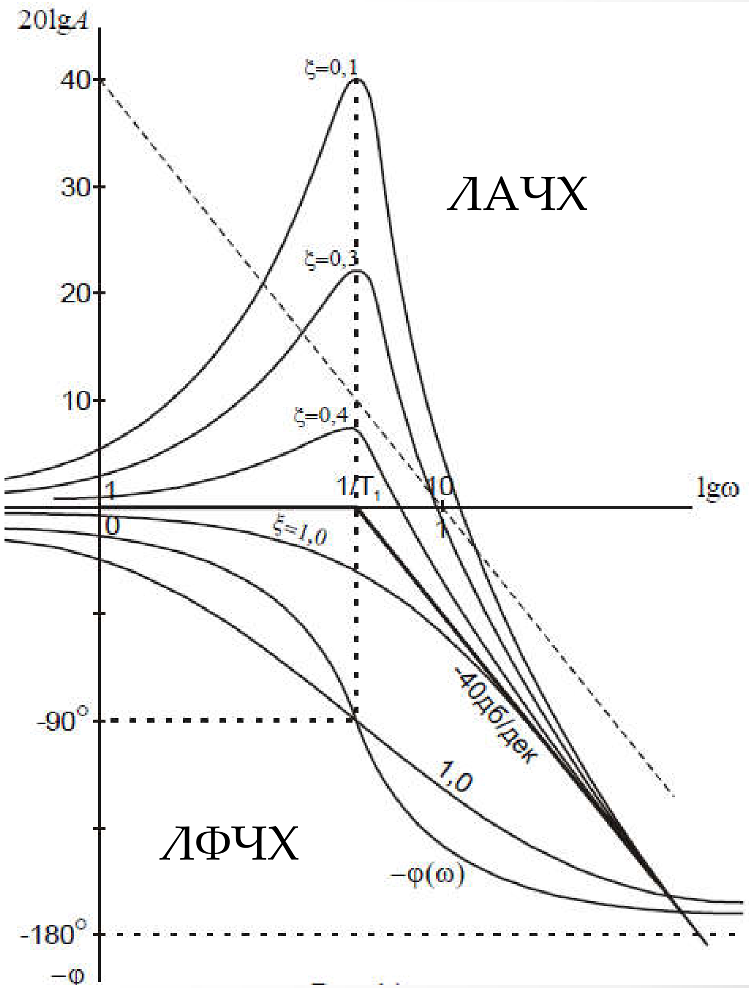
Переходная характеристика



Импульсная характеристика



АФЧХ



Интегрирующее звено

$$W(p) = \frac{k}{p}$$ - Передаточная функция

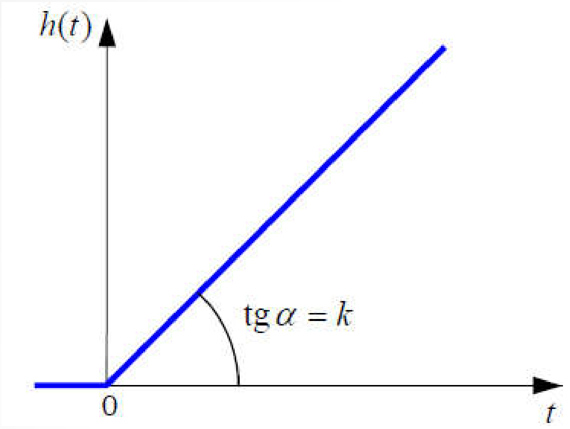
$$h(t) = k \cdot t$$ - Переходная характеристика

$$g(t) = k \quad (npu \;\; t \geq 0)$$ - Импульсная характеристика

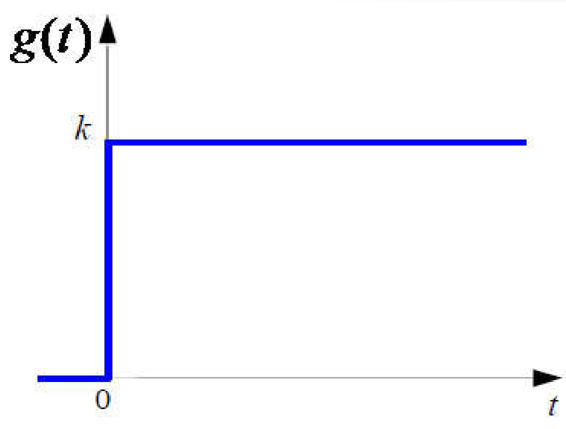
$$W(j\omega) = k \cdot \omega \cdot e^{-j \cdot 90^o}$$ - АФЧХ

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg(k) - 20 \cdot \lg(\omega)$$ - ЛАЧХ

Интегрирующее звено

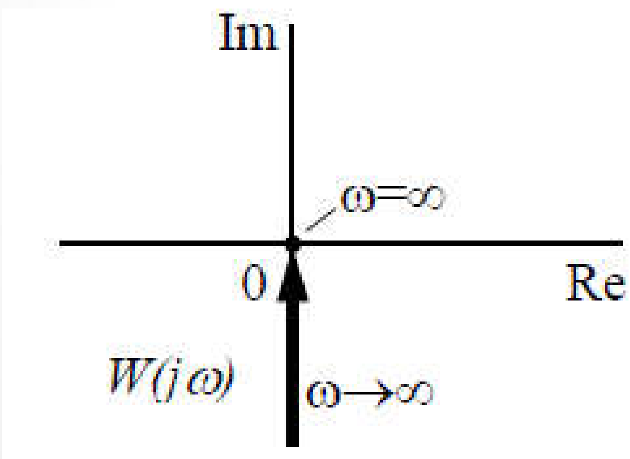


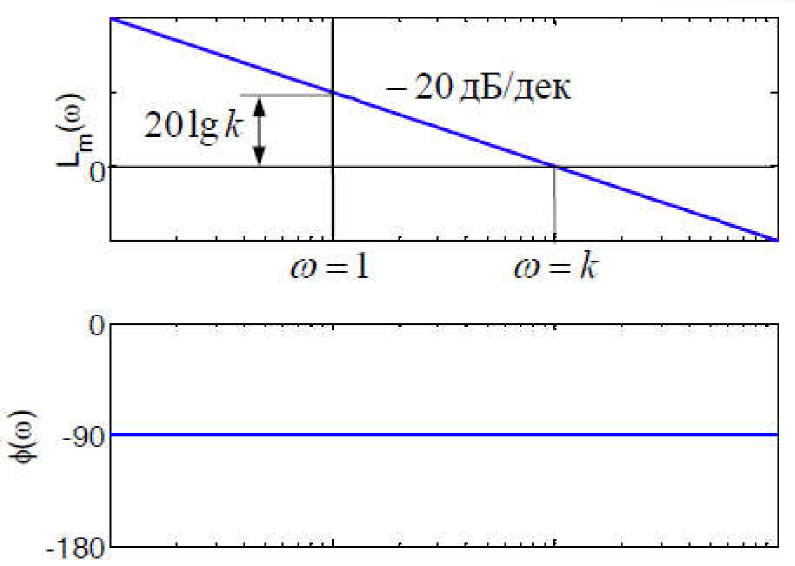
Переходная характеристика



Импульсная характеристика

АФЧХ





ЛАЧХ

ЛФЧХ

Идеально дифференцирующее звено

$$W(p) = k \cdot p$$ - Передаточная функция

Физически не реализуемое, так как звено реагирует не на изменение самой входной величины, а на изменение ее производной, то есть на *тенденцию развития событий.*

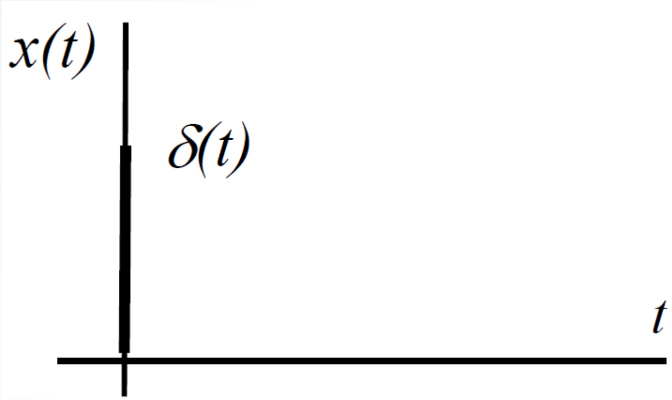
$$h(t) = \delta(t) \cdot k$$ - Переходная характеристика

$$g(t) = \frac{d\delta(t)}{dt} k$$ - Импульсная характеристика

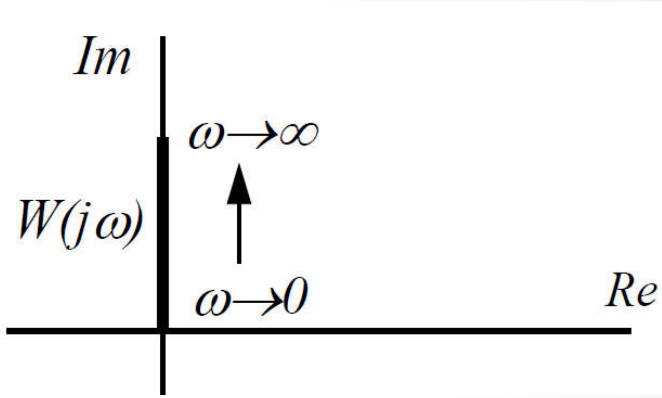
$$W(j\omega) = k \cdot \omega \cdot e^{-j \cdot 90^o}$$ - АФЧХ

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg(k) + 20 \cdot \lg(\omega)$$ - ЛАЧХ

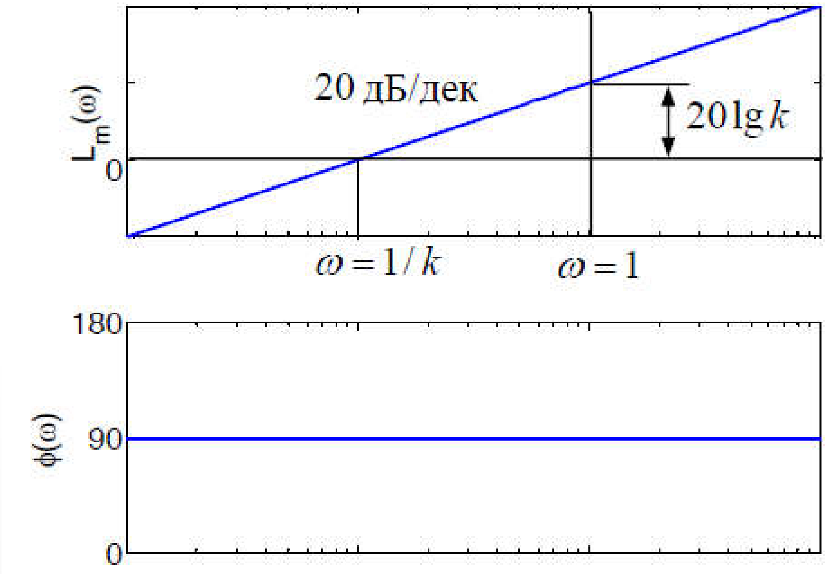
Идеально дифференцирующее звено



Переходная характеристика



АФЧХ



ЛАЧХ

ЛФЧХ

Форсирующее звено

$$W(p) = k \cdot (T \cdot p + 1)$$ - Передаточная функция

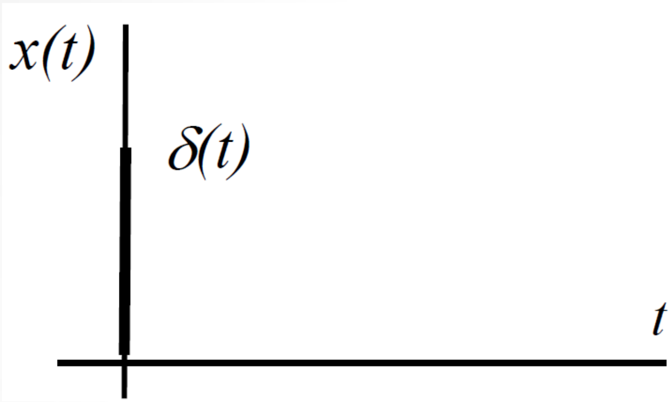
Физически не реализуемое

$$h(t) = k \cdot (T \cdot \delta(t) + 1(t))$$ - Переходная характеристика

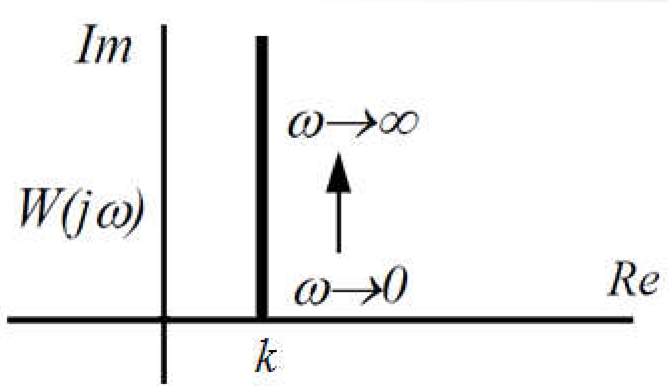
$$W(j\omega) = k\sqrt{1 + (\omega \cdot T)^2} \cdot e^{j \cdot arctg(\omega T)}$$ - АФЧХ

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg(k) + 20 \cdot \lg(\sqrt{1 + (\omega T)^2})$$ - ЛАЧХ

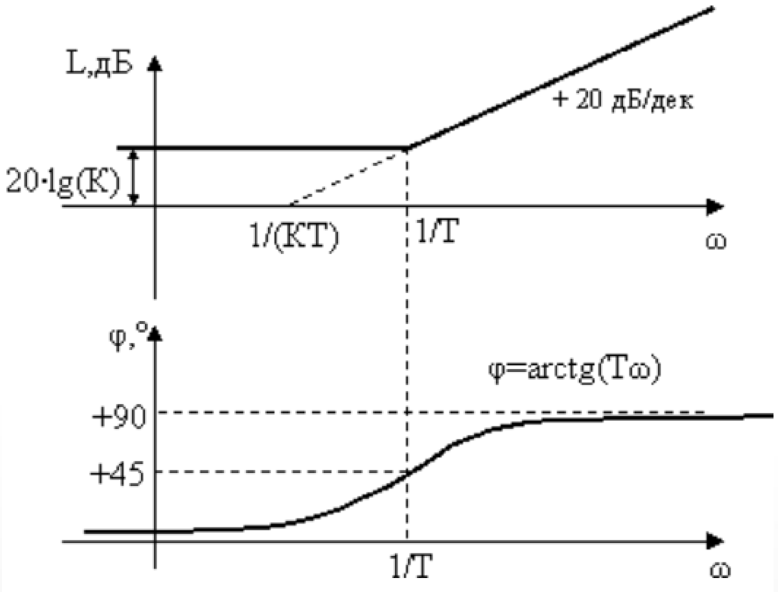
Форсирующее звено



Переходная характеристика



АФЧХ



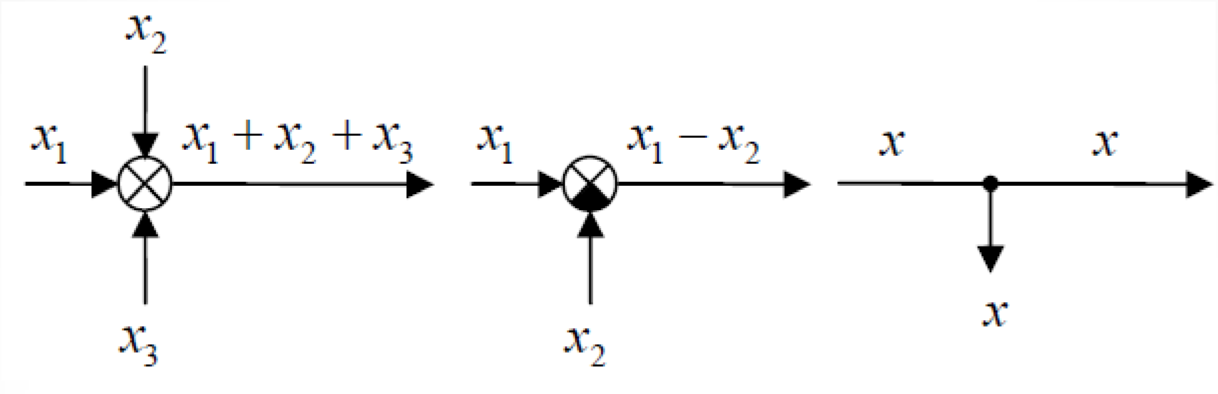
ЛАЧХ

ЛФЧХ

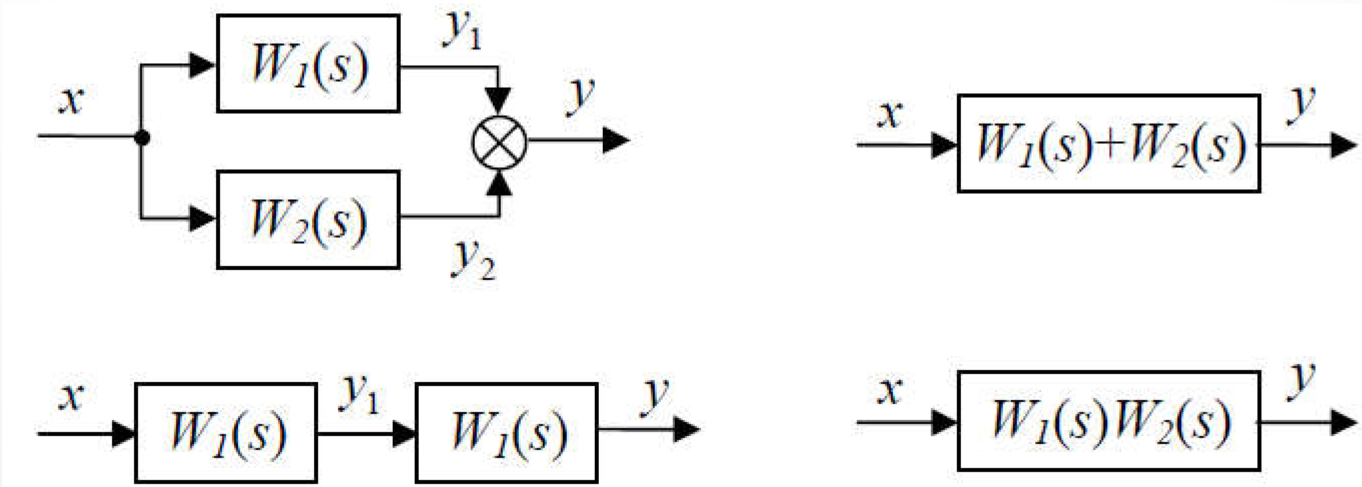
Структурные схемы

Структурное преобразование схем

Разветвление сигнала:

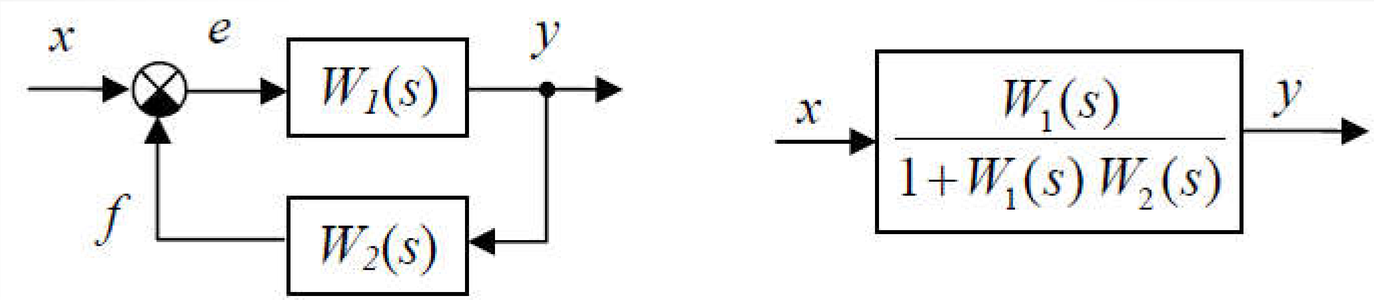


Параллельное и последовательное соединение звеньев:



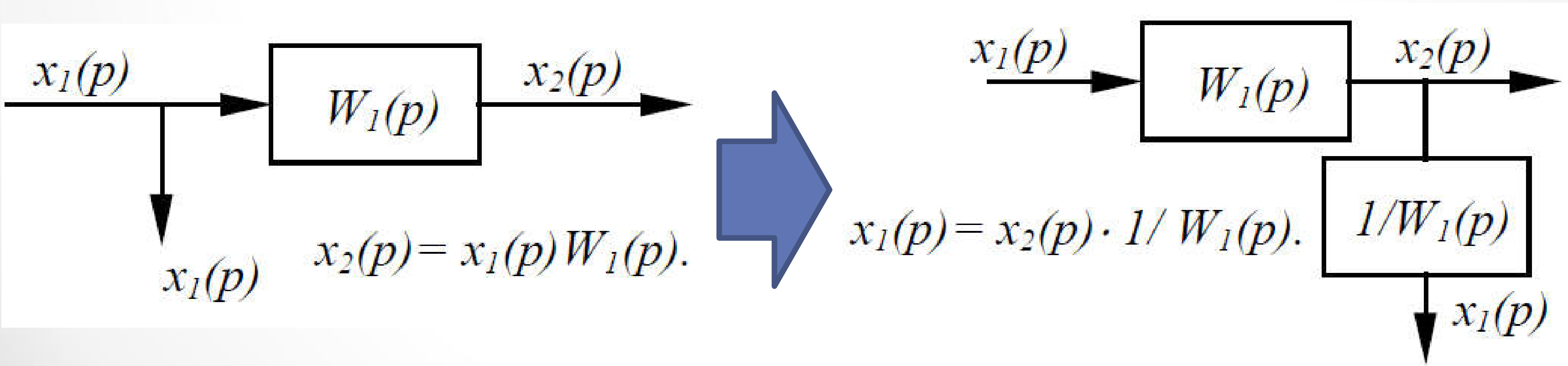
Структурное преобразование схем

Для контура с отрицательной обратной связью:



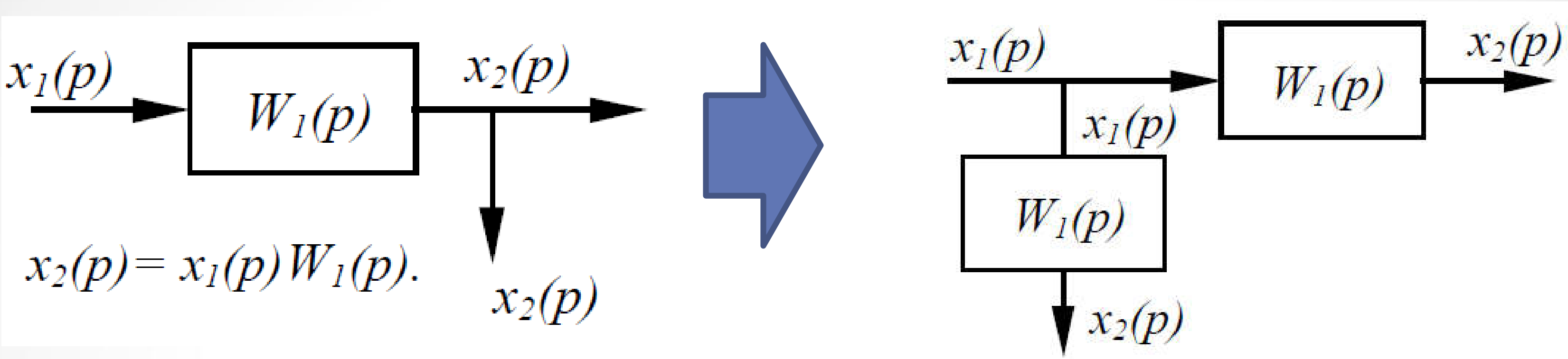
Если обратная связь положительная то в знаменателе будет стоять знак «минус».

Прямой перенос сигнала через ПФ:



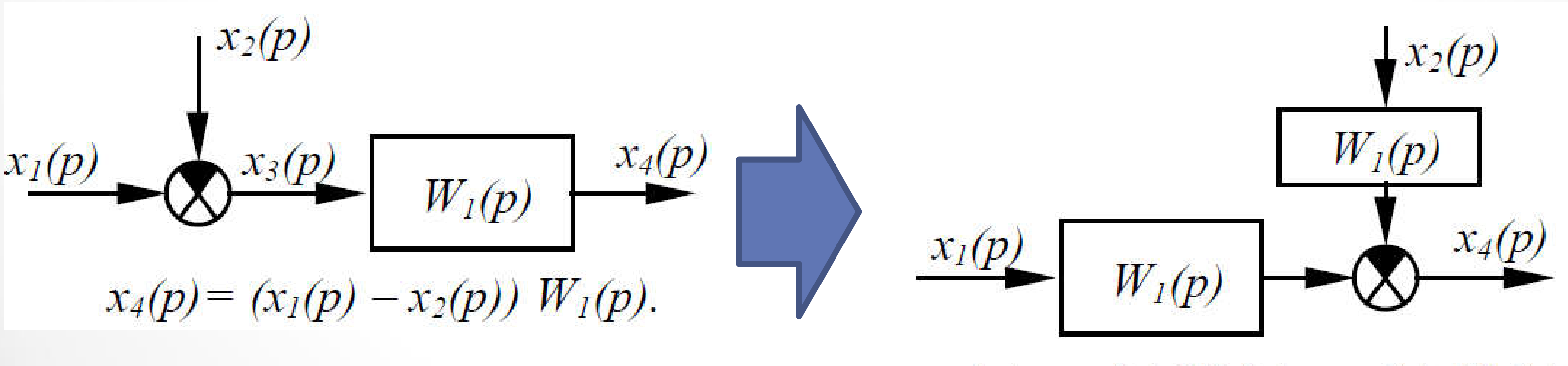
Структурное преобразование схем

Обратный перенос сигнала через ПФ:



$$x_2(p) = x_1(p)\,W_1(p).$$

Прямой перенос суммирующего звена:

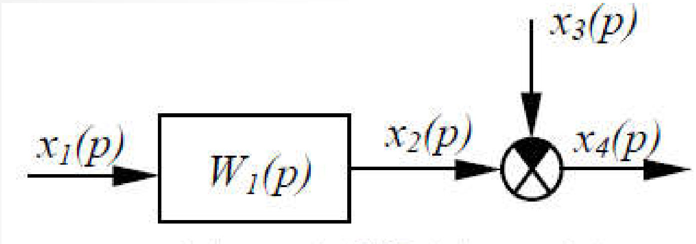


$$x_4(p) = (x_1(p) - x_2(p))\ W_1(p).$$

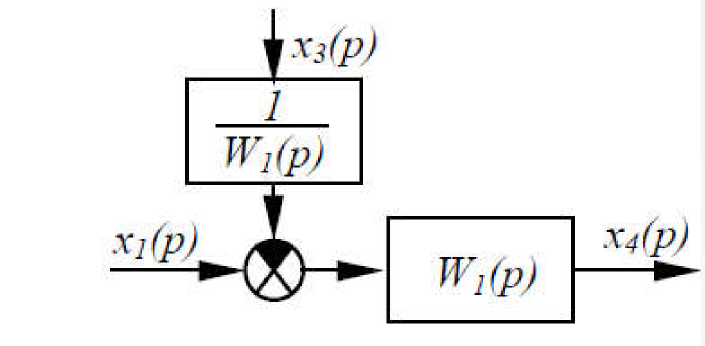
$$x_4(p) = x_1(p)\ W_1(p) - x_2(p)\ W_1(p).$$

Структурное преобразование схем

Обратный перенос суммирующего звена:

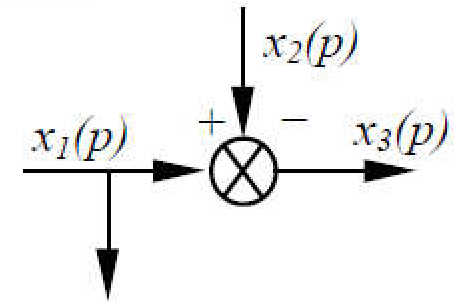


$$x_4(p) = x_1(p) W_1(p) - x_3(p).$$

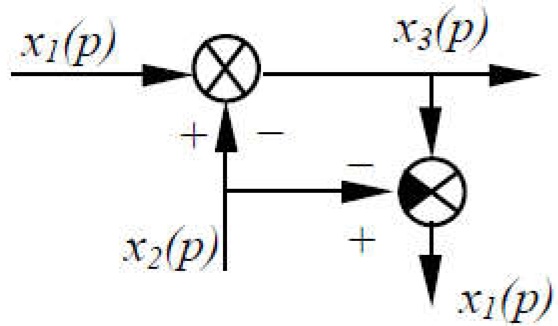


$$x_4(p) = [x_1(p) - x_3(p)/W_1(p)]\ W_1(p).$$

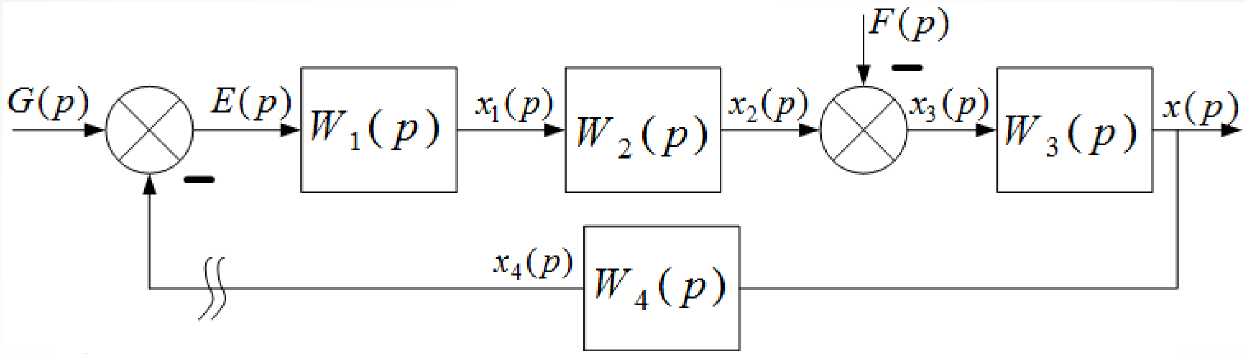
Прямой перенос суммирующего звена:



$$x_3(p) = x_1(p) \pm x_2(p).$$



Передаточные функции систем



Передаточная функция по управлению

$$W_y(p)=\frac{W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot W_3(p)}{1+W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot W_3(p)\cdot W_4(p)}$$

Передаточная функция по возмущающему воздействию:

$$W_F(p)=-\frac{W_3(p)}{1+W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot W_3(p)\cdot W_4(p)}$$

Передаточная функция по рассогласованию:

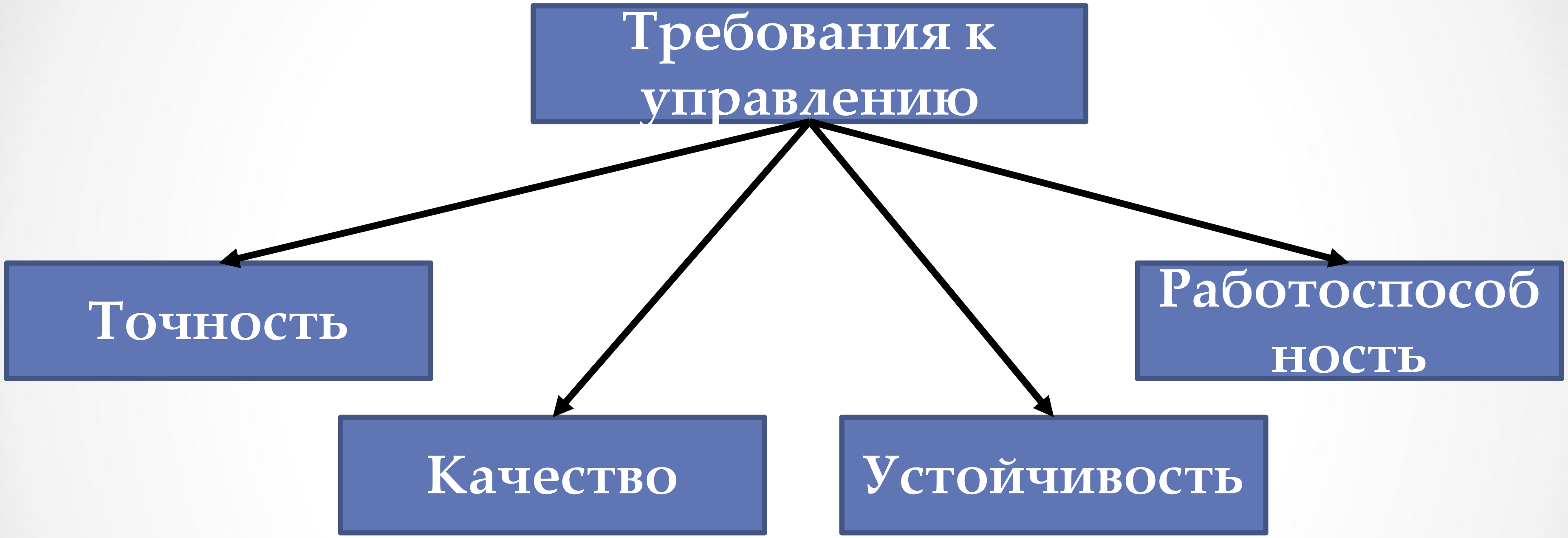
$$W_E(p)=\frac{1}{1+W_1(p)\cdot W_2(p)\cdot W_3(p)\cdot W_4(p)}$$

$$x(p)=W_y(p)\cdot G(p)+W_F(p)\cdot F(p)$$

$$\left.\begin{aligned}
E(p)&=G(p)-x_4(p),\\
x_1(p)&=E(p)\cdot W_1(p),\\
x_2(p)&=x_1(p)\cdot W_2(p),\\
x_3(p)&=x_2(p)-F(p),\\
x(p)&=x_3(p)\cdot W_3(p),\\
x_4(p)&=x(p)\cdot W_4(p).
\end{aligned}\right\}$$

Анализ САУ

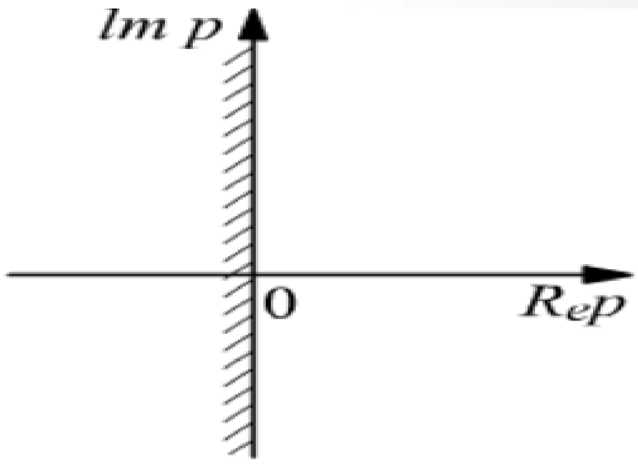
Анализ САУ


Требования к управлению
Точность
Качество
Устойчивость
Работоспособ ность

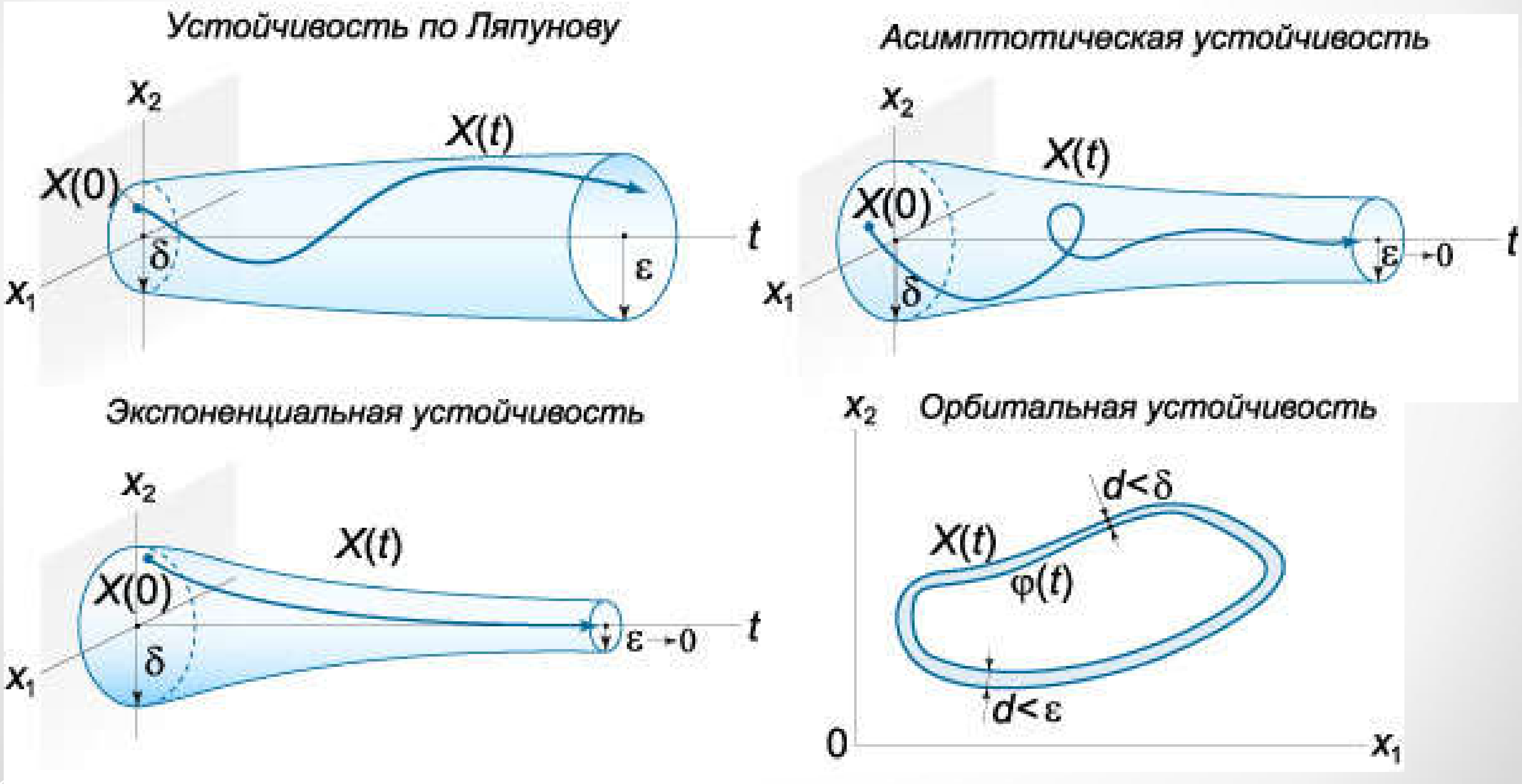
Устойчивость

Устойчивость автоматической системы это свойство системы возвращаться в исходное состояние равновесия после прекращения воздействия, выведшего систему из этого состояния. Неустойчивая система не возвращается в исходное состояние, а непрерывно удаляется от него.

Общее условие устойчивости – для устойчивости линейной автоматической системы управления необходимо и достаточно, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными.



Общие сведения об устойчивости САУ



Критерии устойчивости (критерий Гурвица)

Характеристическое уравнение **замкнутой** САУ:

$$\Delta(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots + a_{n-1} s + a_n$$

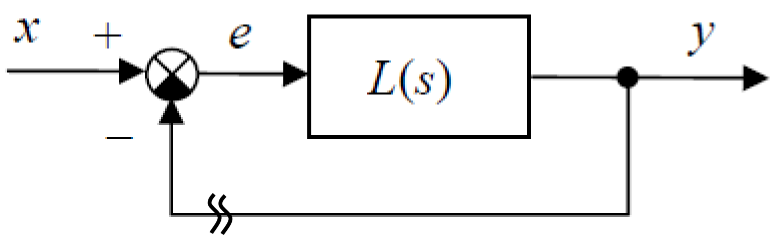
Все корни полинома $\Delta(s)$ имеют отрицательные вещественные части тогда и только тогда, когда все n главных миноров матрицы H_n *(определителей Гурвица)* положительны.

Пример для полинома пятого порядка (n=5):

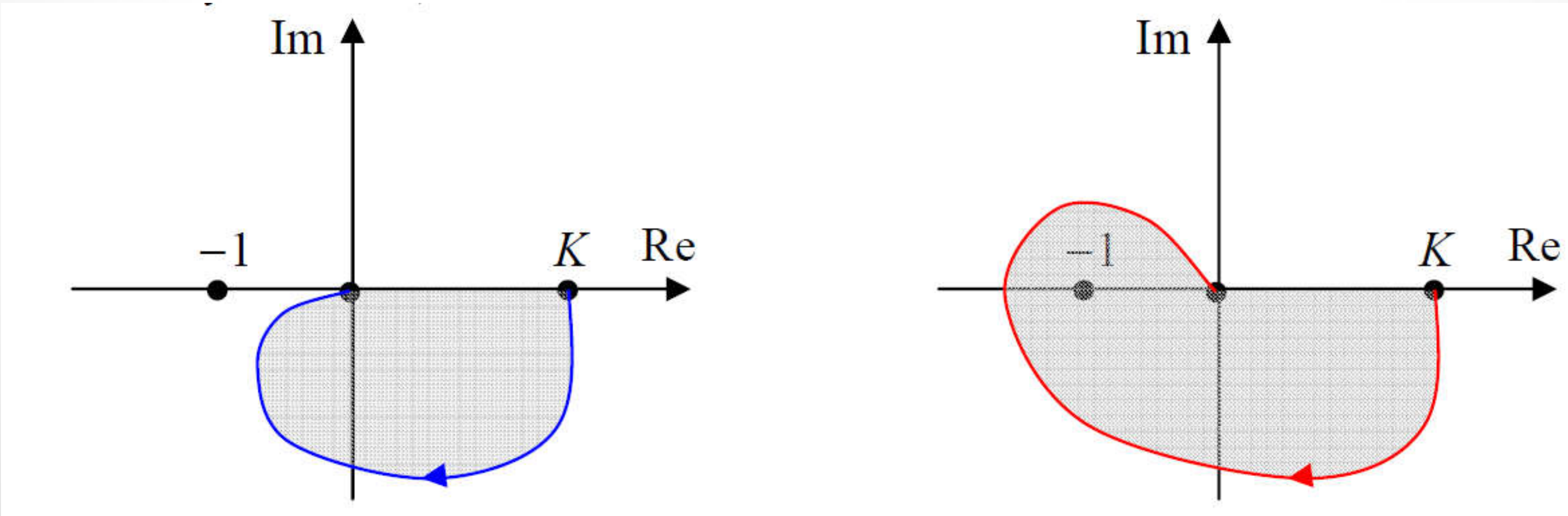
$$H_5 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{bmatrix} \qquad (a_0 > 0)$$

$$D_1 = a_1 > 0\,, \quad D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0\,, \quad D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0\,, \quad D_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} > 0\,.$$

Критерии устойчивости (критерий Найквиста)



В случае если разомкнутая система устойчива, то замкнутая устойчива тогда и только тогда, когда годограф **разомкнутой** системы $L(j\omega)$ не охватывает точку $(-1;\ 0j)$.

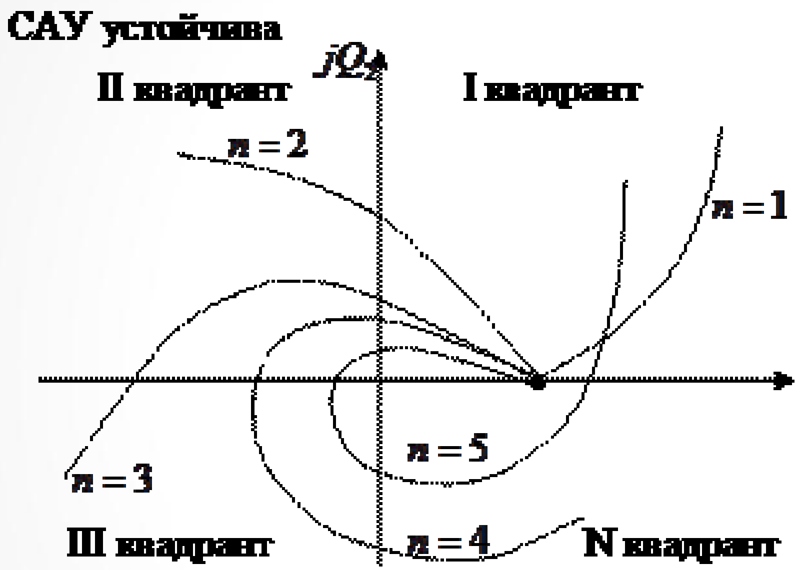


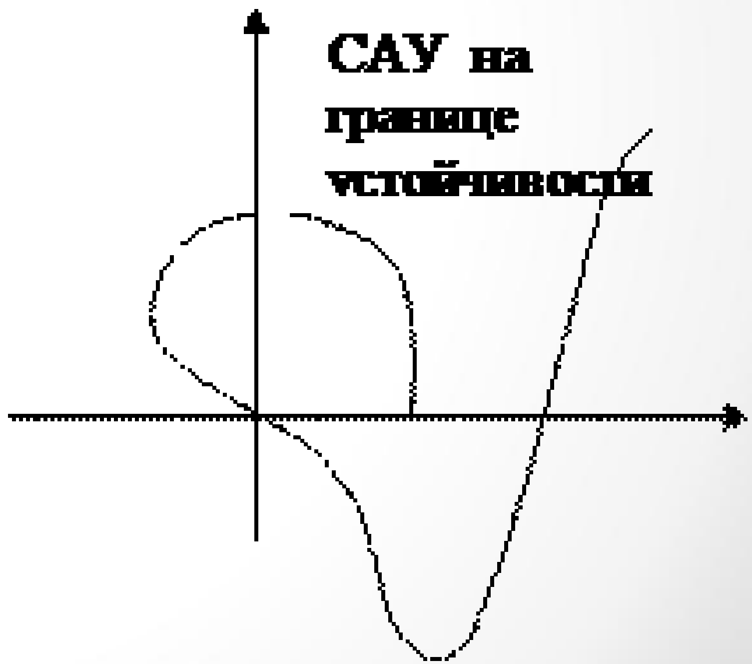
Критерий Михайлова

Автоматическая система управления, описываемая уравнением *n*-го порядка, устойчива, если при изменении ω от 0 до ∞ характеристический вектор системы $F(j\omega)$ повернется против часовой стрелки на угол $n*\pi/2$, не обращаясь при этом в нуль.

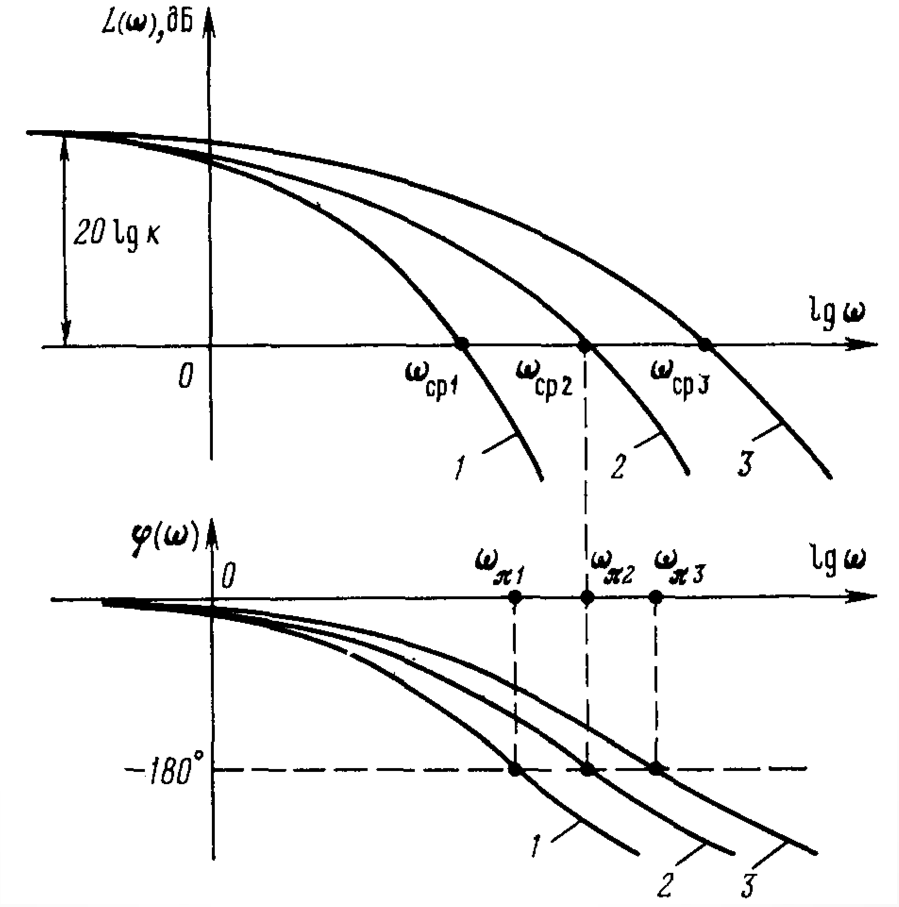
Это означает, что характеристическая кривая устойчивой системы должна при изменении ω от 0 до ∞ пройти последовательно через *n* квадрантов.

Критерий Михайлова





Логарифмические частотные характеристики



Показатели качества

1) прямые - определяемые непосредственно по кривой переходного процесса,
2) корневые - определяемые по корням характеристического полинома,
3) частотные - по частотным характеристикам,
4) интегральные - получаемые путем интегрирования функций.

Оценки качества переходной характеристики

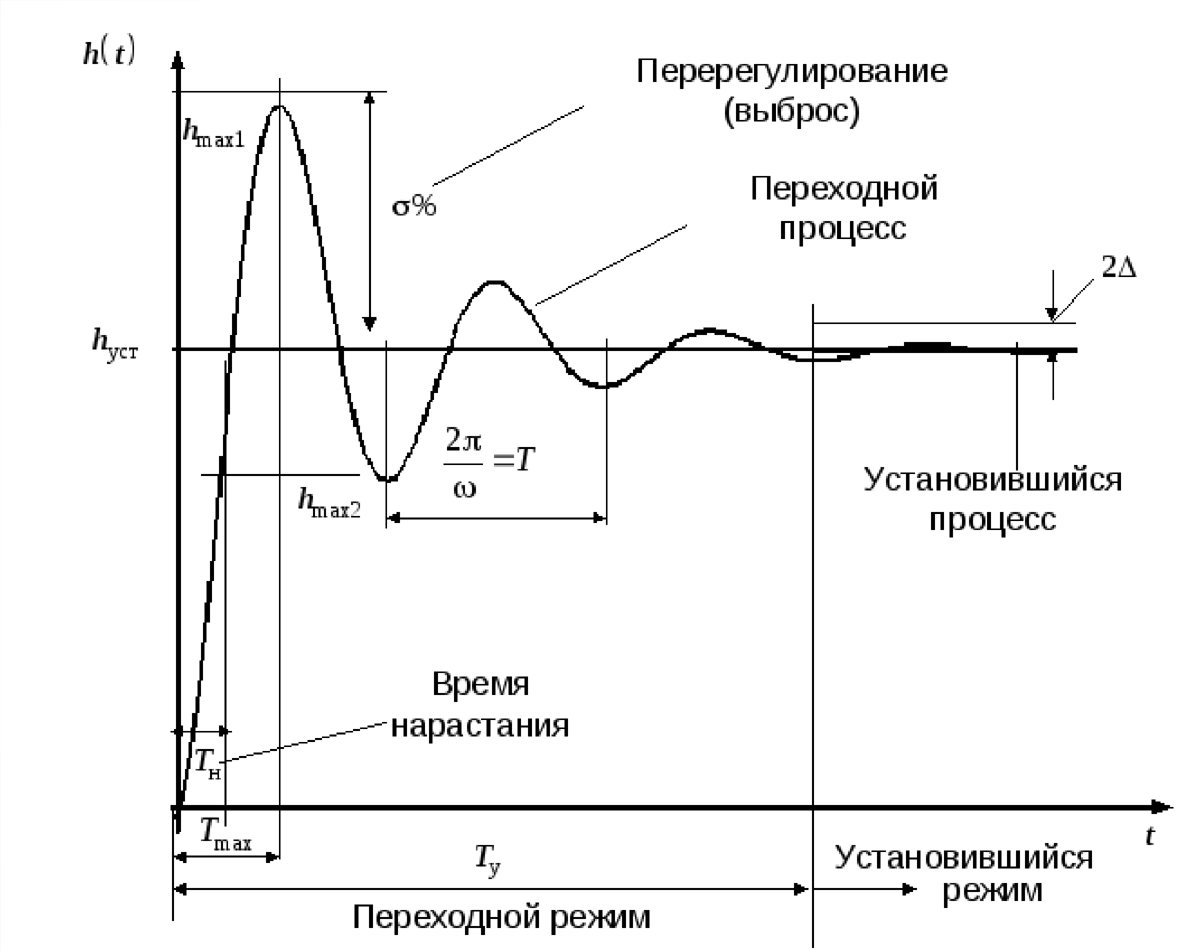
Формула Хевисайда

$$h(t) = \frac{K(0)}{D(0)} + \sum_{k=1}^{n} \frac{K(s_k)}{s_k D'(s_k)} e^{S_K t}$$

Перерегулирование

$$\delta = \frac{X\max - Xуст}{X\max} \cdot 100\%$$

Оценки качества переходной характеристики



Переходная характеристика

Оценки качества переходной характеристики

Степень затухания $$\Psi = 1 - \frac{A_3}{A_1}$$

Статическая ошибка $\varepsilon_{ст} = x - x_{уст}$

Время регулирования (время переходного процесса) $T_П$ определяется следующим образом: Находится допустимое отклонение $\Delta = 5\%\ x_{уст}$ и строятся асимптоты $\pm\Delta$ Время ТП соответствует последней точке пересечения x(t) с данной границей. То есть время, когда колебания регулируемой величины перестают превышать 5 % от установившегося значения.