

Теория автоматического управления

Разделы лекционного курса:

- Основные понятия
- Математическое описание систем
- Характеристики систем во временной и частотной областях
- Устойчивость систем
- Оптимальное управление

Лабораторные работы:

- Структурные схемы
- Переходные характеристики
- Частотные характеристики
- Устойчивость систем

Дисциплина базируется на изучении курсов:

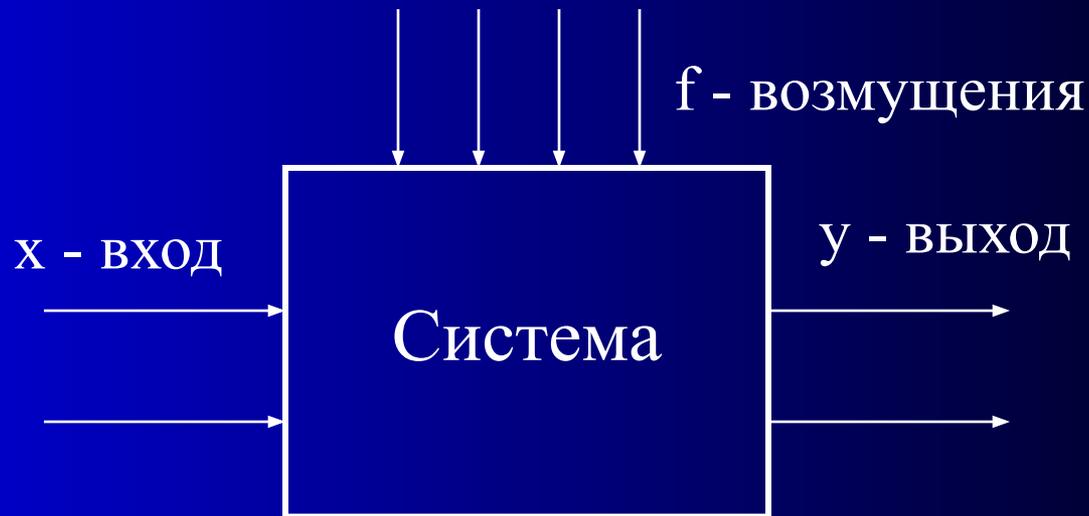
- Высшая математика
- Математическое моделирование технологических систем
- Основы анализа социальных и технических систем
- Основы технологии машиностроения
- Оборудование автоматизированных производств

Где применяются знания:

- При разработке автоматических систем и их узлов (станки – автоматы, ЧПУ, пром.роботы и т.п.)
- При эксплуатации автоматических систем для устранения или недопущения нежелательных режимов работы
- При общении со специалистами по разработке автоматических систем (в том числе – при постановке задачи)
- При организации управления сложными социальными системами

1. Элементы теории автоматического управления (ТАУ)

1.1. Понятия автоматического управления и автоматического регулирования



Задача автоматического управления

Найти такое $x(\tau)$, чтобы достичь цели управления:

- $\min(F_1 \{y(\tau), x(\tau)\})$ при наличии $f(\tau)$
- $F_2 \{y(\tau_k)\}$ при наличии $f(\tau)$

Например:

1. Минимизация отклонений траектории инструмента от заданной:

$$\min_{F_1} \left[\int_0^{\tau} \{y(\tau) - y_0(\tau)\}^2 d\tau \right]$$

2. Получить заданную шероховатость поверхности:

$$F_2 = Ra(\tau_k)$$

Задача автоматического регулирования

Разработать техническое устройство, реализующее систему для решения задачи автоматического управления

Определение Системы Автоматического Регулирования (САР):

САР называется система, функционирующая для достижения цели управления без участия человека (автоматически) в условиях воздействия на нее возмущений.

Примеры:

- Бытовой холодильник
- Станок с ЧПУ
- Система стабилизации скорости вращения двигателя
- Система стабилизации получения заданного размера детали

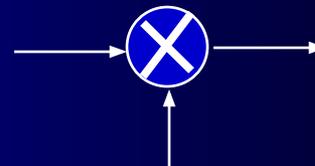
.....

Структурные схемы САУ

1. Элемент или подсистема



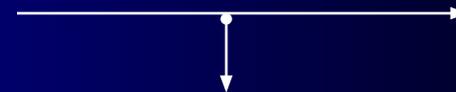
2. Суммирующий узел



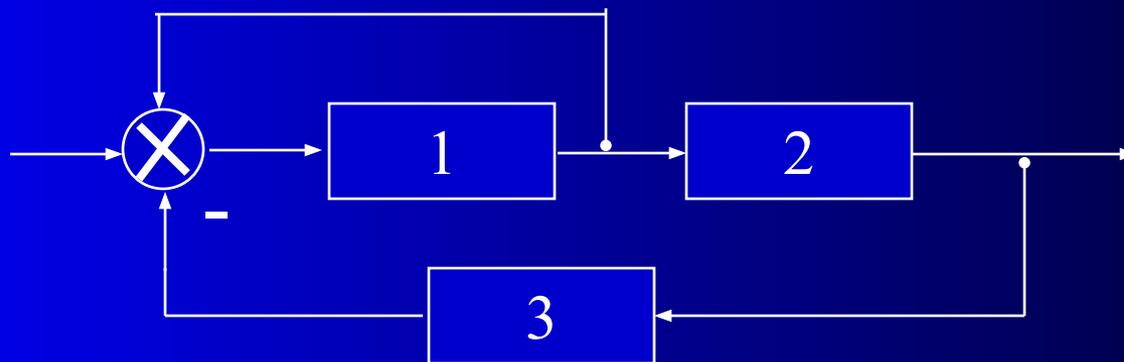
3. Связь между элементами



4. Разветвление



Пример:



1.2. Состав и структура САР

Состав:

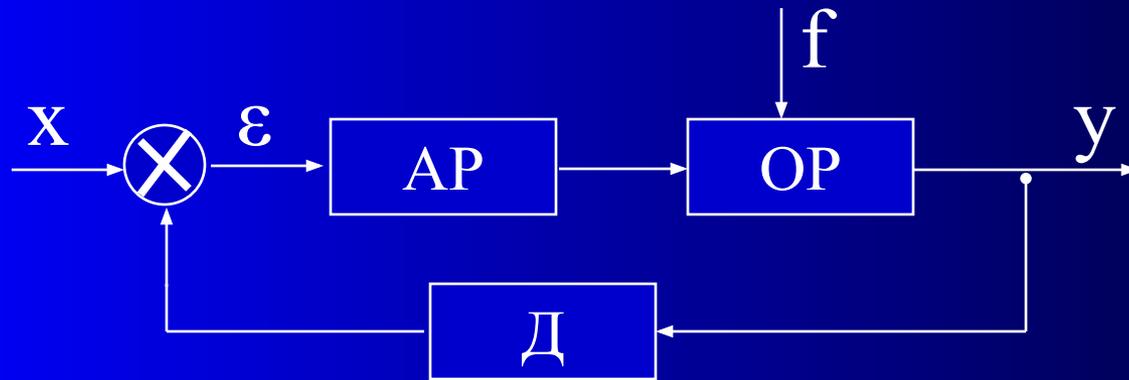
1. Объект регулирования
2. Датчик
3. Автоматический регулятор

Структура:

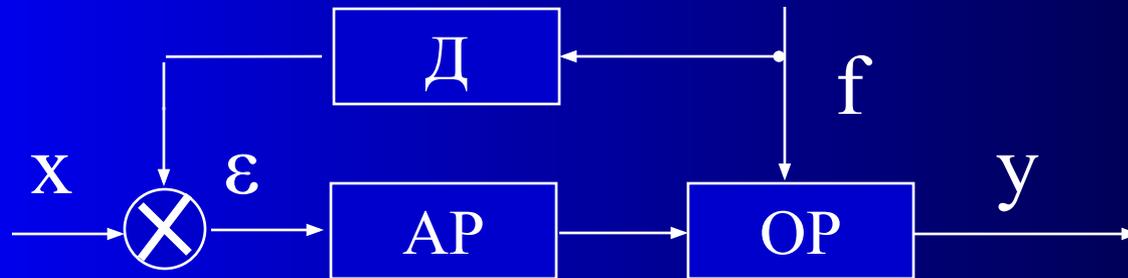
Определяется соединением составных частей САР, которые зависят от принципов регулирования

1. Регулирование по отклонению
2. Регулирование по возмущению
3. Комбинированные системы
4. Системы программного управления

Регулирование по отклонению



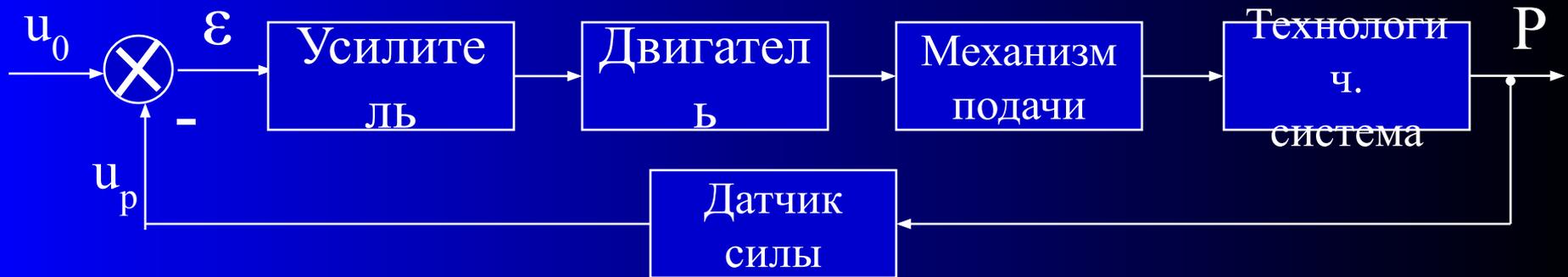
Регулирование по возмущению



1.3. Классификация САР

1. Работающие по замкнутому циклу
 - Системы стабилизации
 - Следящие системы
2. Работающие по разомкнутому циклу
 - Системы компенсации (по возмущению)
 - Системы программного управления
3. Комбинированные системы
4. Самонастраивающиеся (адаптивные) САР – параметры системы могут изменяться при изменении внешних условий (процесс обучения)

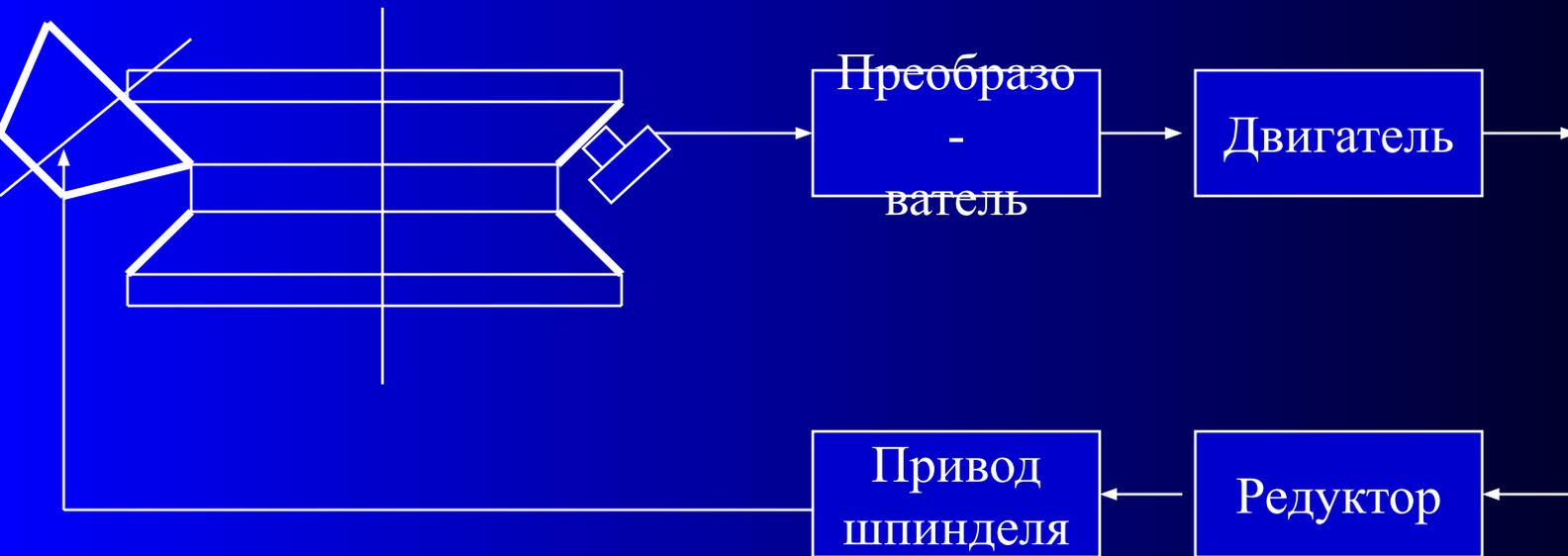
Система стабилизации силы резания



$$\varepsilon = u_0 - u_p$$

При $u_0 \neq \text{const}$ получается следящая САР

Система компенсации биения обрабатываемой поверхности

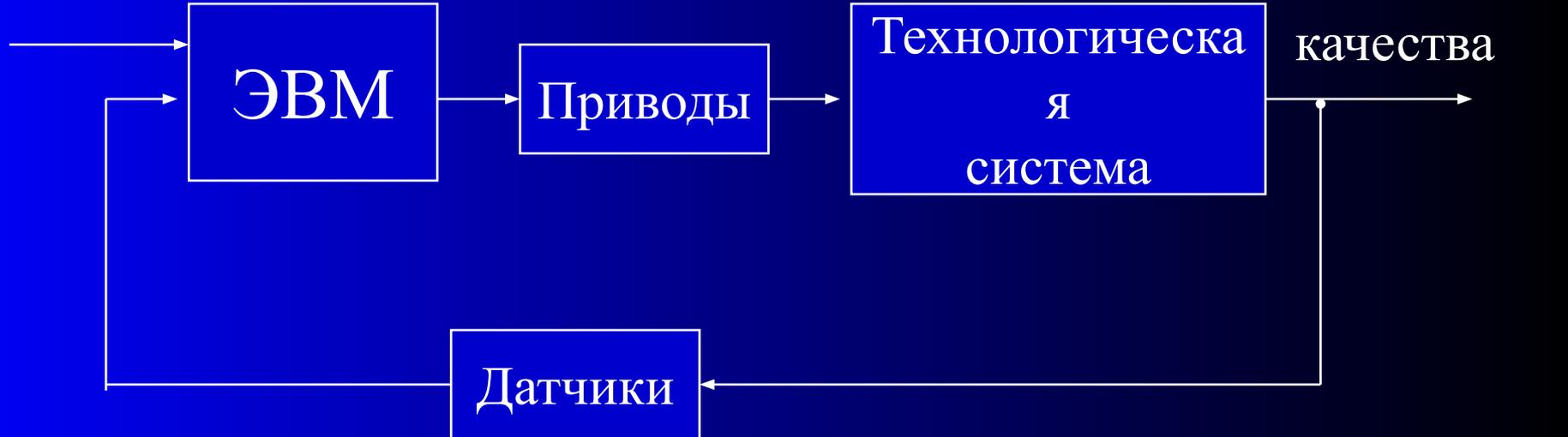


СПУ круглошлифовального станка модели 3Е153



Адаптивная система обработки

Исходные
данные



1.4. Математическое описание САР

Любую непрерывную систему можно описать уравнением:

$$F(x^{(k)}, x^{(k-1)}, \dots, x', x, y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y', y) = 0$$

Если зависимость F линейна, то она принимает вид:

$$a_n y^{(n)} + \dots + a_1 y' + a_0 y = b_k x^{(k)} + \dots + b_1 x' + b_0 x$$

Это выражение – линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами.

Передаточная функция линейной системы

Система описывается дифференциальным уравнением:

$$a_n y^{(n)} + \dots + a_1 y' + a_0 y = b_k x^{(k)} + \dots + b_1 x' + b_0 x$$

Формально заменим символ дифференцирования

СИМВОЛОМ s :

$$\frac{d}{d\tau} \leftrightarrow s, \quad \frac{d^i}{d\tau^i} \leftrightarrow s^i$$

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) y = (b_k s^k + \dots + b_1 s + b_0) x$$

Обозначим

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_k s^k + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}$$

Это выражение называется

передаточной функцией линейной системы

Передаточная функция линейной системы

Определение: Передаточной функцией линейной системы называется отношение лапласова изображения выходной величины системы к лапласову изображению входной величины, полученные при нулевых начальных условиях.

Пример:

$$m\ddot{y} + Gy + Cy = F(\tau)$$

$$(ms^2 + Gs + C) \cdot y(s) = F(s)$$

$$W(s) = \frac{y(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + Gs + C}$$

Передаточная функция это другая форма записи дифференциального уравнения, более удобная для некоторых приложений.

Коэффициент передачи системы

Если входной сигнал $x(\tau)=\text{const}=x_0$, то с течением времени выходной сигнал устанавливается: $y(\tau)=\text{const}=y_0$.

Отношение $k=y_0/x_0$ называется коэффициентом передачи системы (коэффициентом усиления).

1. Т.к. для установившегося режима и входной сигнал x , и выходной сигнал y постоянны, то все их производные равны нулю. Тогда дифференциальное уравнение превращается в: $a_0 y_0 = b_0 x_0$;

$$k = y_0/x_0 = b_0/a_0.$$

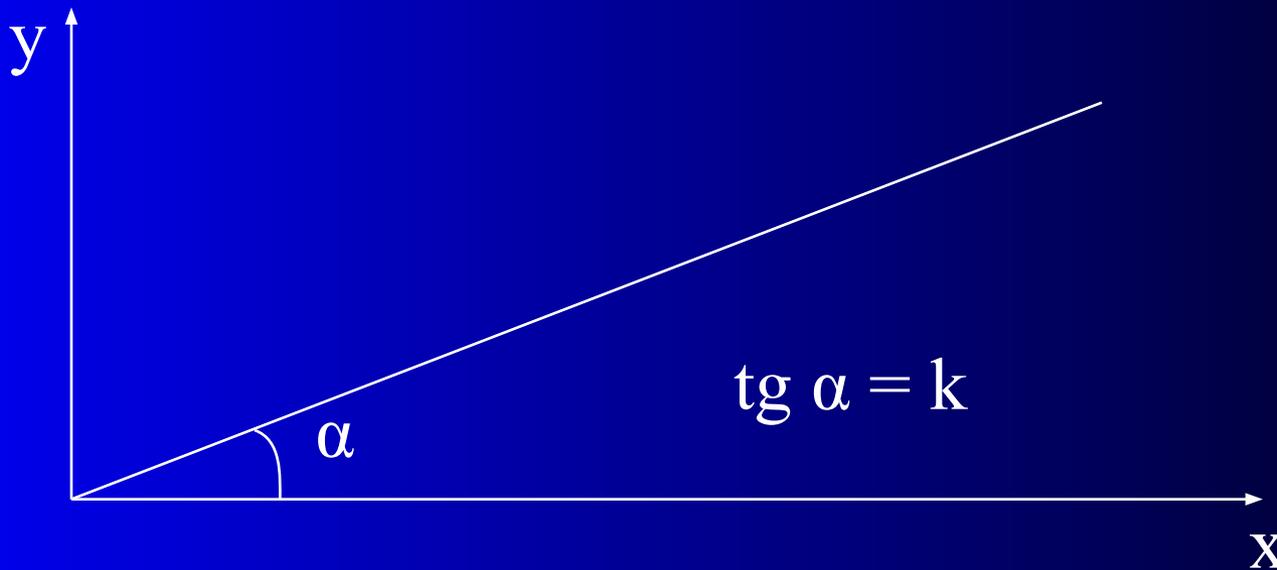
2. Коэффициент передачи получается из передаточной функции при $s=0$:

$$W(0) = k = b_0/a_0.$$

Коэффициент передачи системы

Коэффициент передачи характеризует статические свойства системы, т.е. ее свойства при очень медленном изменении входного сигнала:

$$y_{ст} = k \cdot x_{ст}$$



1.5. Преобразование структурных схем

Задано математическое описание (передаточные функции) звеньев (составных элементов) САР и структура системы.
Необходимо найти передаточную функцию всей системы.

1. Последовательное соединение звеньев:



$$W_1 = \frac{x_1(s)}{x(s)}; \quad x_1 = W_1 \cdot x$$

$$W_2 = \frac{x_2(s)}{x_1(s)}; \quad x_2 = W_2 \cdot x_1 = W_1 \cdot W_2 \cdot x$$

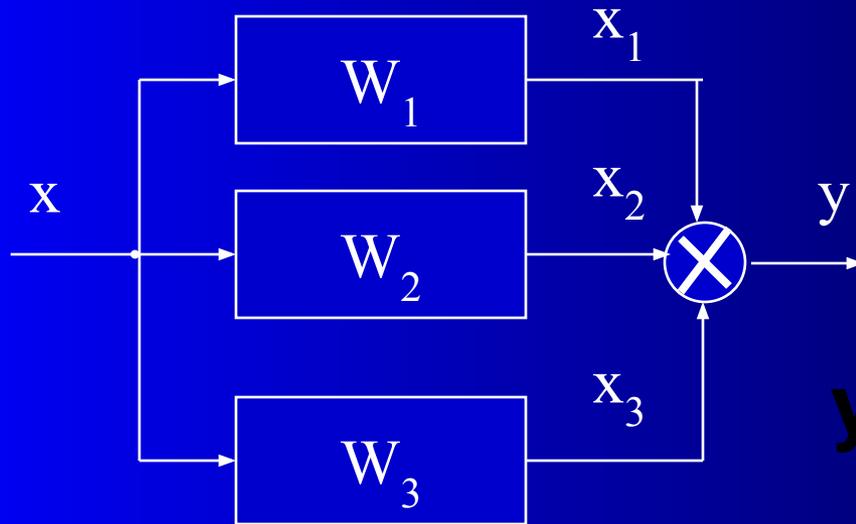
$$W_3 = \frac{y(s)}{x_2(s)}; \quad y = W_3 \cdot x_2 = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$$



$$W_0 = \frac{y(s)}{x(s)} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$$

Преобразование структурных схем

2. Параллельное согласное соединение звеньев:



$$y = x_1 + x_2 + x_3$$

$$W_i = \frac{x_i}{x}; \quad x_i = W_i \cdot x$$

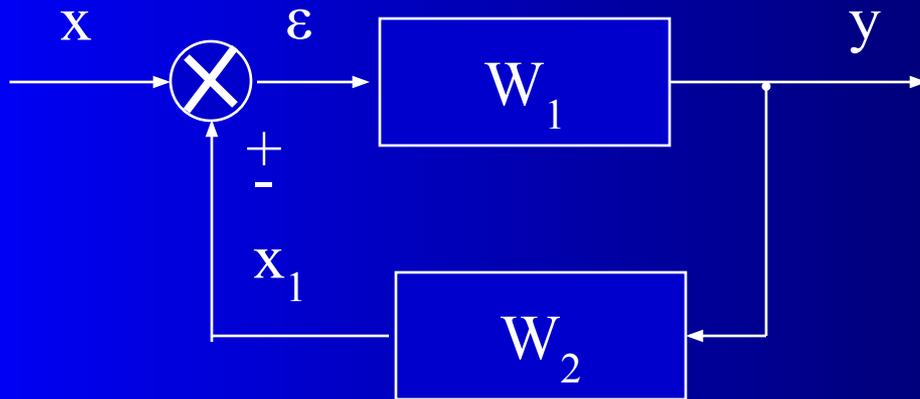
$$y = (W_1 + W_2 + W_3) \cdot x$$

$$W_0 = \frac{y}{x} = W_1 + W_2 + W_3$$



Преобразование структурных схем

3. Параллельное встречное соединение звеньев:



$$y = \varepsilon W_1 = (x \pm x_1) W_1 =$$

$$= (x \pm y W_2) W_1 = x W_1 \pm y W_1 W_2$$



$$y(1 \mp W_1 W_2) = x W_1$$

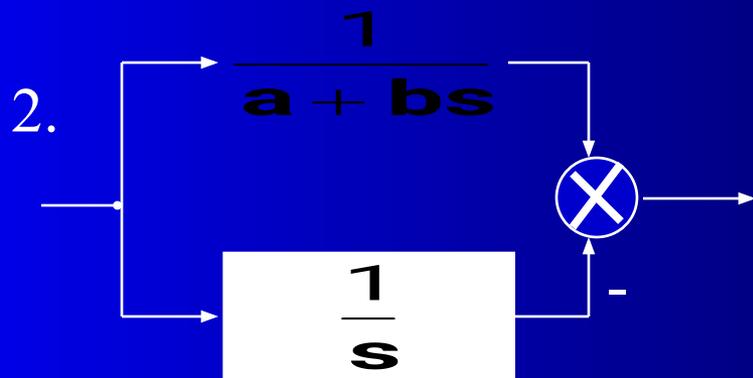
$$W_0 = \frac{y}{x} = \frac{W_1}{1 \mp W_1 W_2}$$

Преобразование структурных схем

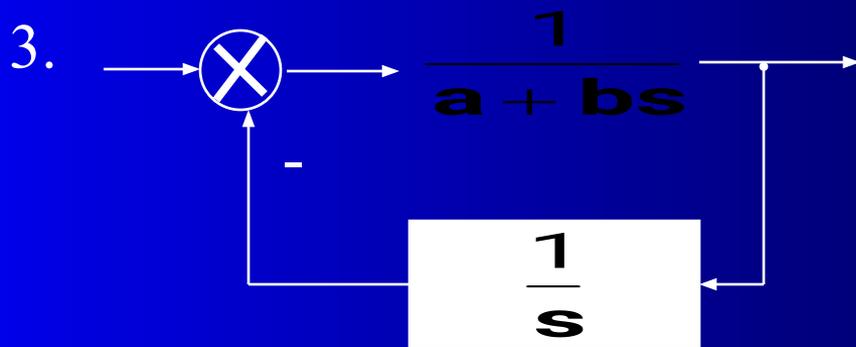
Примеры:



$$W_0 = \frac{1}{as+bs^2}$$



$$W_0 = \frac{1}{a+bs} - \frac{1}{s} = \frac{s-a-bs}{as+bs^2} = \frac{(1-b)s-a}{as+bs^2}$$



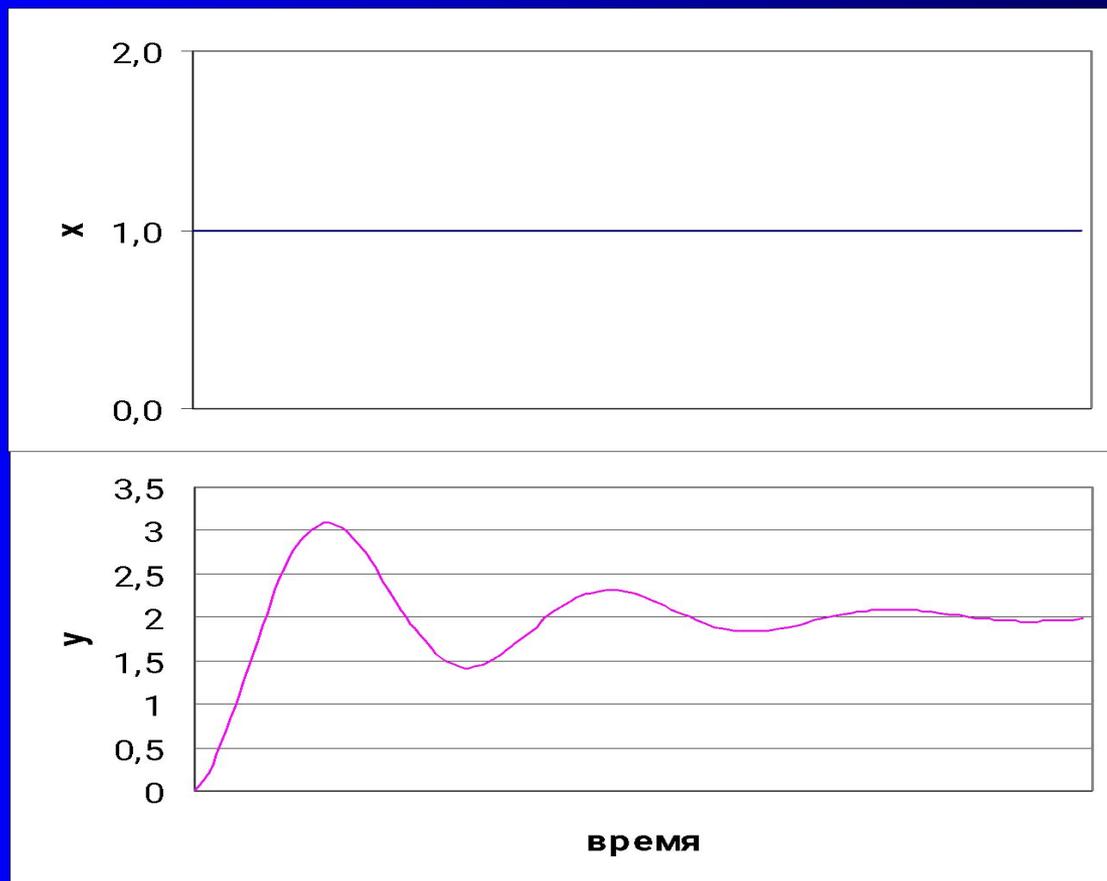
$$W_0 = \frac{1}{a+bs} \cdot \frac{s}{1 + \frac{1}{s(a+bs)}} = \frac{s}{a+(b+1)s}$$

1.6. Временные характеристики систем

Если на вход системы подать единичное ступенчатое

воздействие $x = \begin{cases} 0, \tau < 0 \\ 1, \tau \geq 0 \end{cases}$, то реакция системы (выходной сигнал)

называется **переходной характеристикой системы $h(\tau)$** .



Получение:

1. Экспериментально
2. Решением дифференциального уравнения

Например:

$$m\ddot{h} + G\dot{h} + Ch = 1$$

при $\begin{cases} h(0) = 0 \\ \dot{h}(0) = 0 \end{cases}$

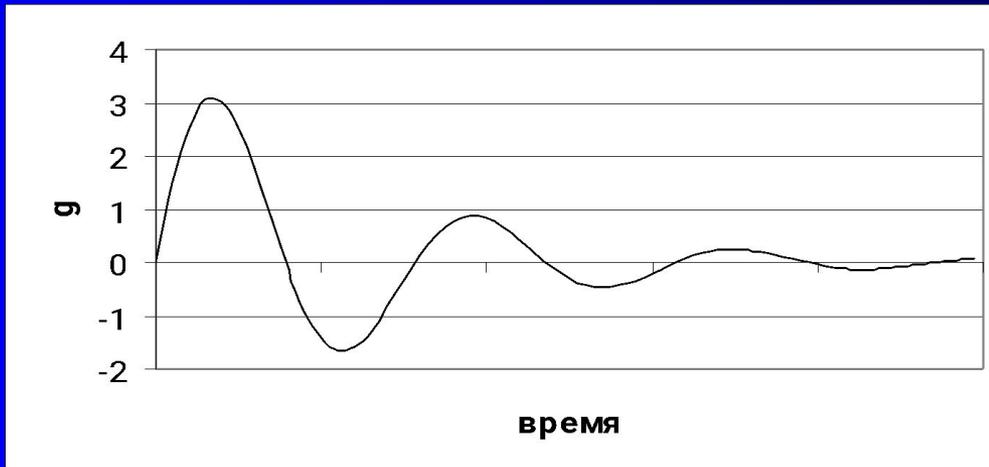
23
07/29/2023

Функция веса

Если на вход системы подать δ -функцию Хевисайда

$x = \delta(\tau) = \begin{cases} 0, \tau \neq 0 \\ \infty, \tau = 0 \end{cases}$, то реакция системы (выходной сигнал)

называется **функцией веса системы $g(\tau)$** .



Функция веса является производной от переходной характеристики:

$$g(\tau) = \frac{d}{d\tau} h(\tau)$$

$$h(\tau) = \int_0^{\tau} g(\tau) d\tau$$

Получение: 1. Экспериментально (входной сигнал – удар)

2. Решением дифференциального уравнения

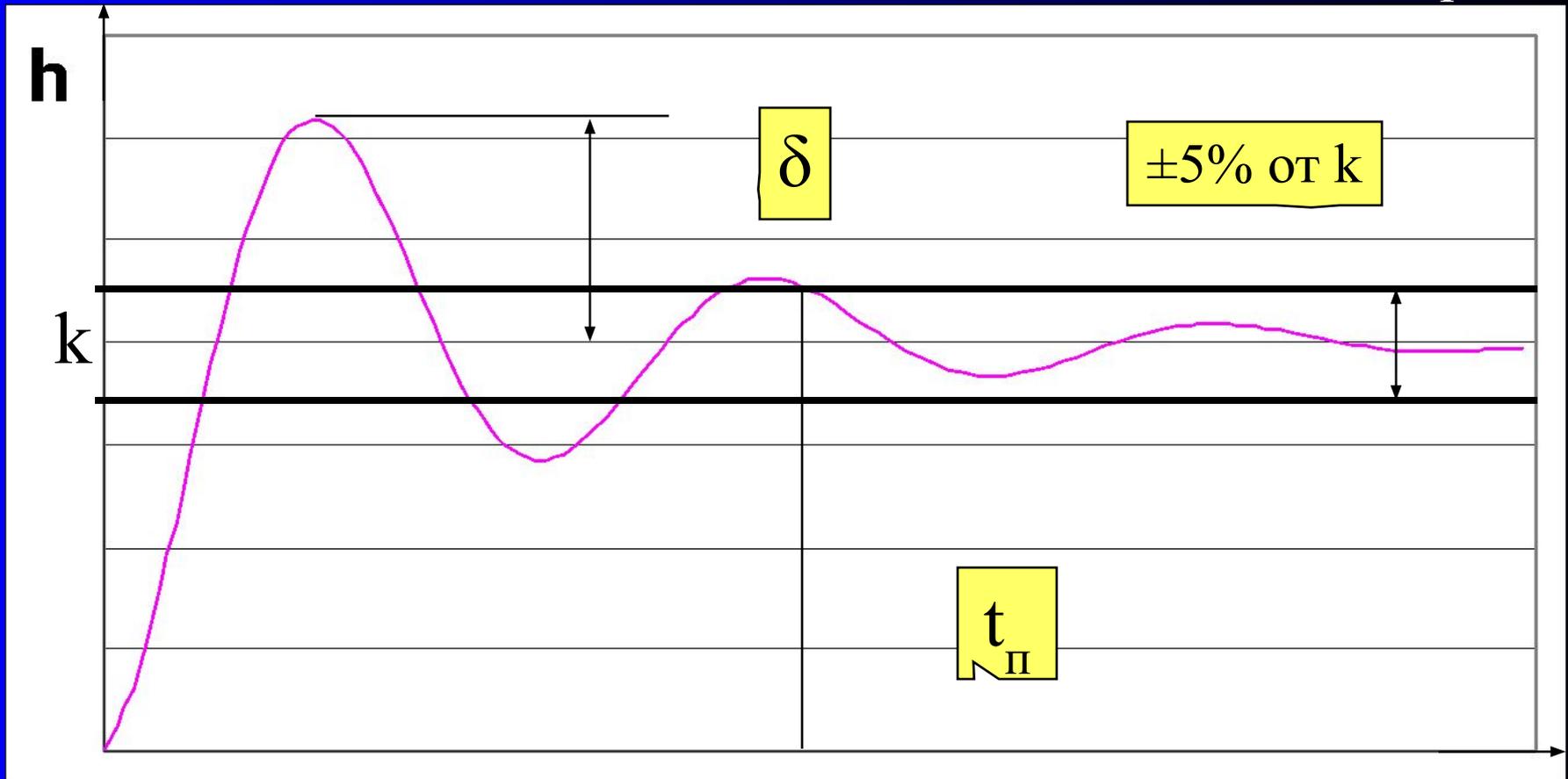
Временные характеристики систем

Временные характеристики $h(\tau)$ и $g(\tau)$ наиболее полно отражают динамические свойства системы (изменение ее параметров во времени). Они показывают как система реагирует на ступенчатый (резко изменяющийся) входной сигнал и как затем она устанавливается у постоянного значения (успокаивается). Именно по этим характеристикам можно определить насколько САР *быстро* и *точно* реагирует на входной сигнал.

Для сравнения динамических свойств систем кривые $h(\tau)$ и $g(\tau)$ использовать неудобно. Для этого на этих кривых выделяют специальные параметры качества. Обычно параметры качества определяют по переходной характеристике. По этим параметрам можно сравнить быстродействие, чувствительность САР и т.п.

Параметры качества на переходной характеристике

1. Коэффициент передачи (усиления) k .
2. Перерегулирование δ - в абсолютных значениях или в процентах от k .
3. Время переходного процесса t_{Π} .
4. Колебательность N – количество полных колебаний за время t_{Π} .



Пример расчета переходной характеристики

$m\ddot{y} + G\dot{y} + Cy = 1$. Частное решение: $y = k = 1/C$

Однородное уравнение $m\ddot{y} + G\dot{y} + Cy = 0$.

Характеристическое уравнение $m\mathbf{r}^2 + G\mathbf{r} + C = 0$; $\mathbf{r} = \frac{-G \pm \sqrt{G^2 - 4mC}}{2m}$

1. При $G^2 > 4mC$; r_1 и r_2 - действительные числа и решение ДУ имеет вид: $y = k + C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau}$

$\dot{y} = C_1 r_1 e^{r_1 \tau} + C_2 r_2 e^{r_2 \tau}$. Из нач. условий: $\begin{cases} k + C_1 + C_2 = 0 \\ C_1 r_1 + C_2 r_2 = 0 \end{cases}$

2. При $G^2 < 4mC$ $r_{1,2} = b \pm j\omega$ и решение ДУ имеет вид: $y = k + e^{b\tau} (C_1 \sin \omega \tau + C_2 \cos \omega \tau)$

$\dot{y} = e^{b\tau} [b(C_1 \sin \omega \tau + C_2 \cos \omega \tau) + \omega(C_1 \cos \omega \tau - C_2 \sin \omega \tau)]$. Из нач. условий: $\begin{cases} k + C_2 = 0 \\ bC_2 + \omega C_1 = 0 \end{cases}$

$\dot{y} = e^{b\tau} [(bC_1 - \omega C_2) \sin \omega \tau + (bC_2 + \omega C_1) \cos \omega \tau]$

ОКОНЧАТЕЛЬНО:

$h(\tau) = \begin{cases} k + C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} & \text{при } G^2 > 4mC; \\ k + e^{b\tau} (C_1 \sin \omega \tau + C_2 \cos \omega \tau) & \text{при } G^2 \leq 4mC; \end{cases}$

$g(\tau) = \begin{cases} C_1 r_1 e^{r_1 \tau} + C_2 r_2 e^{r_2 \tau} & \text{при } G^2 > 4mC; \\ e^{b\tau} [(bC_1 - \omega C_2) \sin \omega \tau + (bC_2 + \omega C_1) \cos \omega \tau] & \text{при } G^2 \leq 4mC; \end{cases}$

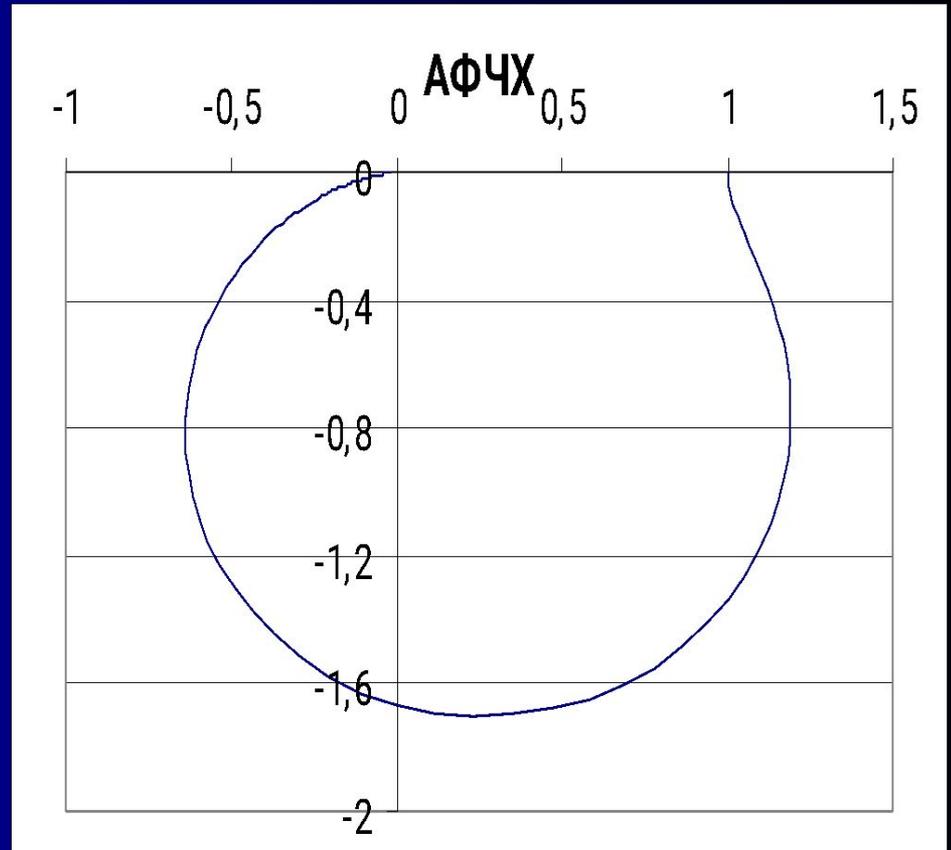
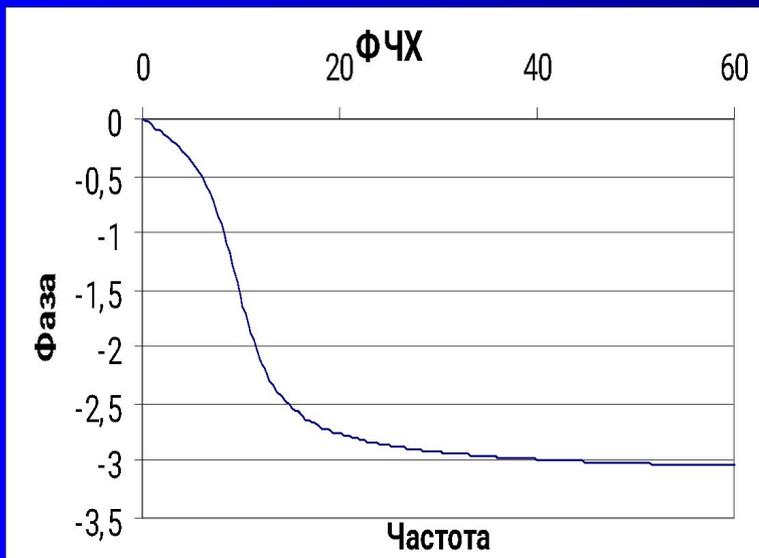
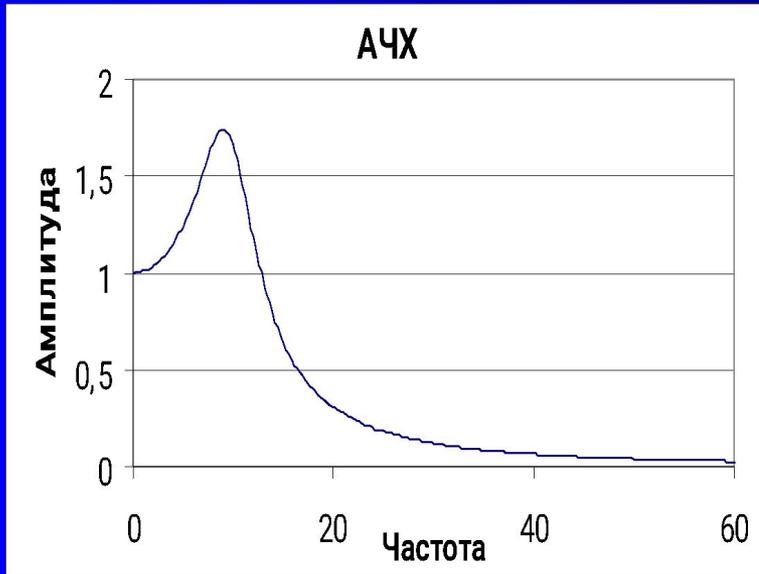
1.7. Частотные характеристики систем

Если на вход системы подать гармонический сигнал $x = a \sin \omega t$, то на выходе системы по истечении времени переходного процесса установится также гармонический сигнал той же частоты, но другой амплитуды и фазы: $y = b \sin (\omega t + \phi)$. При этом $b = b(\omega)$ и $\phi = \phi(\omega)$. Эти зависимости и определяют *частотные свойства системы*.

Частотные характеристики:

1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ): $A(\omega) = b(\omega)/a$ (при $a=1$ $A(\omega) = b(\omega)$).
2. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ): $\phi = \phi(\omega)$.
3. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ): показывает связь амплитуды $A(\omega)$ и фазы $\phi(\omega)$ в полярных координатах.

Примеры частотных характеристик



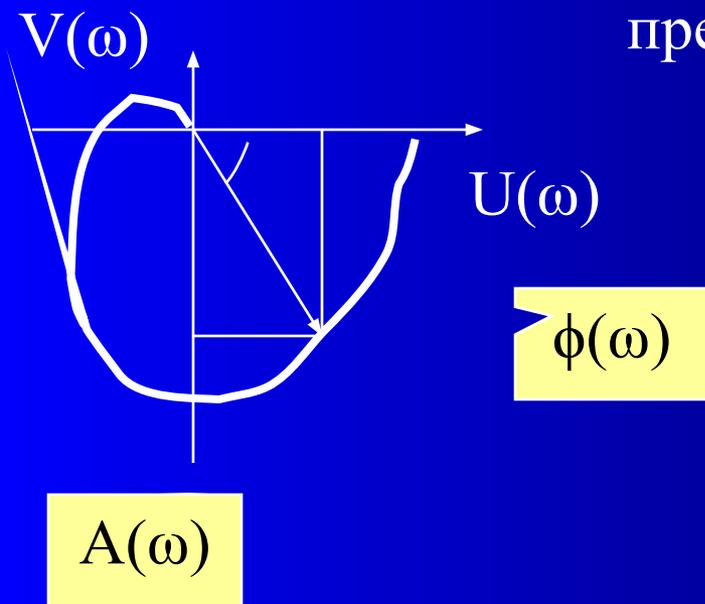
Получение частотных характеристик

Из передаточной функции системы

Заменим в передаточной функции $W(s)$ s на $j\omega$, где $j^2 = -1$:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$$

Построим на комплексной плоскости годограф – графическое представление АФЧХ.



Из геометрических построений:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi) = \frac{V(\omega)}{A(\omega)} \\ \cos(\varphi) = \frac{U(\omega)}{A(\omega)} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi) = \frac{V(\omega)}{A(\omega)} \\ \cos(\varphi) = \frac{U(\omega)}{A(\omega)} \end{array} \right.$$

Получение частотных характеристик

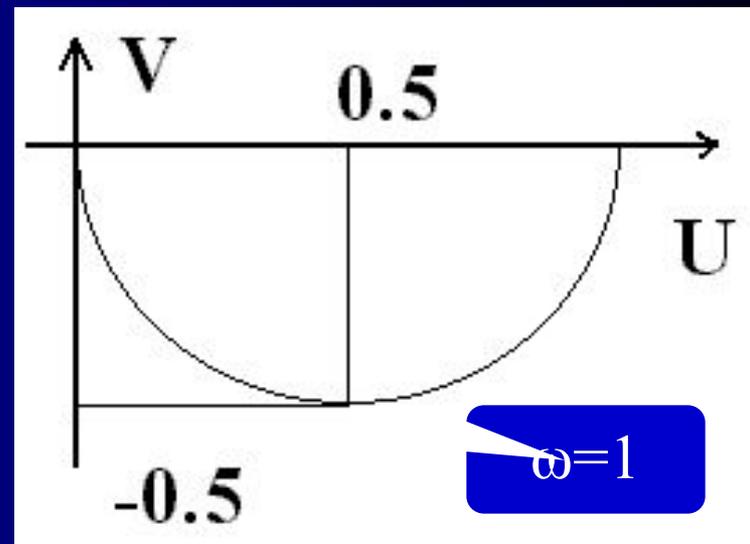
Пример:

$$W(s) = \frac{1}{s+1}; \quad W(j\omega) = \frac{1}{j\omega+1} = \frac{1-j\omega}{(1-j\omega)(1+j\omega)}$$

$$W(j\omega) = \frac{1-j\omega}{1+\omega^2} = \frac{1}{1+\omega^2} - \frac{\omega}{1+\omega^2}j = U(\omega) + jV(\omega)$$

$$A(\omega) = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{\sqrt{1+\omega^2}}{1+\omega^2} = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}};$$

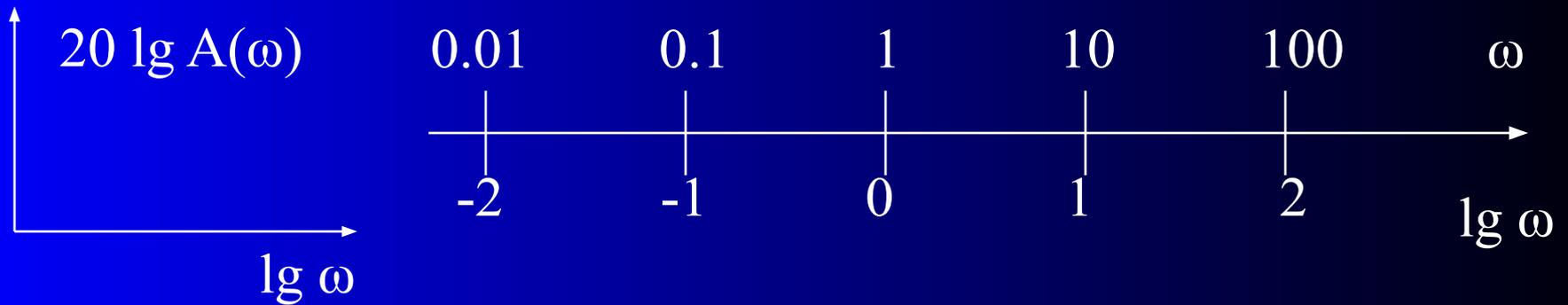
ω	U	V
0	1	0
...
1	0.5	-0.5
...
∞	0	0



Логарифмические частотные характеристики

Позволяют более подробно рассмотреть начало и окончание частотной характеристики за счет логарифмического масштаба по осям.

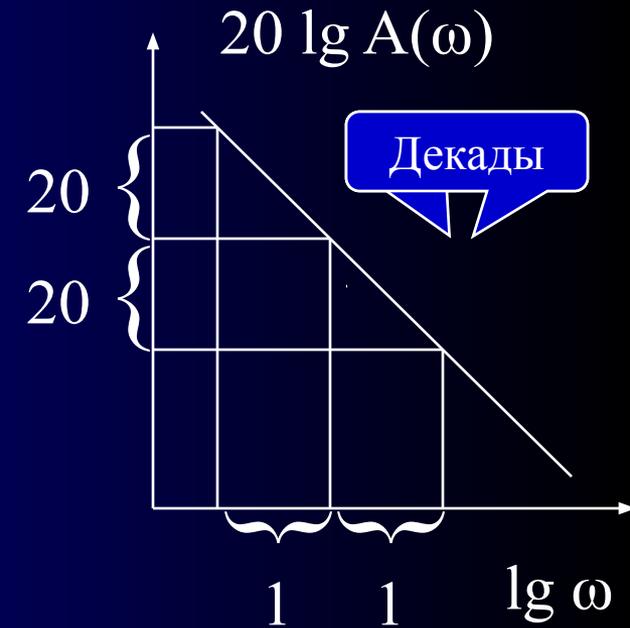
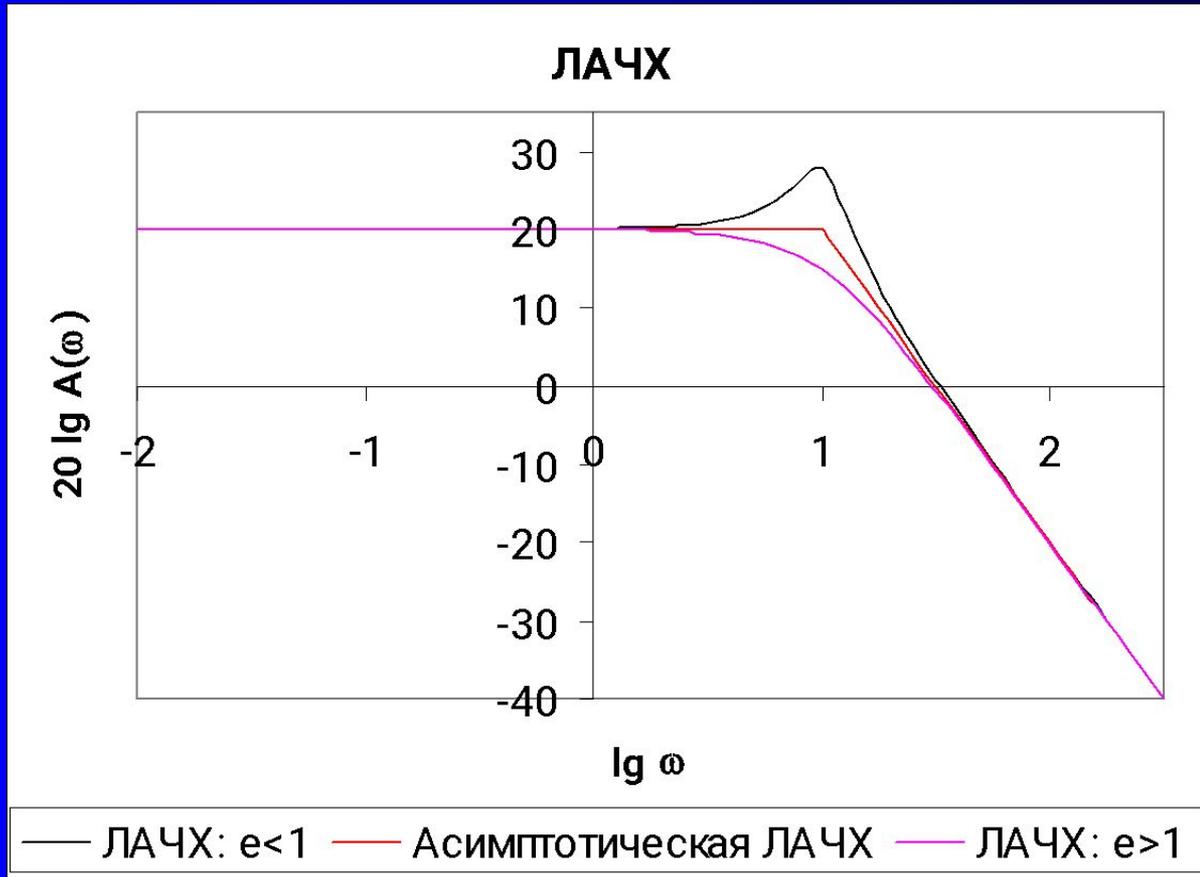
Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ):



Логарифмическая фазо-частотная характеристика:



Логарифмические частотные характеристики



Асимптотическая ЛАЧХ – это приближенное представление ЛАЧХ ломаной линией со стандартными углами наклона, кратными ± 20 дб/дек.

Леонов Сергей Леонидович

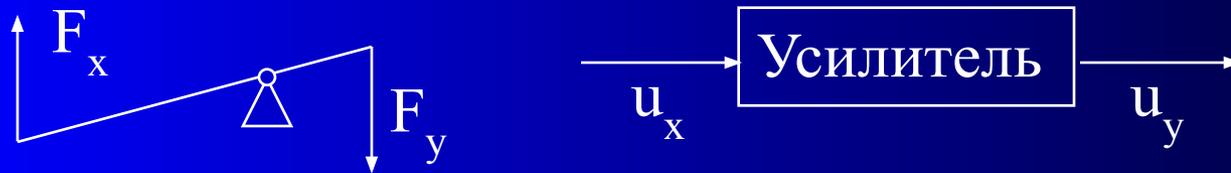
33
07/29/2023

1.8. Типовые звенья САР

1. Усилительное звено

Уравнение: $y = k x$; Передаточная функция: $W(s) = k$.

Примеры: рычаг, редуктор, широкополосный усилитель и т.п.



Типовые звенья САР

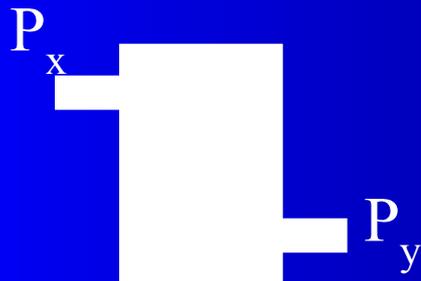
2. Апериодическое звено первого порядка:

Уравнение: $T\dot{y} + y = kx$

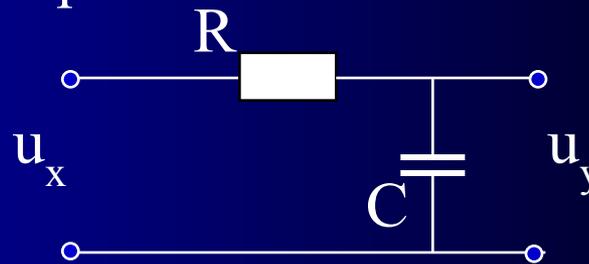
Передаточная функция: $(Ts + 1)y = kx; W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$

Примеры:

1. Рессивер

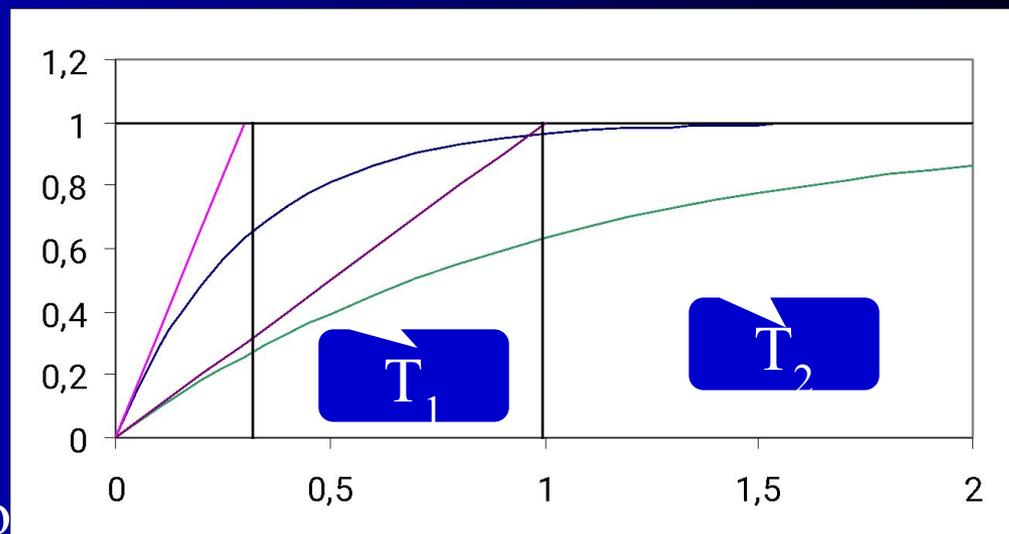


2. Фильтр



Переходная характеристика $h(\tau)$

$$T_1 < T_2$$



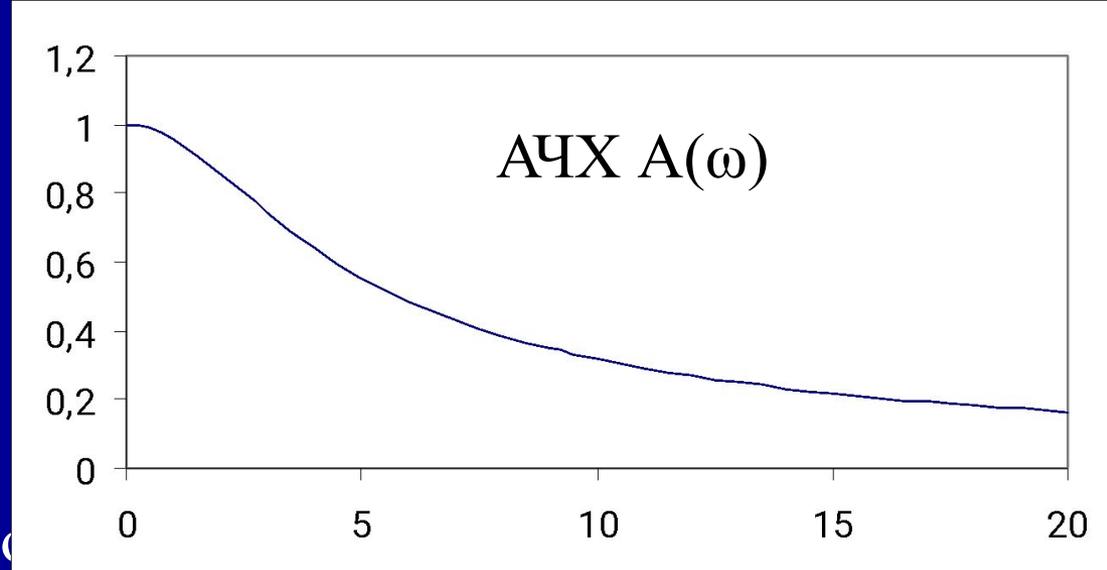
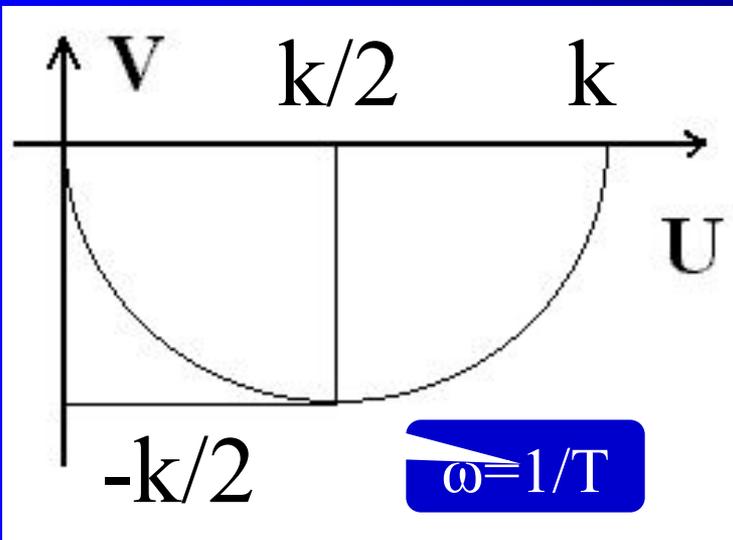
Типовые звенья САР

Апериодическое звено первого порядка (продолжение):

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1}; \quad W(j\omega) = \frac{k(1-Tj\omega)}{(1-Tj\omega)(1+Tj\omega)} = \frac{k(1-Tj\omega)}{1+T^2\omega^2}$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{1+T^2\omega^2} - \frac{kT\omega}{1+T^2\omega^2}j = U(\omega) + V(\omega)$$

$$A(\omega) = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{k}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}$$



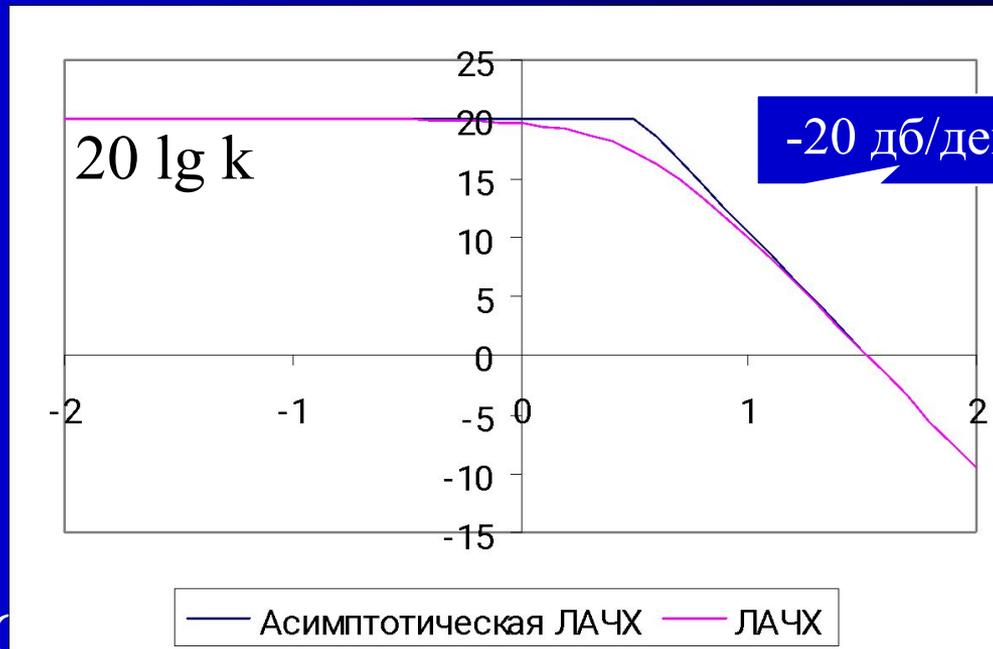
Типовые звенья САР

Апериодическое звено первого порядка (продолжение):

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

a) $0 < \omega \ll 1/T \Rightarrow T^2\omega^2 \ll 1 \Rightarrow L(\omega) \approx 20\lg k$

b) $\omega \gg 1/T \Rightarrow T^2\omega^2 \gg 1 \Rightarrow L(\omega) \approx 20\lg k - 20\lg T - 20\lg \omega$



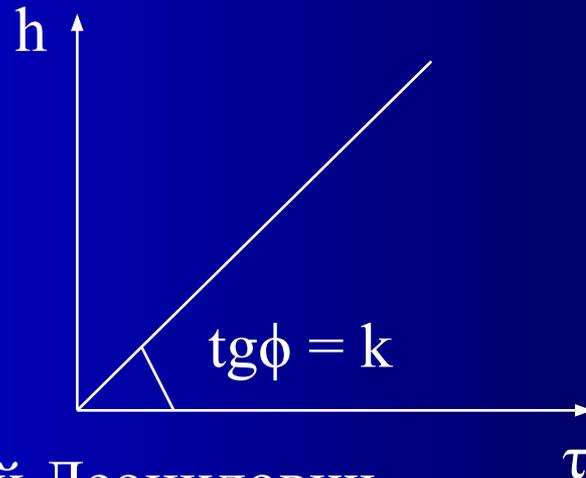
Типовые звенья САР

3. Интегрирующее звено:

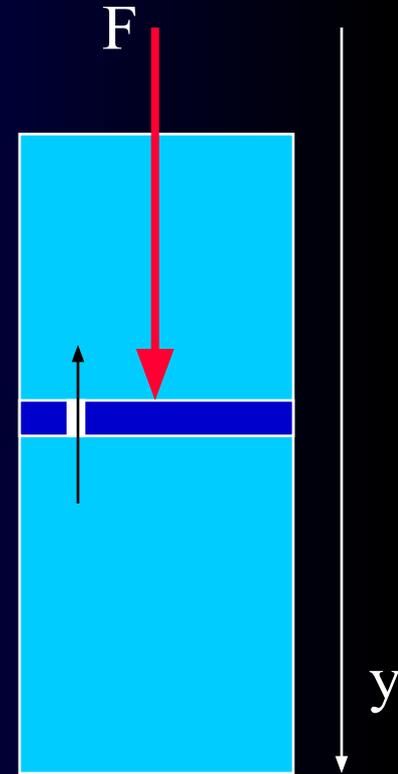
Уравнение: $\dot{y} = kx$; $y = k \int_0^{\tau} x d\tau$

Передаточная функция: $sy = kx$; $W(s) = \frac{k}{s}$

Переходная характеристика $h(\tau) = k\tau$



Пример:



Типовые звенья САР

Интегрирующее звено (продолжение)

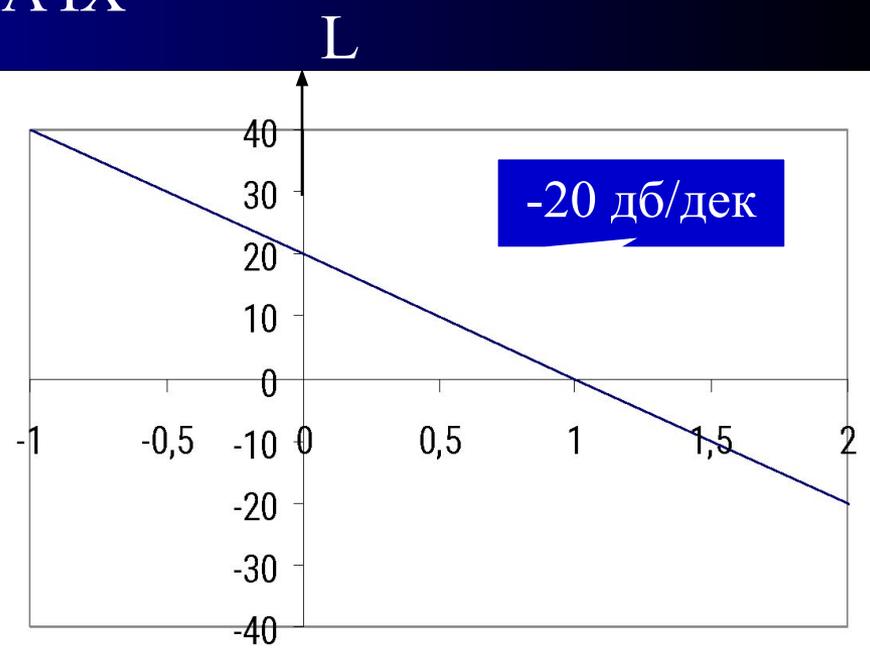
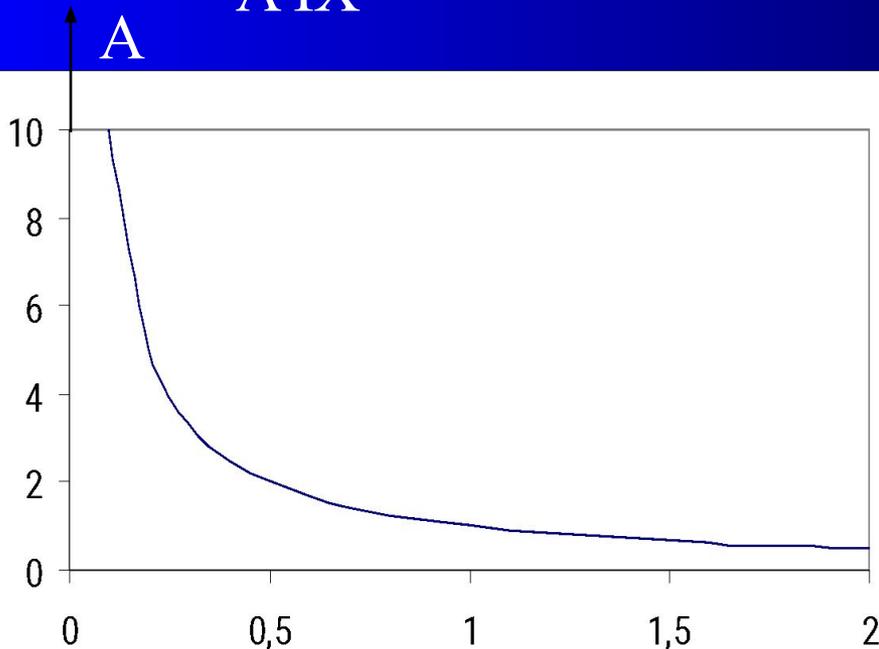
$$W(j\omega) = \frac{k}{j\omega} = -\frac{k}{\omega} j; \quad A(\omega) = \frac{k}{\omega};$$

$$L = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega$$

$$\text{и\ddot{d}e } \omega = 1 \quad (\lg \omega = 0) \quad L = 20 \lg k$$

АЧХ

ЛАЧХ



Типовые звенья САР

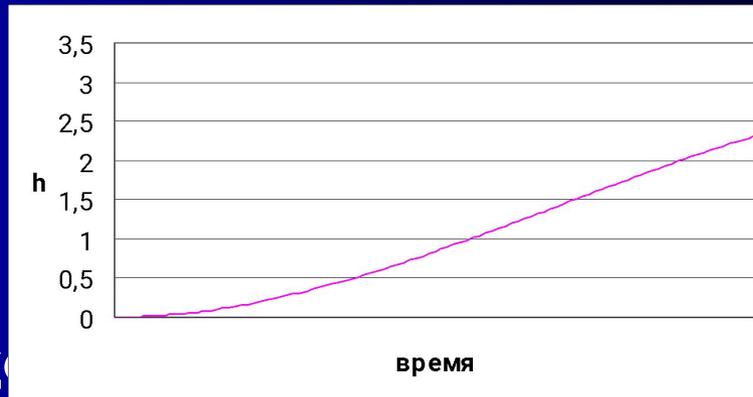
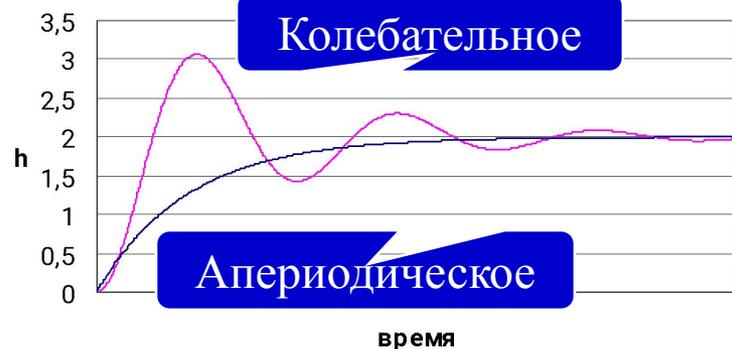
4. Звенья второго порядка:

Уравнение: $T^2 \ddot{y} + 2eT\dot{y} + y = kx;$

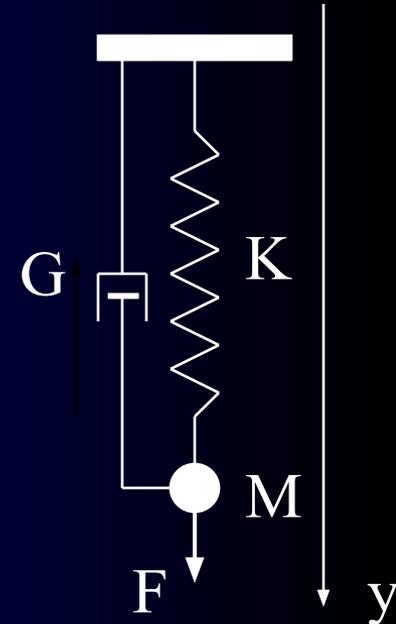
Передаточная функция: $W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2eTs + 1}$

1. При $0 < e < 1$ – колебательное звено (корни характеристического уравнения комплексные)
2. При $e \geq 1$ – апериодическое звено второго порядка (корни характеристического уравнения действительные)

Переходная характеристика:



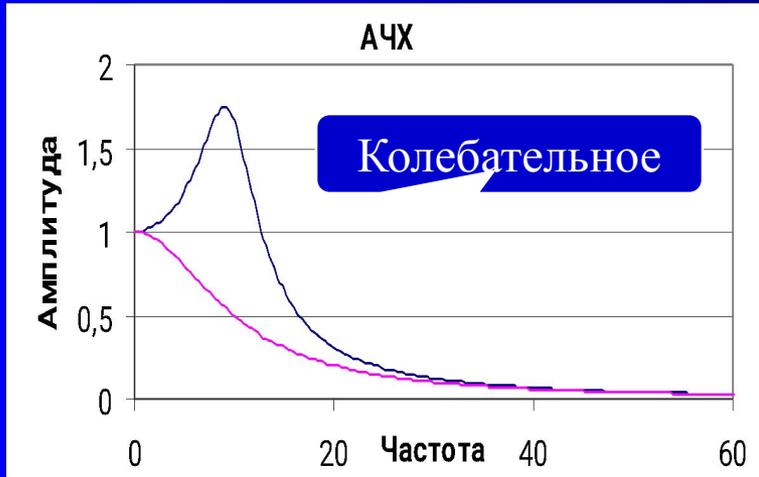
Пример:



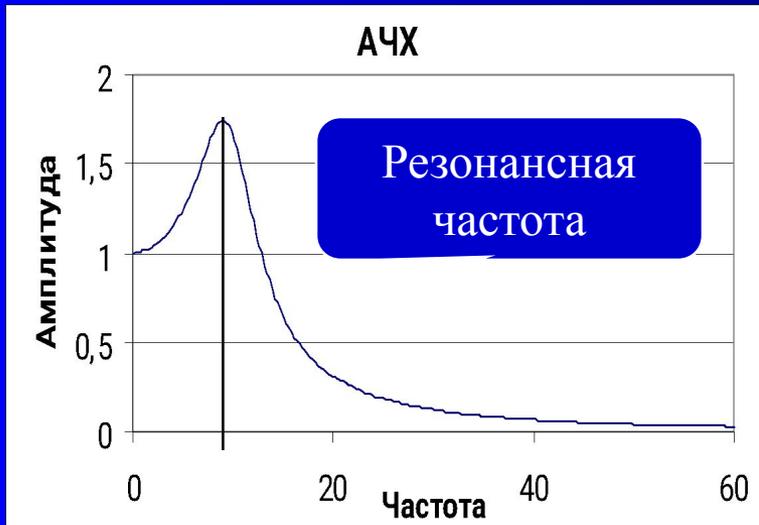
Типовые звенья САР

Звенья второго порядка (продолжение):

Пример:



Апериодическое

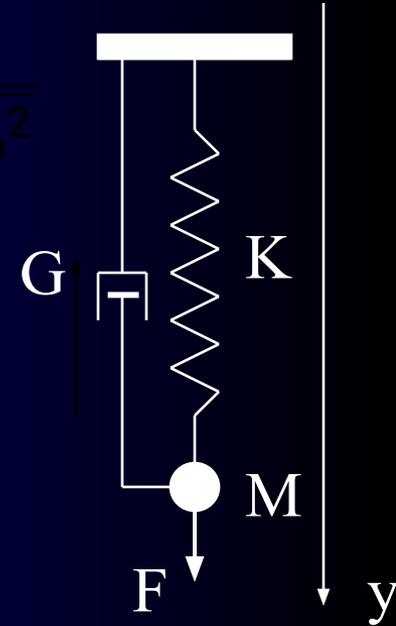


$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4T^2e^2\omega^2}}$$

$$\omega_{рез} = \frac{\sqrt{1 - 2e^2}}{T};$$

При $e \rightarrow 0$ $\omega_{рез} \approx 1/T$

$$A(\omega_{рез}) = \frac{k}{2e\sqrt{1 - e^2}}$$



При $0 < e < 1$ – колебательное звено, но тах на АЧХ имеется только при $e^2 < 0,5$ ($0 < e < 0,707$).

Типовые звенья САР

Звенья второго порядка (продолжение):

Пример:

3. При $\epsilon=0$ – консервативное звено.

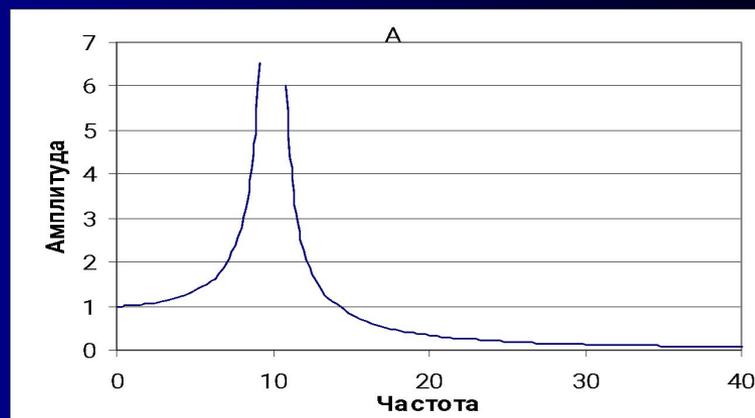
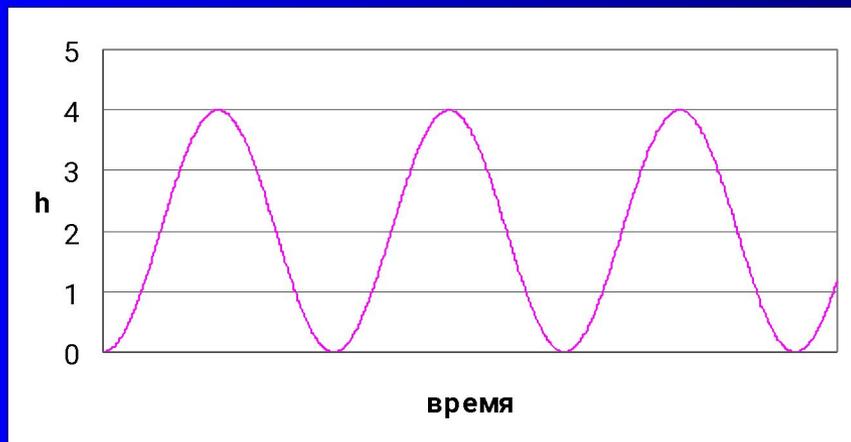
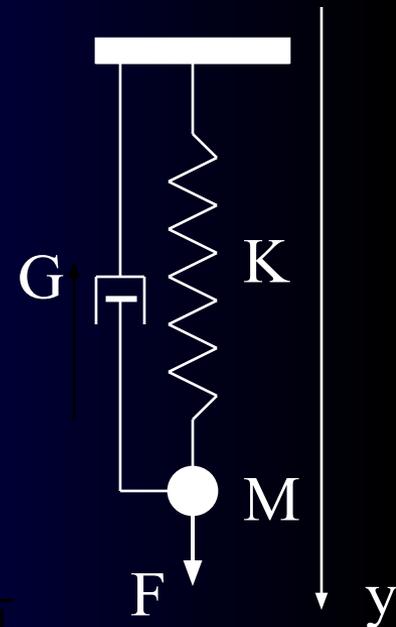
Передаточная функция: $W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 1}$

Переходная характеристика:

АЧХ:

$$T^2 \ddot{y} + y = kx;$$

$$A(\omega) = \frac{k}{|1 - T^2 \omega^2|}$$



Типовые звенья САР

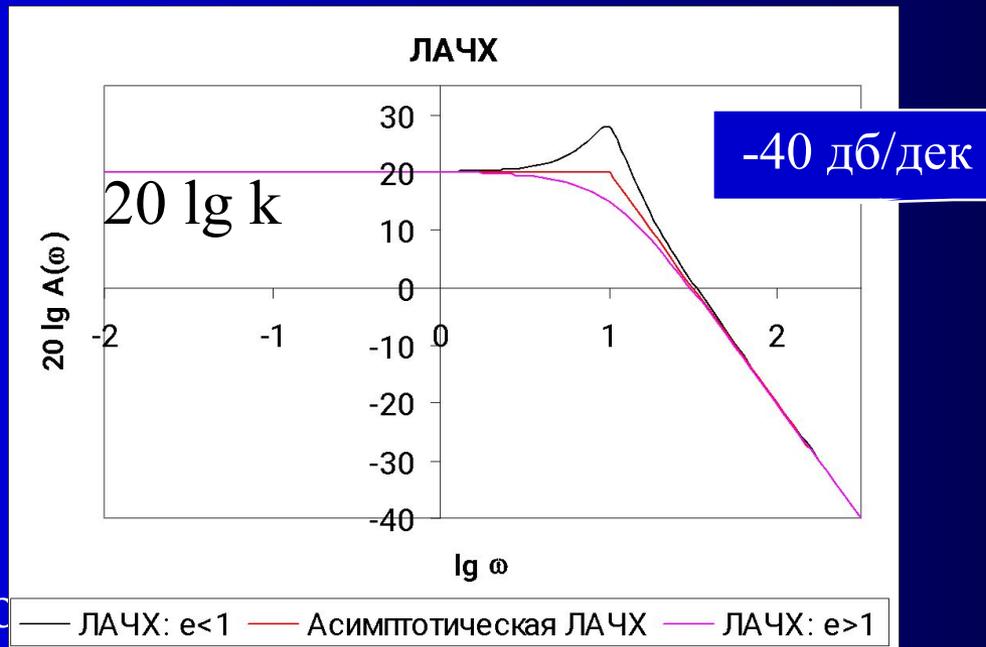
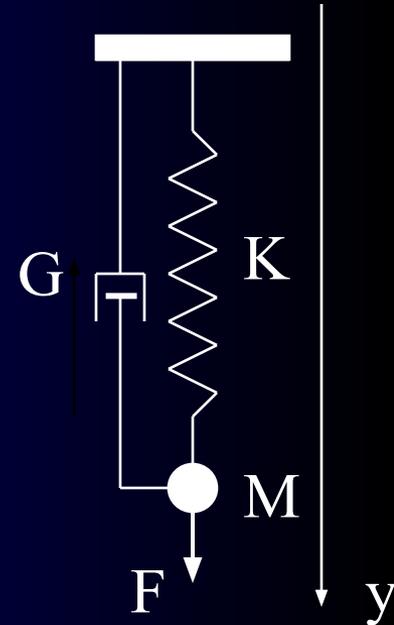
Звенья второго порядка (продолжение):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \left(\frac{k}{|1 - T^2 \omega^2|} \right) = 20 \lg k - 20 \lg |1 - T^2 \omega^2|$$

a) $0 < \omega \ll 1/T \Rightarrow T^2 \omega^2 \ll 1 \Rightarrow L(\omega) \approx 20 \lg k$

b) $\omega \gg 1/T \Rightarrow T^2 \omega^2 \gg 1 \Rightarrow L(\omega) \approx 20 \lg k - 40 \lg T - 40 \lg \omega$

Пример:



Типовые звенья САР

Звенья второго порядка (продолжение):

Апериодическое звено второго порядка можно представить как два последовательно соединенных апериодических звена первого порядка:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2eTs + 1} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2 s + 1}$$

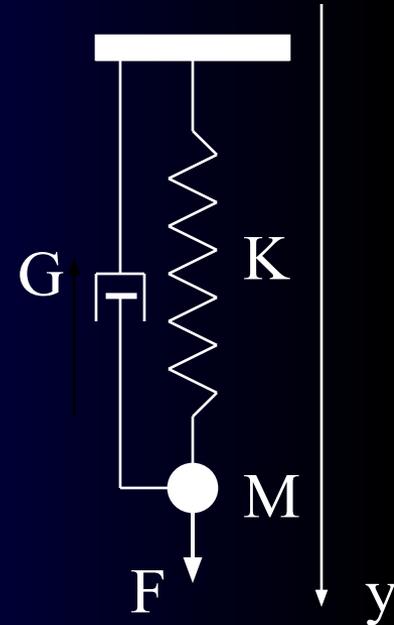
$$k = k_1 \cdot k_2$$

$$T^2 = T_1 \cdot T_2$$

$$2eT = T_1 + T_2$$

ЛАЧХ последовательно соединенных апериодических звеньев первого порядка более точно отображают ЛАЧХ апериодического звена второго порядка

Пример:



Типовые звенья САР

5. Идеальное дифференцирующее звено:

Уравнение: $y = k\dot{x}$ Пример: тахогенератор

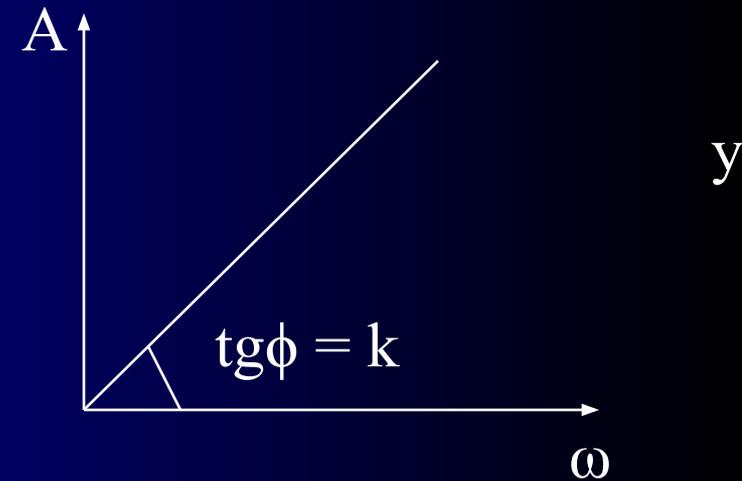
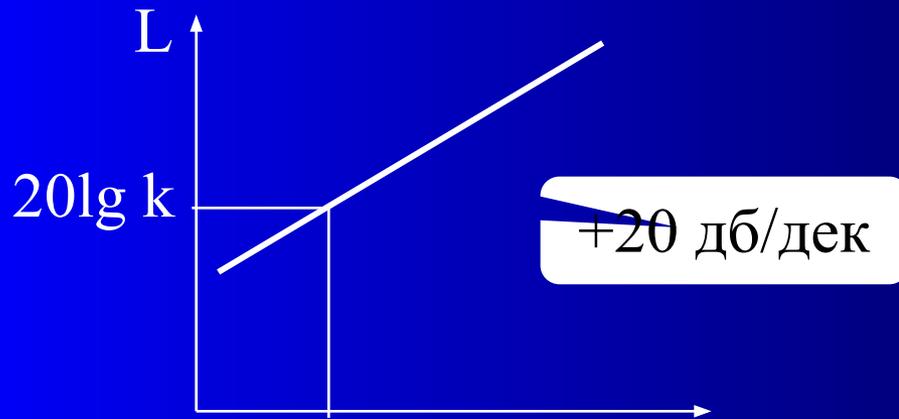


Передаточная функция: $W(s) = ks$

Переходная характеристика $h(\tau) = \delta(\tau)$

АЧХ: $A(\omega) = k\omega$

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



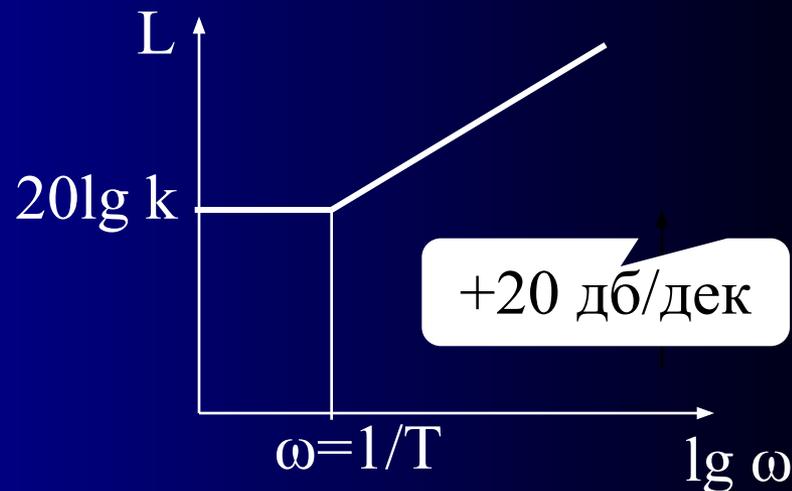
Типовые звенья САР

6. Форсирующее звено:

Уравнение: $y = k(Tx + x)$

Передаточная функция:

$$W(s) = k(Ts + 1)$$

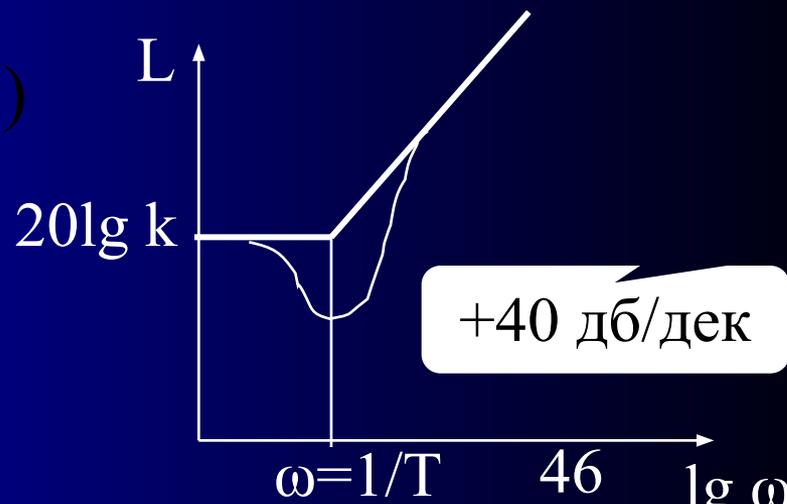


7. Форсирующее звено второго порядка:

Уравнение: $y = k(T^2x'' + 2eTx' + x)$

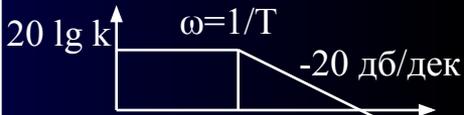
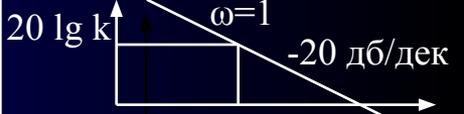
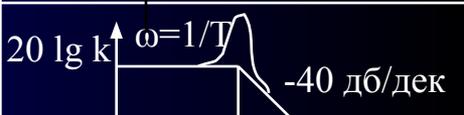
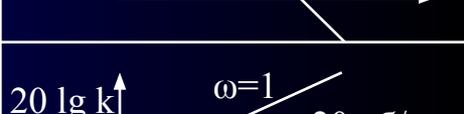
Передаточная функция:

$$W(s) = k(T^2s^2 + 2eTs + 1)$$



Типовые звенья САР

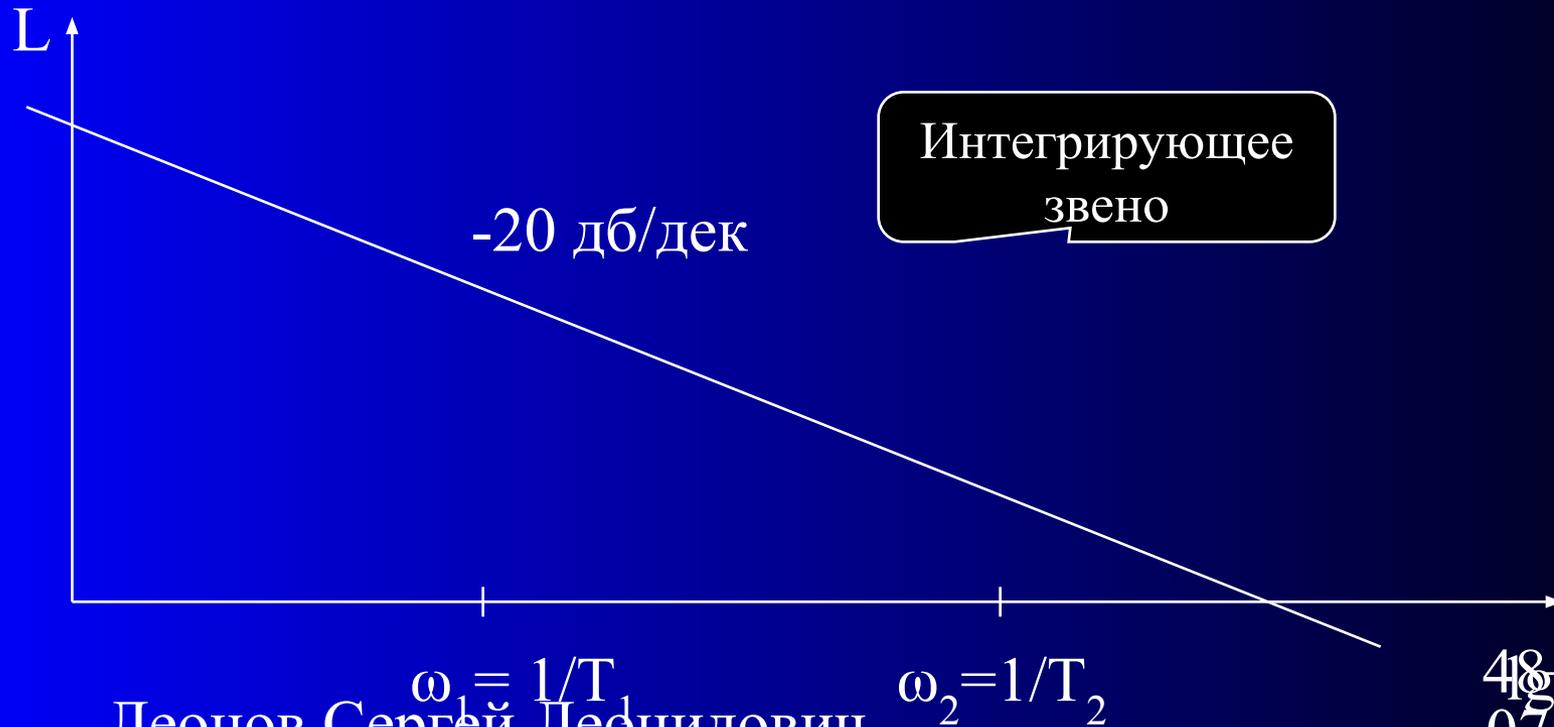
Сводная таблица:

Название	Уравнение	Передат. функция	ЛАЧХ
Усилительное	$y = kx$	$W = k$	
Апериодическое 1-го порядка	$T\dot{y} + y = kx$	$W = \frac{k}{Ts + 1}$	
Интегрирующее	$\dot{y} = kx$	$W = \frac{k}{s}$	
Колебательное	$T^2\ddot{y} + 2eT\dot{y} + y = kx$ $0 < e < 1$	$W = \frac{k}{T^2s^2 + 2eTs + 1}$	
Дифференцирующее	$y = k\dot{x}$	$W = ks$	
Форсирующее	$y = k(T\dot{x} + x)$	$W = k(Ts + 1)$	
Форсирующее 2-го порядка	$y = k(T^2\ddot{x} + 2eT\dot{x} + x)$	$W = k(T^2s^2 + 2eTs + 1)$	

1.9. Построение асимптотических ЛАЧХ

$$1. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

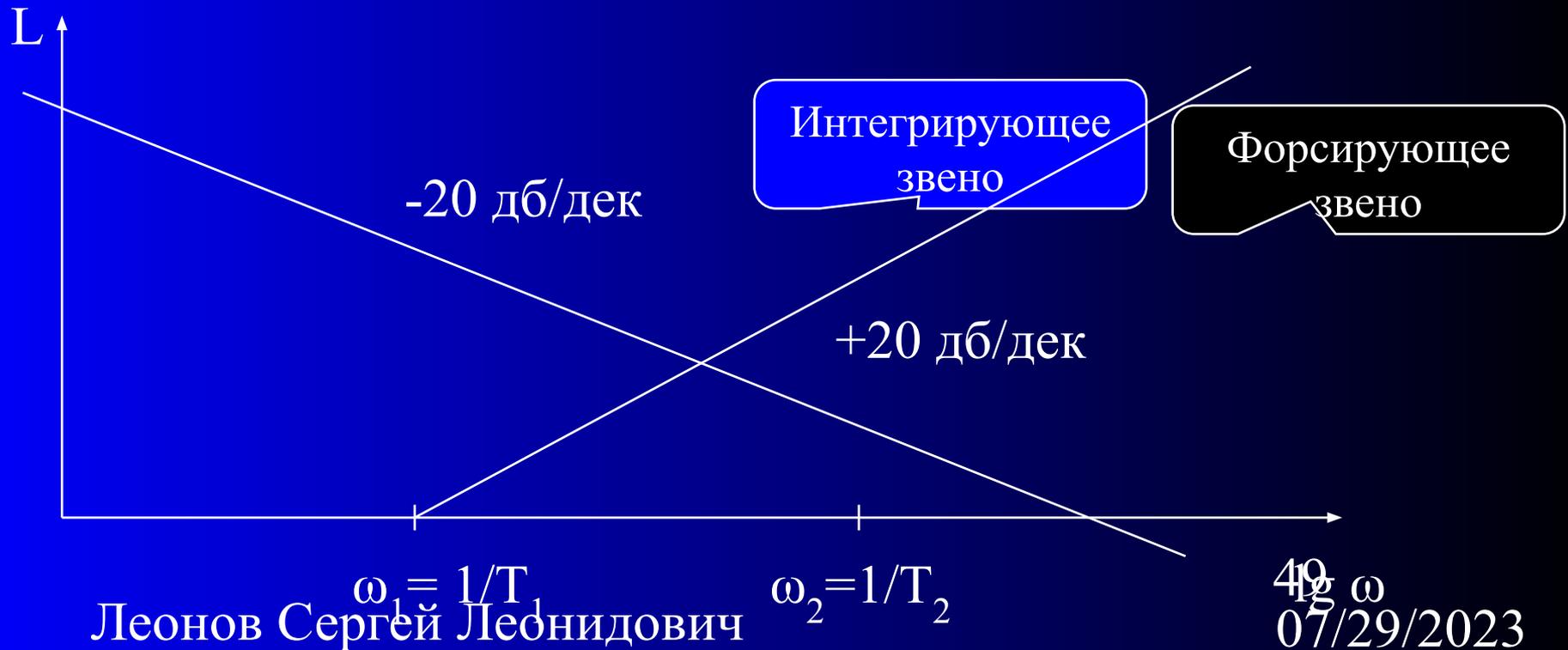
$$1/T_1 < 1/T_2$$



1.9. Построение асимптотических ЛАЧХ

$$1. W(s) = \frac{k(T_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1 s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2 s + 1)}$$

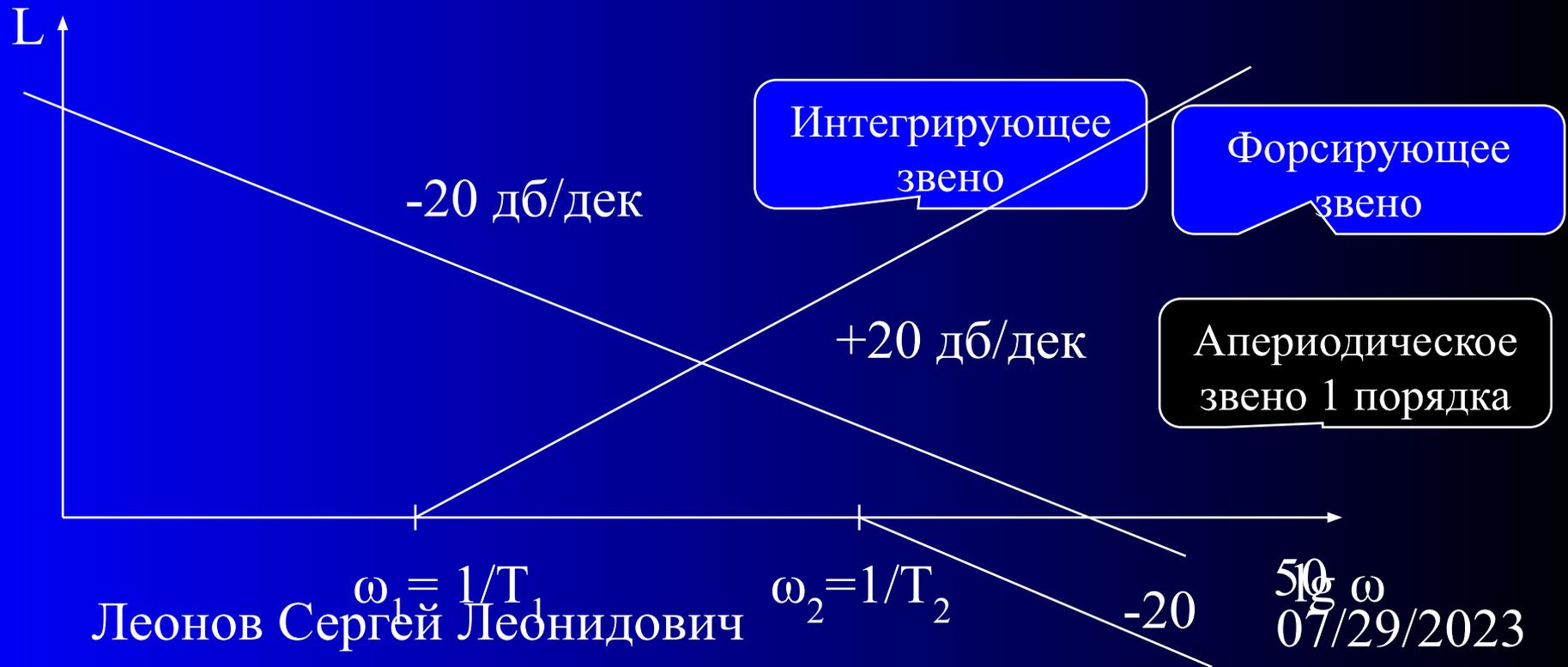
$$1/T_1 < 1/T_2$$



1.9. Построение асимптотических ЛАЧХ

$$1. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

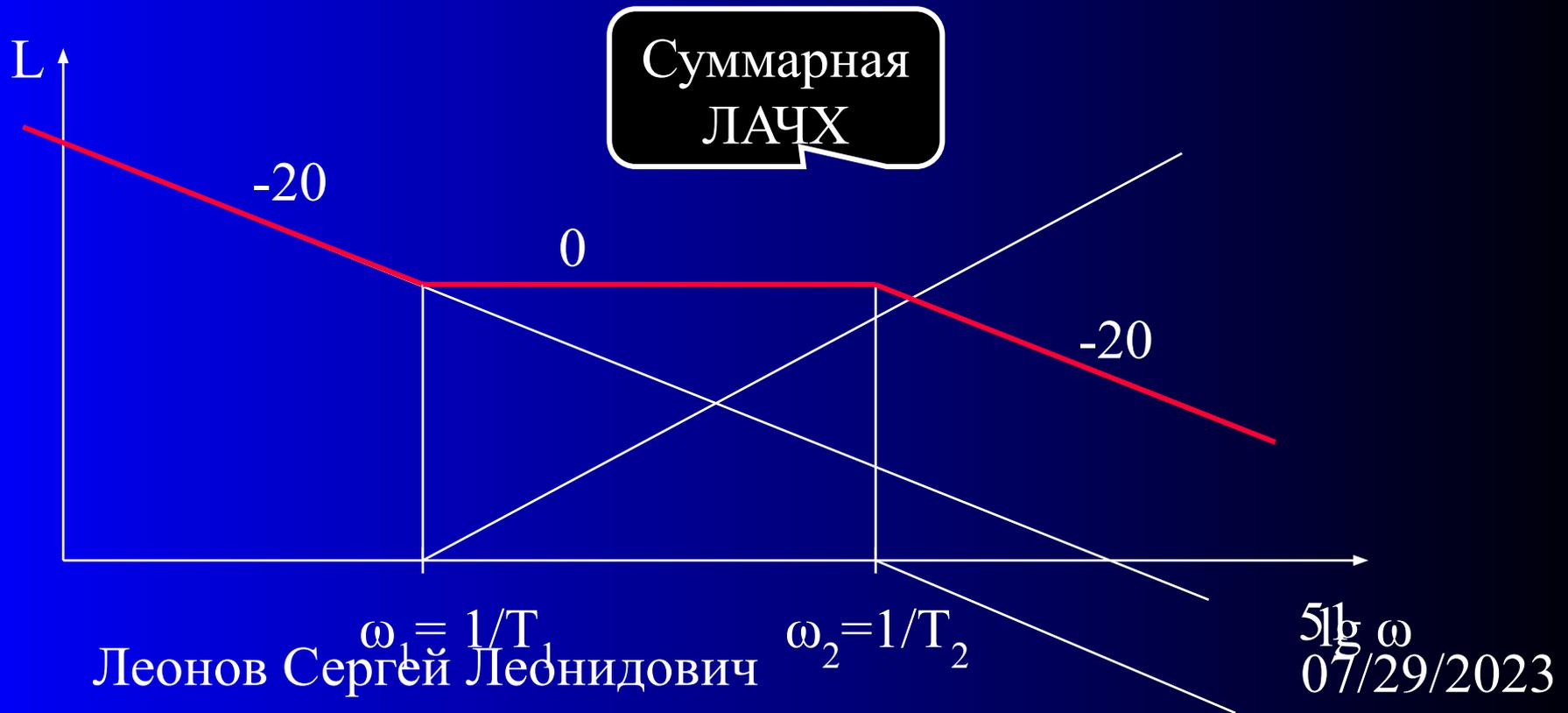
$$1/T_1 < 1/T_2$$



1.9. Построение асимптотических ЛАЧХ

$$1. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

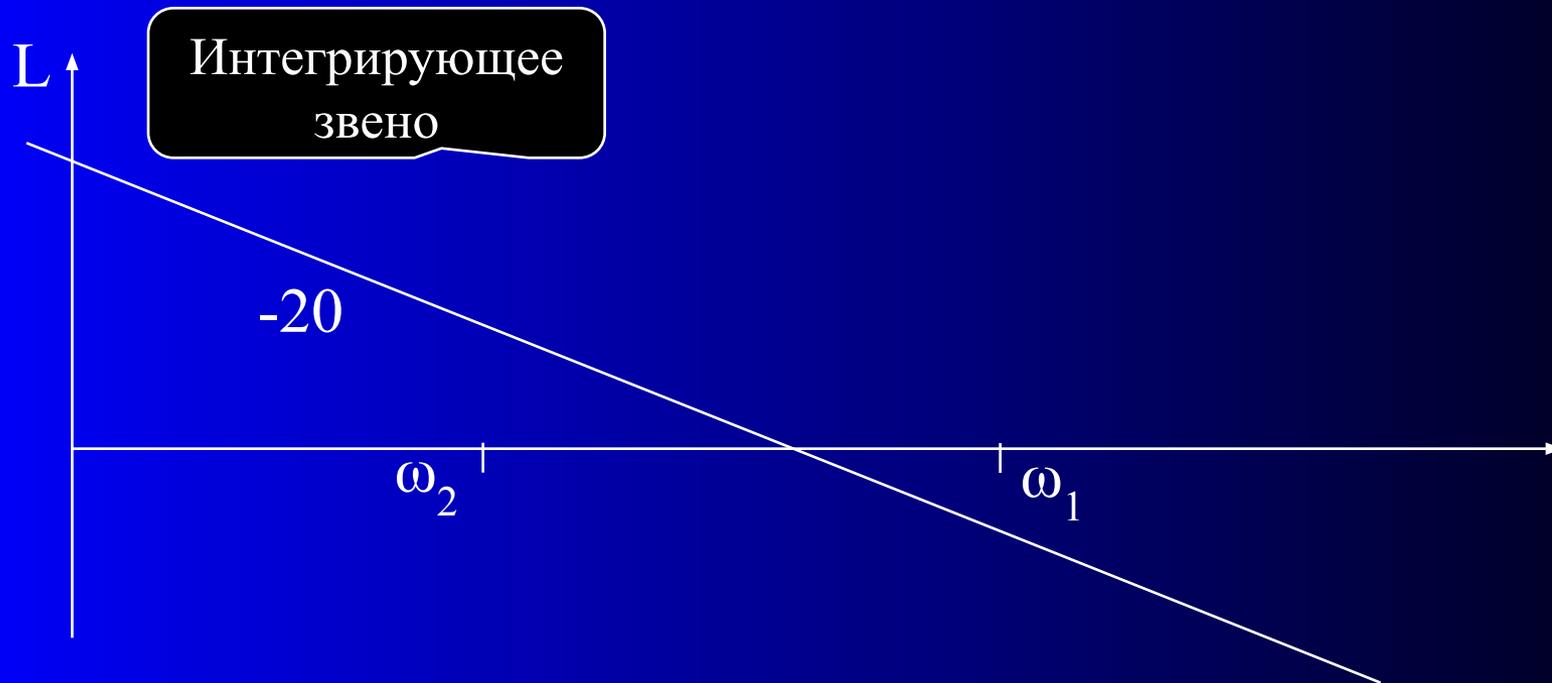
$$1/T_1 < 1/T_2$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$2. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

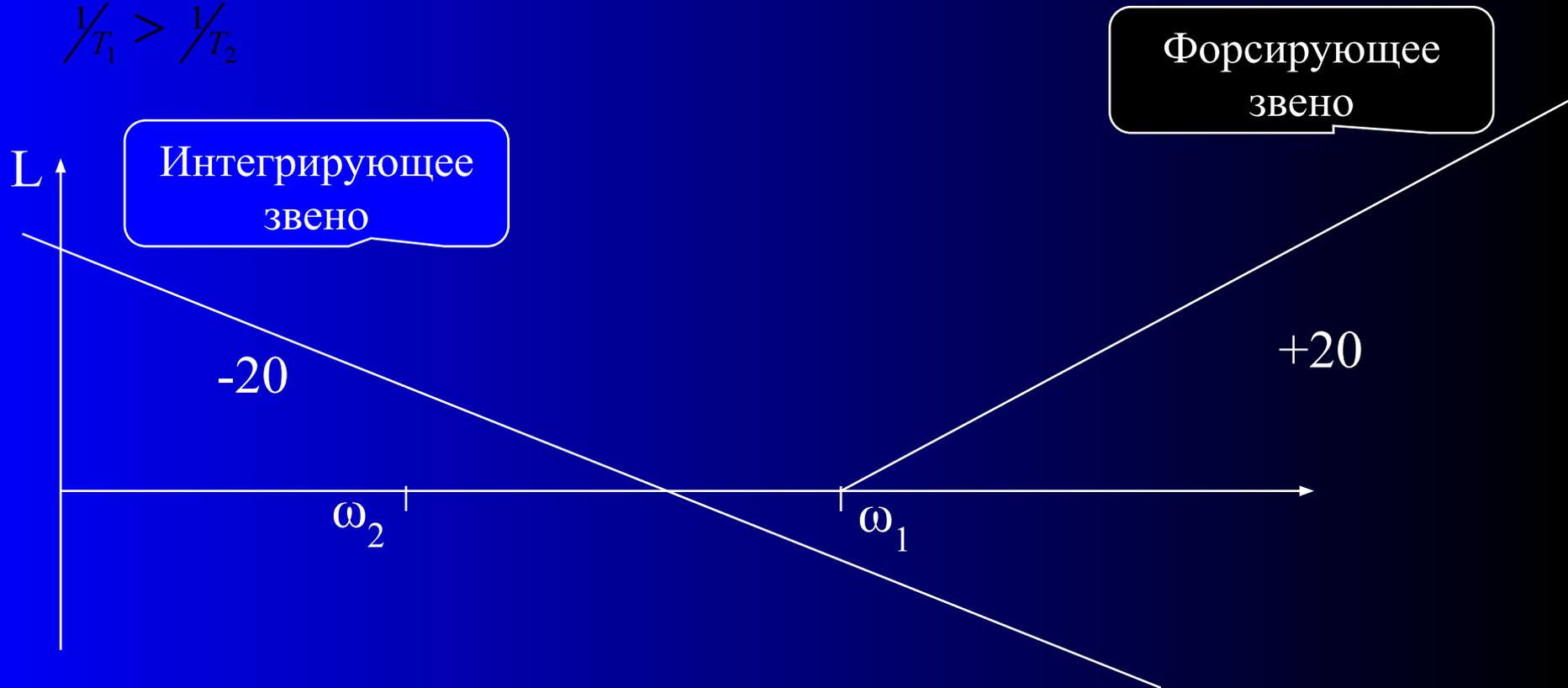
$$\frac{1}{T_1} > \frac{1}{T_2}$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$2. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

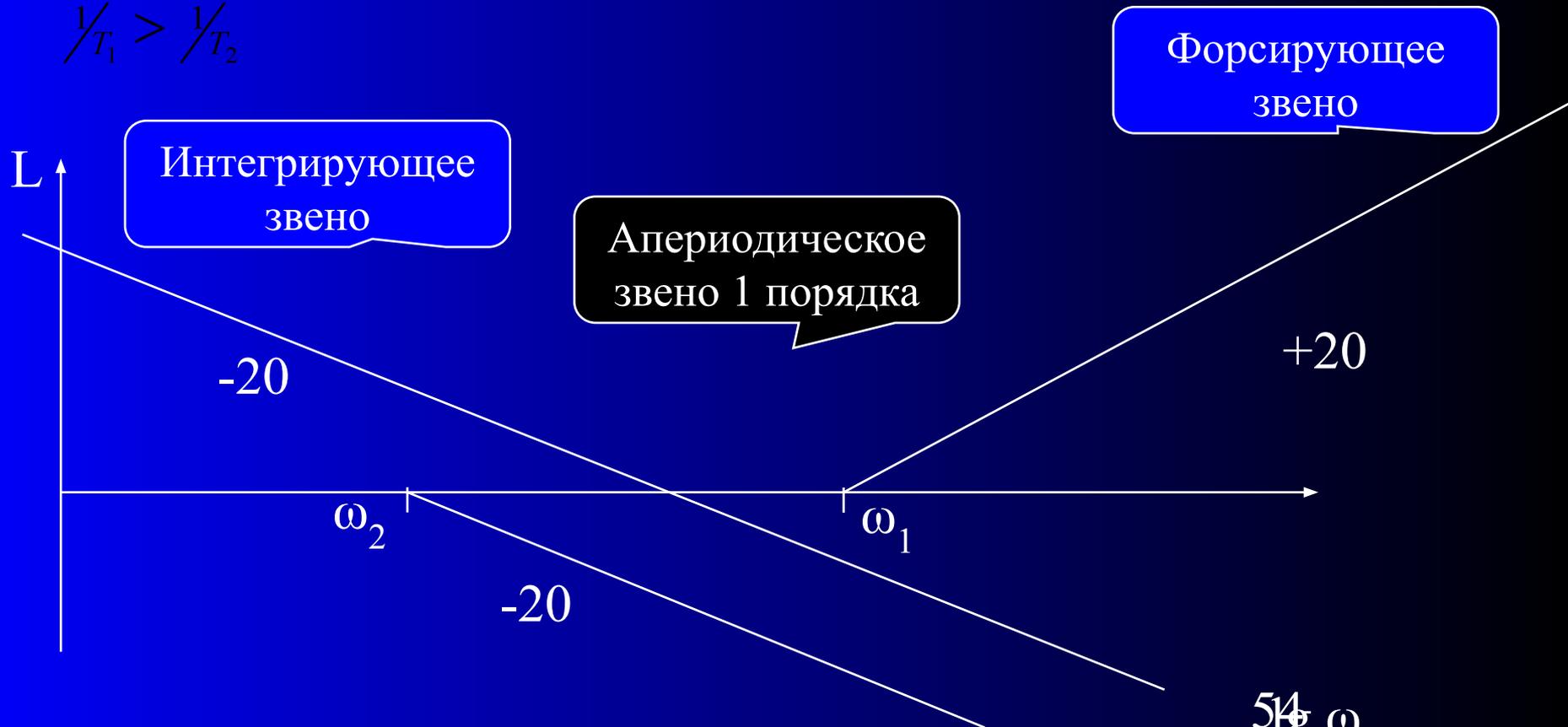
$$\frac{1}{T_1} > \frac{1}{T_2}$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$2. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

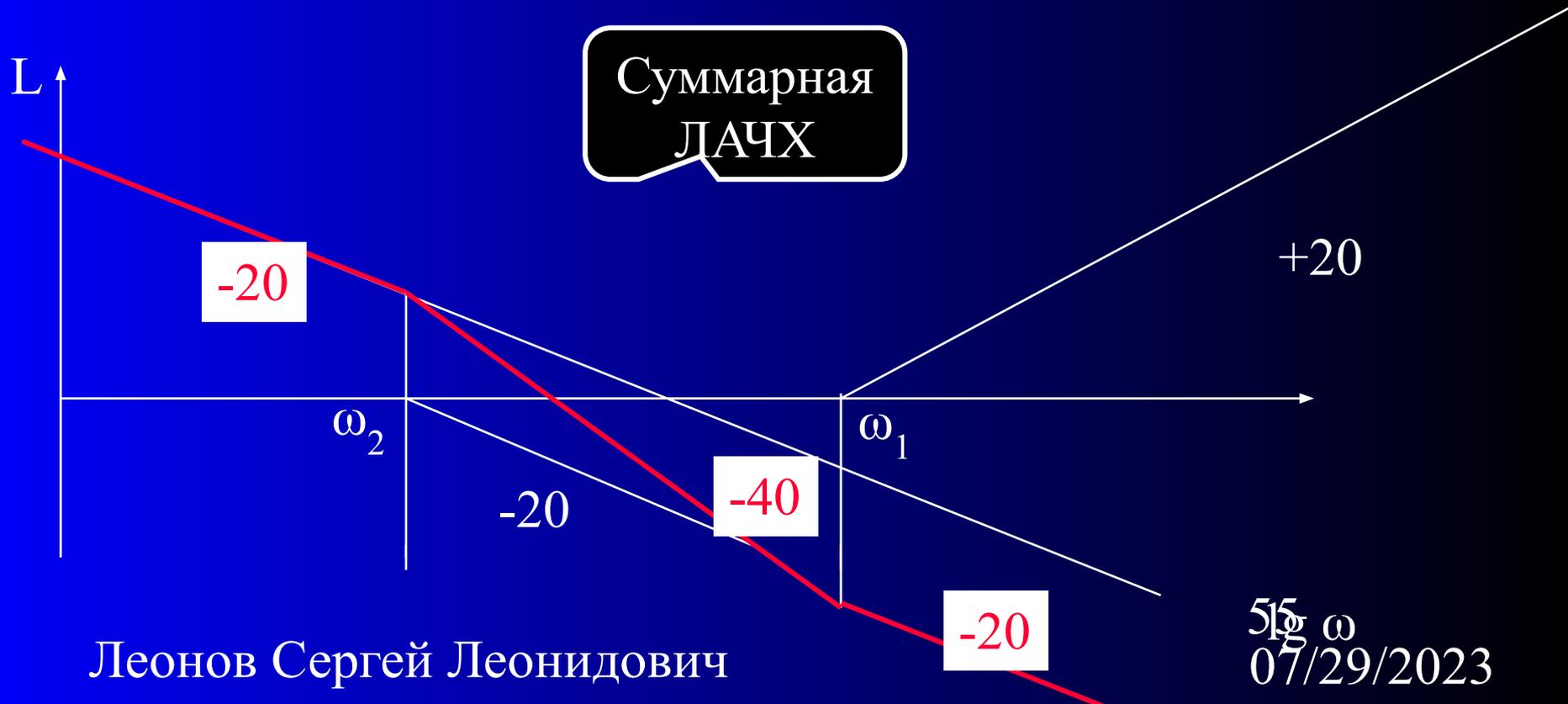
$$\frac{1}{T_1} > \frac{1}{T_2}$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$2. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)s} = \frac{k}{s} \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{(T_2s + 1)}$$

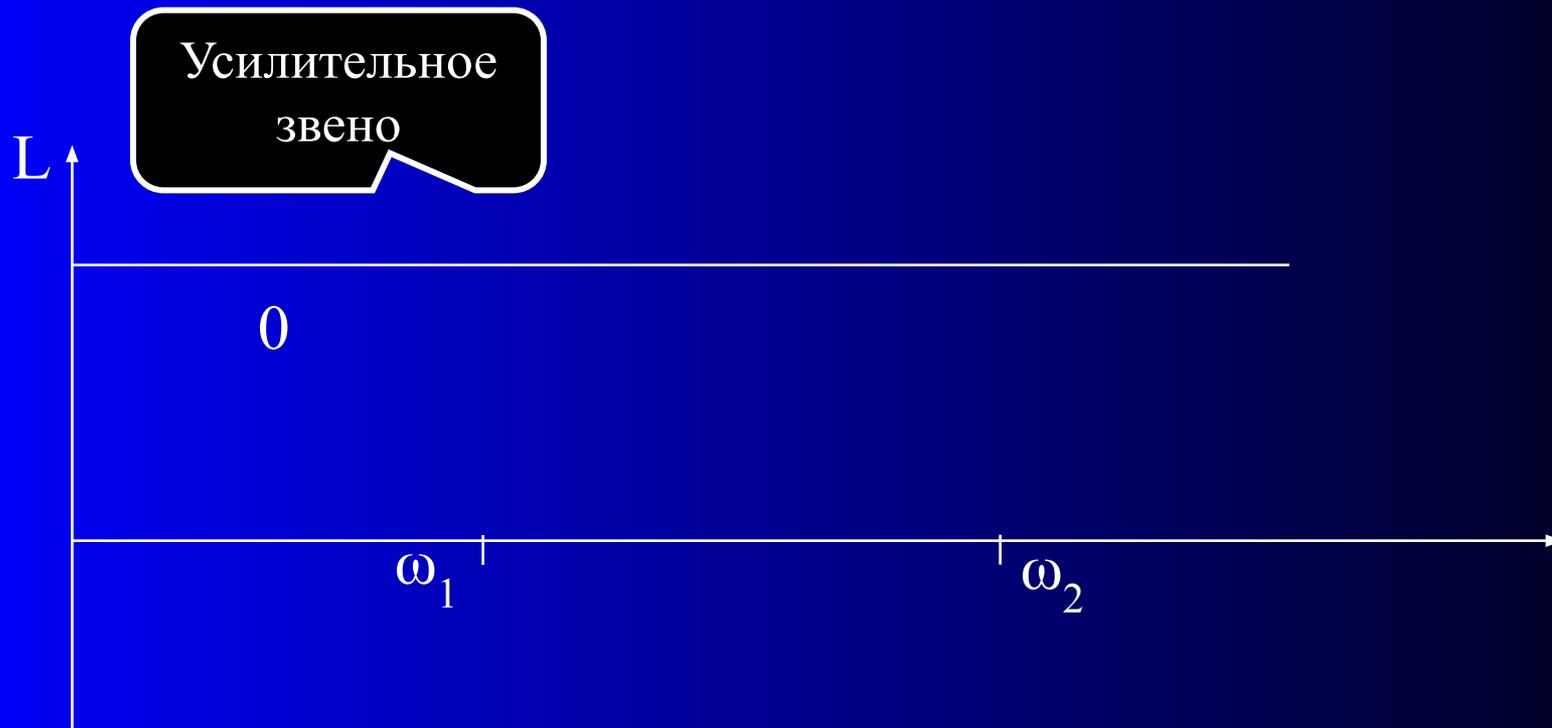
$$\frac{1}{T_1} > \frac{1}{T_2}$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$3. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1} = k \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1}$$

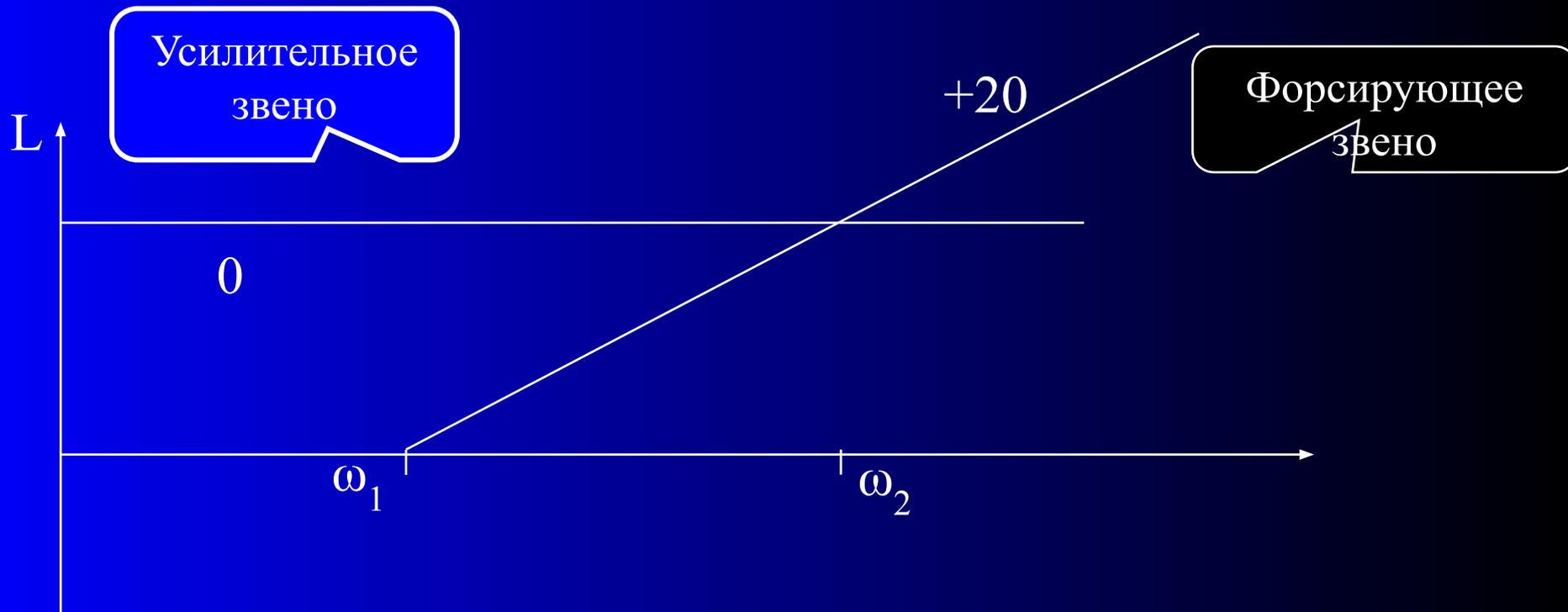
$$1/T_1 < 1/T_2$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$3. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1} = k \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1}$$

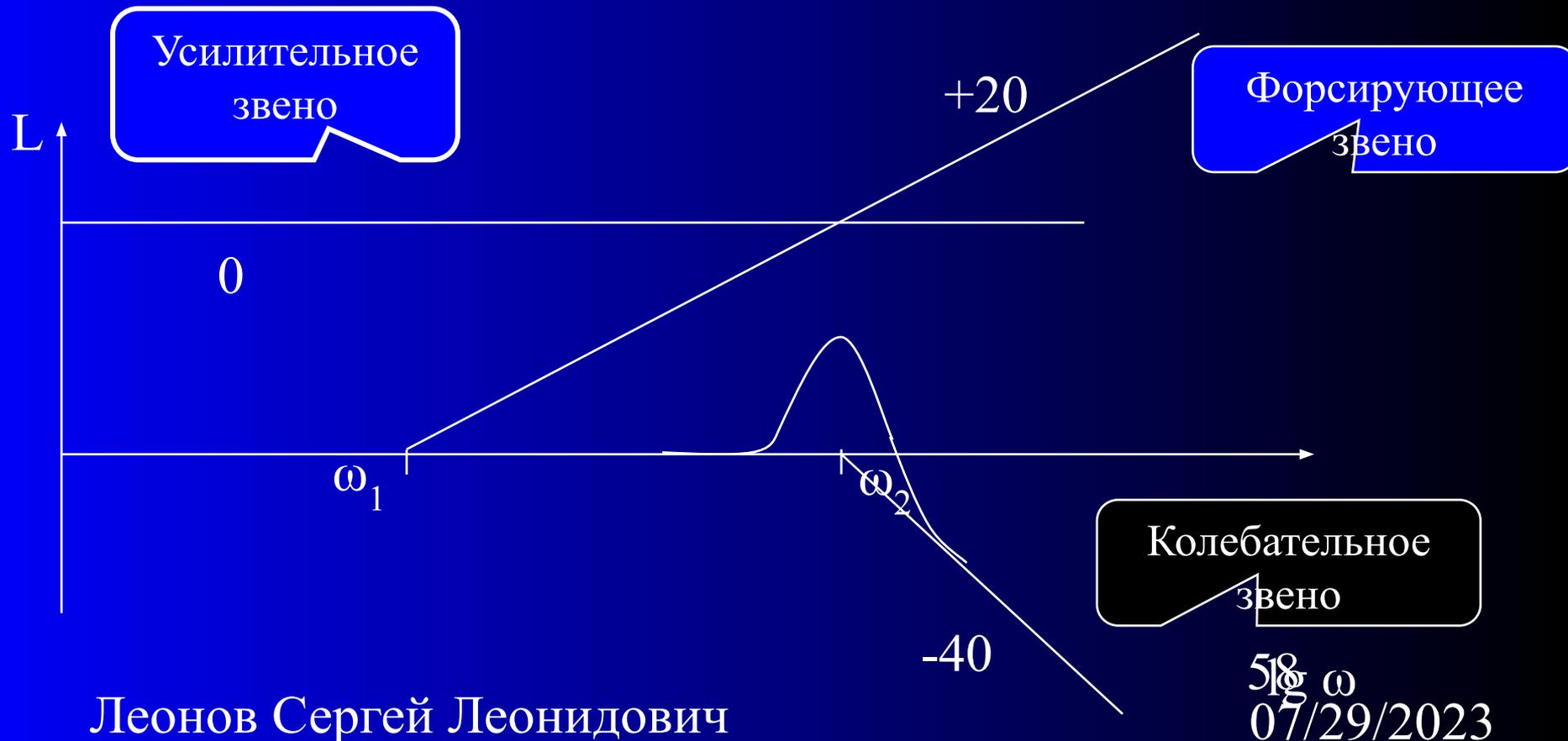
$$\frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_2}$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$3. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1} = k \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1}$$

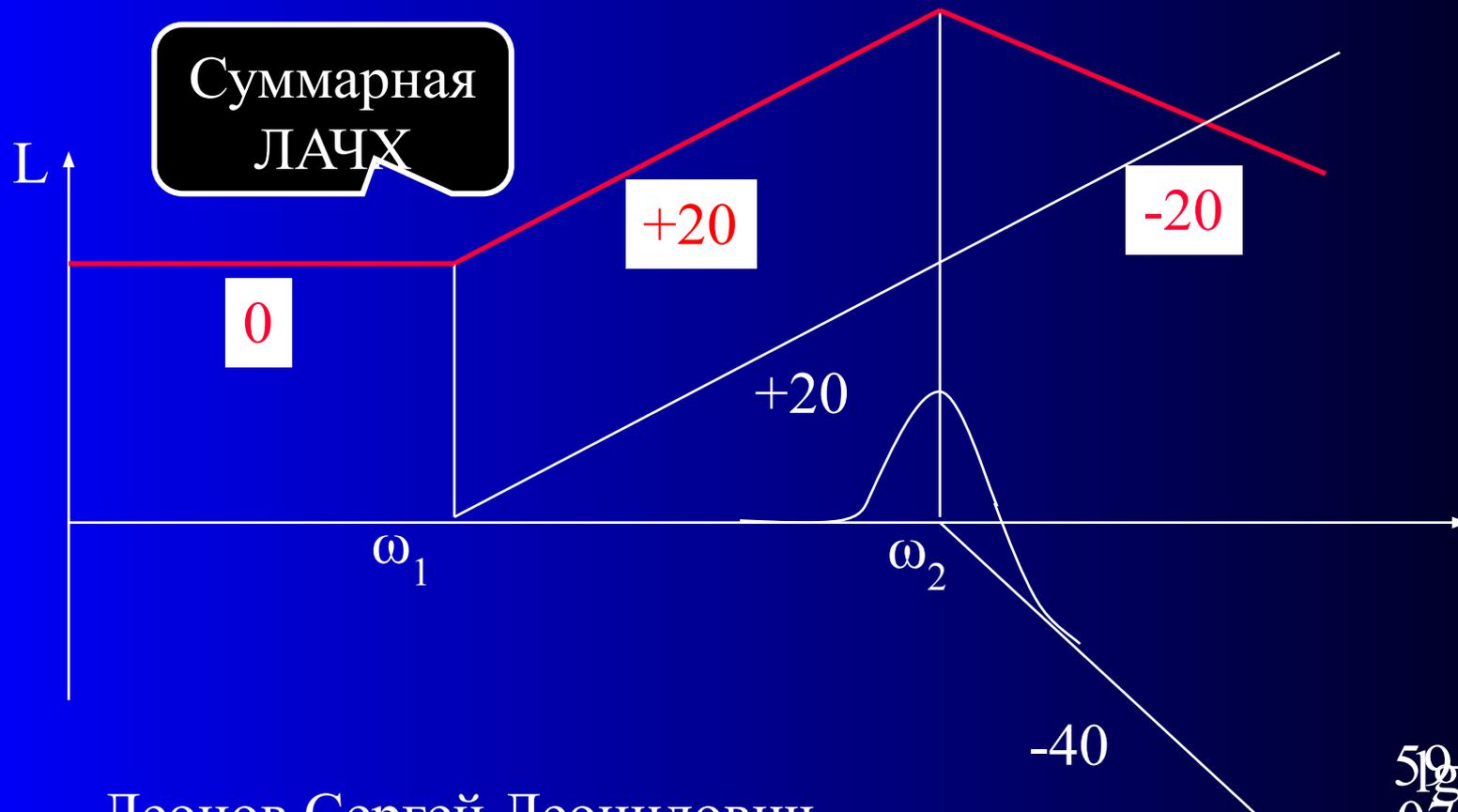
$$\frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_2}$$



Построение асимптотических ЛАЧХ

$$3. W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1} = k \cdot (T_1s + 1) \cdot \frac{1}{T_2^2s^2 + 2eT_2s + 1}$$

$$1/T_1 < 1/T_2$$



1.10. Идентификация САР

1. Математическое описание системы известно. Необходимо определить параметры этого описания.

Пример: технологическая система.

Такие системы описываются диф. уравнением:



$$m\ddot{y} + Gy + Cy = P_y$$

$$W(s) = \frac{1}{ms^2 + Gs + C}; \quad m, G, C - ?$$

- Проводим эксперимент и регистрируем $P_y(\tau)$ и $y(\tau)$
- Численным интегрированием рассчитываем $\dot{y}(\tau), y(\tau)$
- По МНК находим m, G, C :

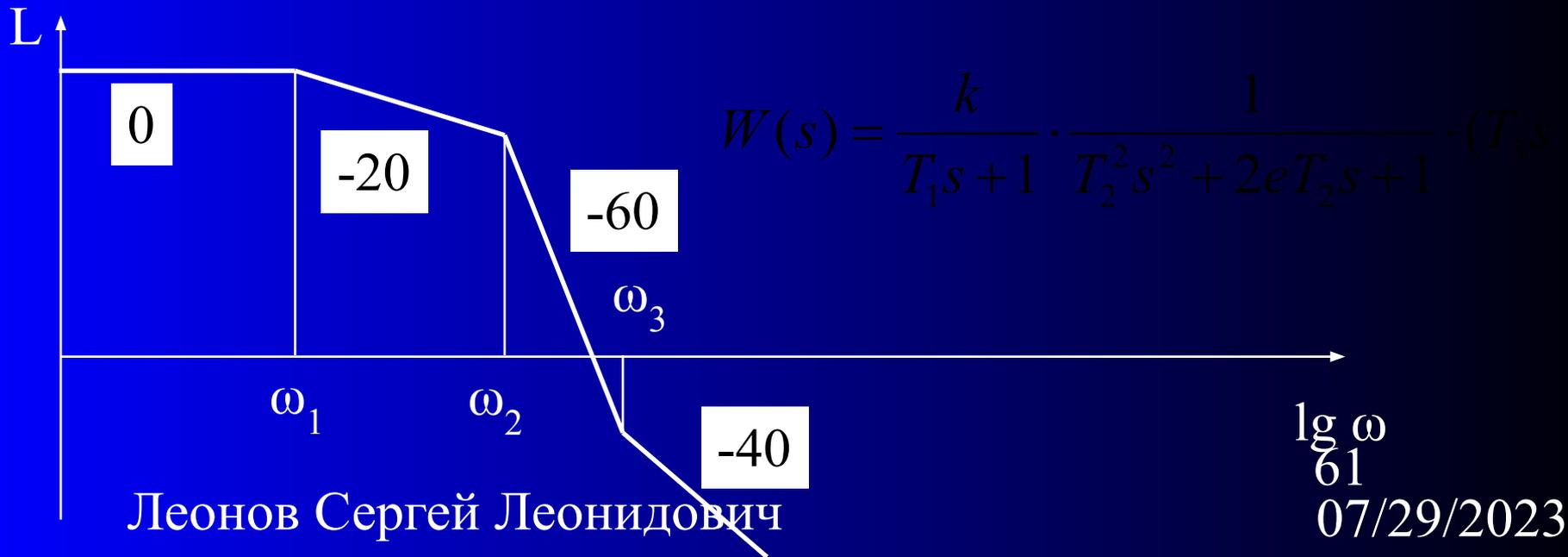
$$\begin{cases} m \sum \dot{y}_i^2 + G \sum \dot{y}_i y_i + C \sum y_i y_i = \sum \dot{y}_i P_i \\ m \sum \dot{y}_i y_i + G \sum \dot{y}_i^2 + C \sum y_i y_i = \sum \dot{y}_i P_i \\ m \sum \dot{y}_i y_i + G \sum \dot{y}_i y_i + C \sum y_i^2 = \sum y_i P_i \end{cases}$$

Леонов Сергей Леонидович

Идентификация САР

2. Определение вида $W(s)$ по ЛАЧХ:

- Строим экспериментальную ЛАЧХ
- Проводим асимптотическую ЛАЧХ (ломаную линию с углами наклона ± 20 дб/дек)
- Определяем частоты сопряжения и резонансные частоты $\omega_i = 1/T_i$.
- Восстанавливаем $W(s)$ по виду асимптотической ЛАЧХ
- Уточняем коэффициенты передаточной функции по МНК



Идентификация САР

Проблемы построения $W(s)$:

1. Сложность подачи гармонического сигнала на вход системы
2. Неоднозначность восстановления $W(s)$ по ЛАЧХ

Принцип суперпозиции:

Если на вход линейной системы подать сумму сигналов, то на ее выходе получается также сумма реакций системы на каждый из входных сигналов:

$$x(\tau) = x_1(\tau) + x_2(\tau) \Rightarrow y(\tau) = y_1(\tau) + y_2(\tau)$$

$$y_1 \text{ --- реакция на } x_1$$

$$y_2 \text{ --- реакция на } x_2$$

ИТАК: на вход системы подаем: $x(\tau) = \sum b_i \sin \omega_i \tau$

На выходе получаем: $y(\tau) = \sum a_i \sin(\omega_i \tau + \varphi_i)$

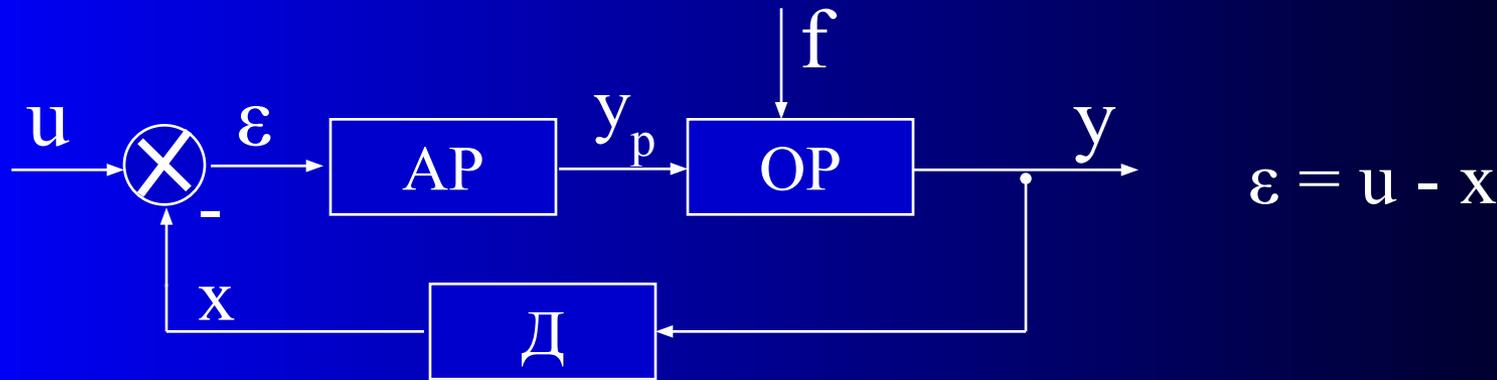
Леонов Сергей Леонидович $A_i = \frac{a_i}{b_i} - \Delta \times \tilde{O}$

Идентификация САР

Экспресс-методика идентификации операции ТП:

1. Создаем заготовку в виде шлицевого валика. Профиль заготовки описывается рядом Фурье – коэффициенты известны.
2. Устанавливаем заготовку на станке и срезаем шлицы. В соответствии с принципами технологического наследования профиль заготовки также описывается рядом Фурье.
3. Устанавливаем заготовку в кругломер, записываем профиль и рассчитываем коэффициенты Фурье.
4. По отношению коэффициентов строим АЧХ и ЛАЧХ и восстанавливаем по ним вид $W(s)$.
5. Уточняем коэффициенты передаточной функции по МНК.
6. Полученное выражение для $W(s)$ позволяет прогнозировать результаты обработки на исследуемой операции.

1.11. Статические и астатические САР



$\hat{W}_f = \frac{y(s)}{f(s)} \Big|_{u=0}$

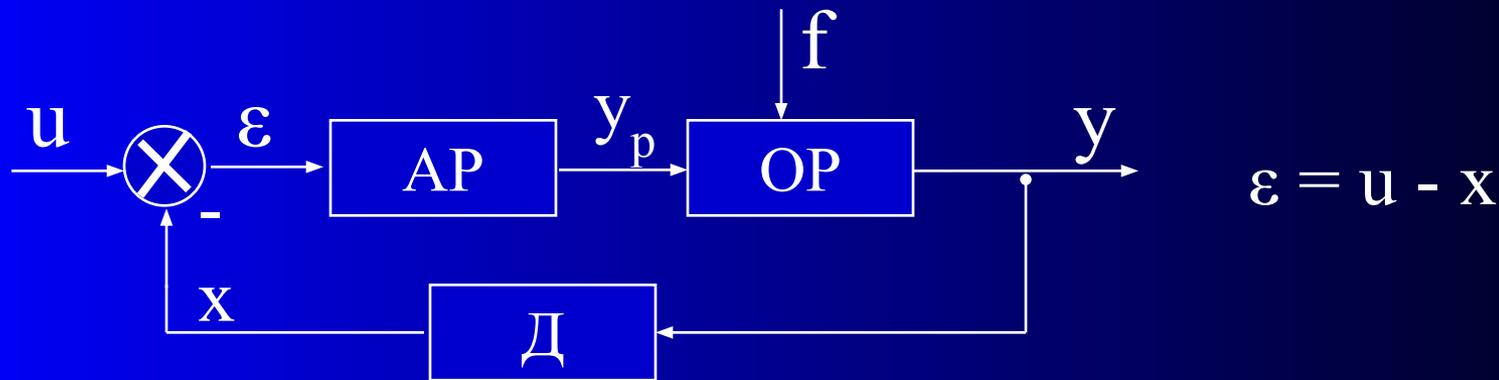
$$\begin{aligned}
 y &= y_f + y_c = fW_f + y_p W_{OP} = fW_f + \varepsilon W_{AP} W_{OP} = \\
 &= fW_f + uW_{AP} W_{OP} - xW_{AP} W_{OP} = fW_f + uW_{AP} W_{OP} - yW_{\Delta} W_{AP} W_{OP}
 \end{aligned}$$

$$y = \frac{W_f}{1 + W_{\Delta} W_{AP} W_{OP}} f + \frac{W_{AP} W_{OP}}{1 + W_{\Delta} W_{AP} W_{OP}} u$$

ПФ САР по возмущению

ПФ САР по управлению

Статические и астатические САР



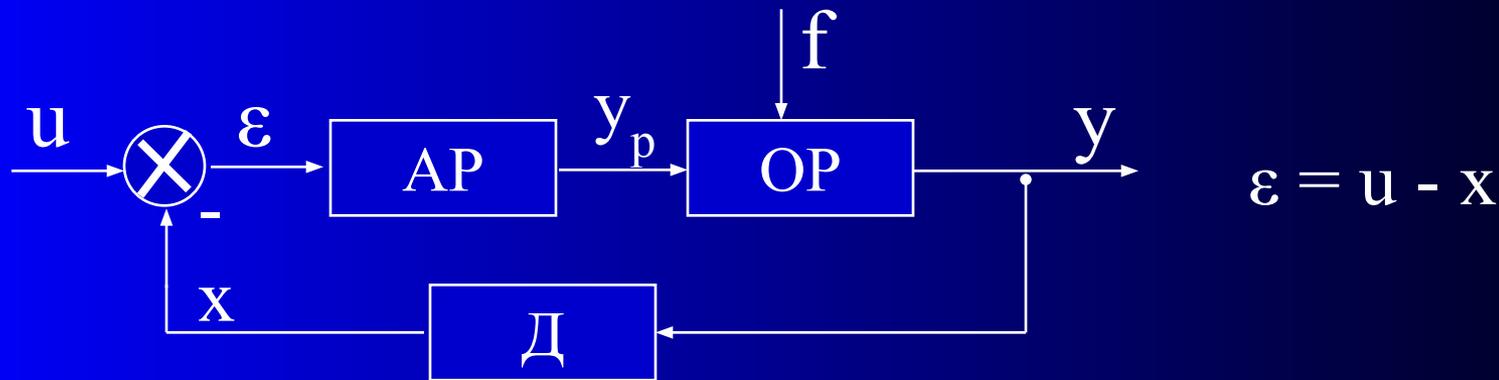
$$y = \frac{W_f}{1 + W_{\check{A}} W_{AP} W_{OP}} f + \frac{W_{AP} W_{OP}}{1 + W_{\check{A}} W_{AP} W_{OP}} u$$

Иногда $W_{OP}, W_{\check{A}}, W_f = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{a_k s^k + \dots + a_0}{b_n s^n + \dots + b_0}, \quad a_0, b_0 \neq 0$

1. $W_{AP} = \frac{A(s)}{B(s)}; \quad K_{AP} = \frac{a_{0AP}}{b_{0AP}}$

$$y_{\text{стат}} = \frac{K_f}{1 + K_{\check{A}} K_{AP} K_{OP}} f + \frac{K_{AP} K_{OP}}{1 + K_{\check{A}} K_{AP} K_{OP}} u$$

Статические и астатические САР



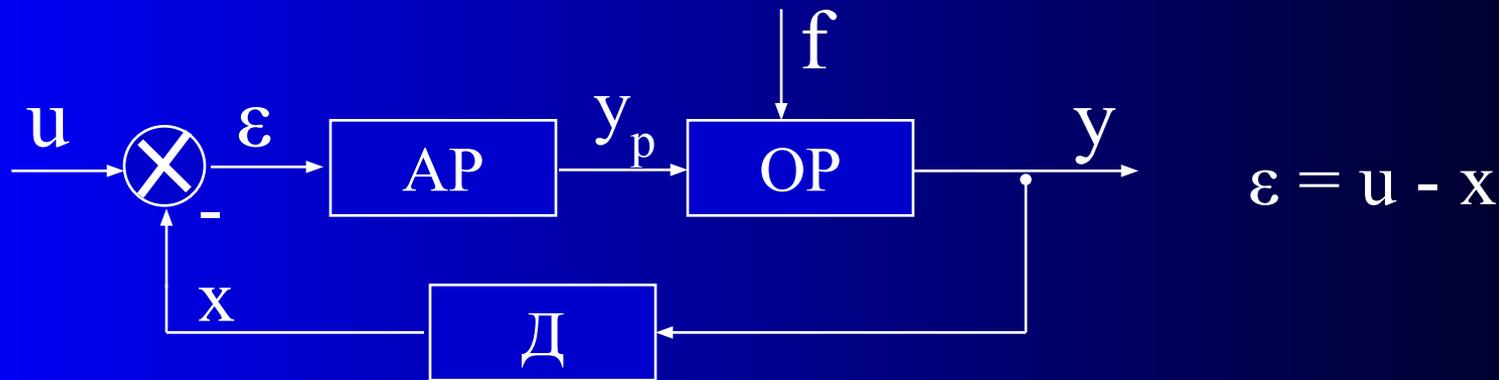
$$y = \frac{W_f}{1 + W_{\ddot{A}} W_{AP} W_{OP}} f + \frac{W_{AP} W_{OP}}{1 + W_{\ddot{A}} W_{AP} W_{OP}} u$$

1. $W_{OP}, W_{\ddot{A}}, W_f = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{a_k s^k + \dots + a_0}{b_n s^n + \dots + b_0}, \quad a_0, b_0 \neq 0$

2. $W_{AP} = \frac{A(s)}{sB(s)}; \quad K_{AP} \rightarrow \infty$

$$y_{\text{ст}} = 0 \cdot f + \frac{1}{K_{\ddot{A}}} u$$

Статические и астатические САР



1. Астатические системы – системы не имеющие статической ошибки: в состав АР входит интегрирующее звено. В статике (возмущение f и все сигналы в САР находятся на постоянном уровне) влияние возмущения на выходной сигнал отсутствует.
2. Системы, имеющие статическую ошибку (статические системы): возмущение оказывает влияние на выходной сигнал, но это влияние можно уменьшить за счет увеличения коэффициента передачи АР.

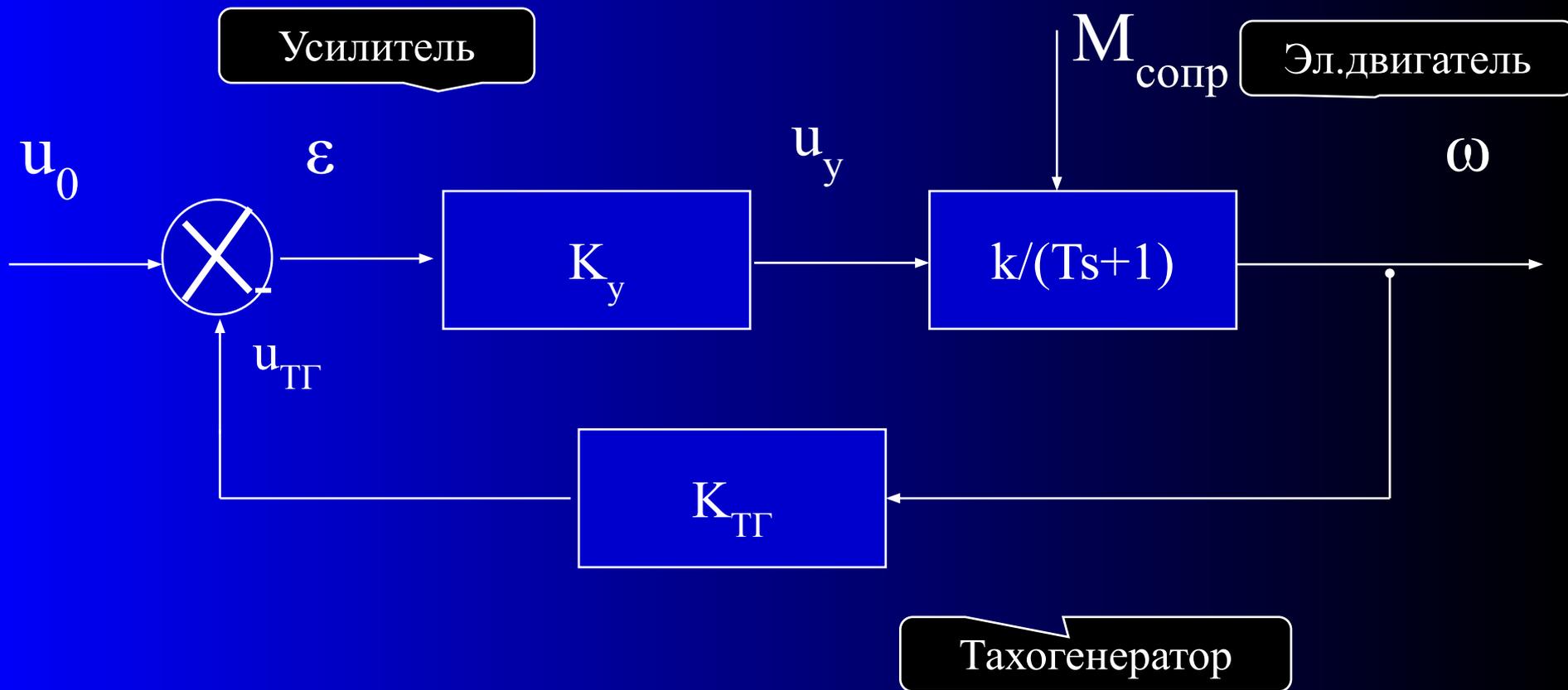
ПРИМЕЧАНИЕ: Рассматривается только установившийся режим работы системы (статический). В динамическом режиме при изменении f в астатических системах ошибка может быть даже больше, чем в статических.

07/29/2023

Статические и астатические САР - примеры

Стабилизация скорости вращения электродвигателя

1. Система со статической ошибкой



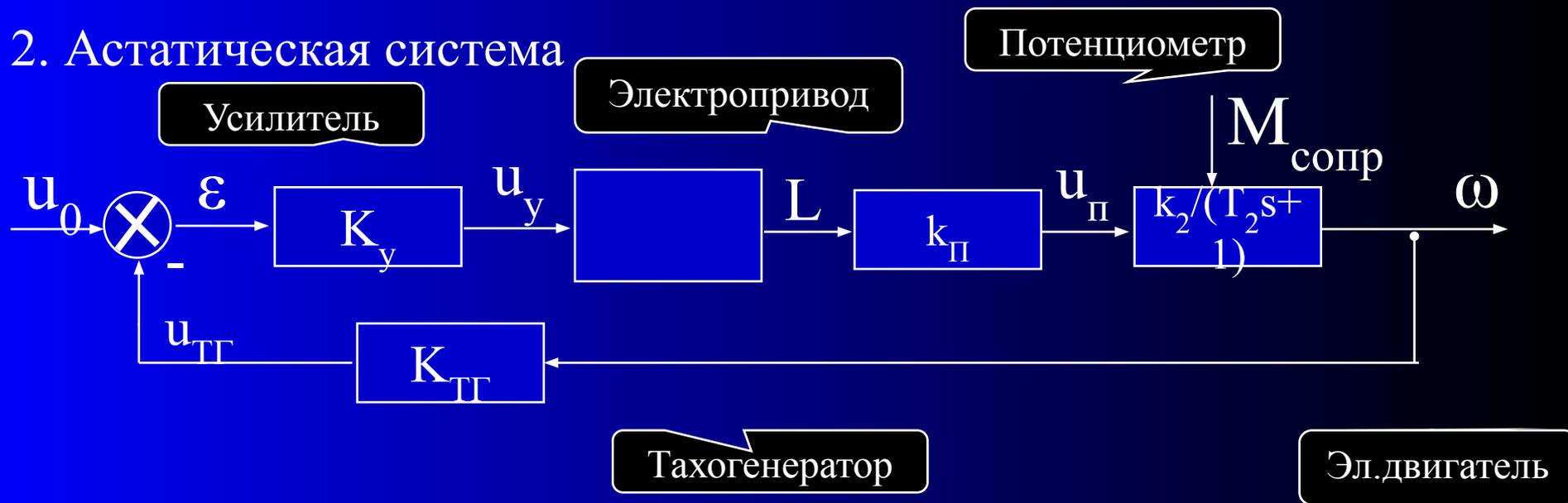
Частота вращения ω зависит от $M_{сопр}$, но при увеличении K_y эту зависимость в статике можно сделать сколь угодно малой.

68

07/29/2023

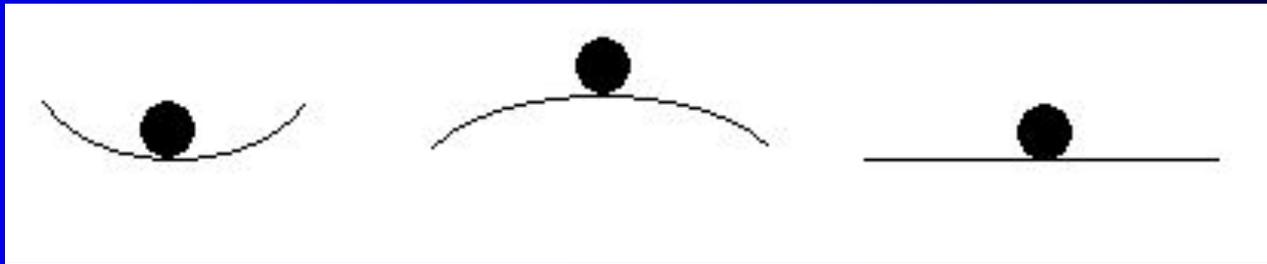
Статические и астатические САР - примеры

2. Астатическая система



Частота вращения ω не зависит от $M_{сопр}$ при $M_{сопр} = \text{const}$.
При изменении $M_{сопр}$ в связи с повышенной инерционностью системы влияние $M_{сопр}$ на ω может быть значительным.

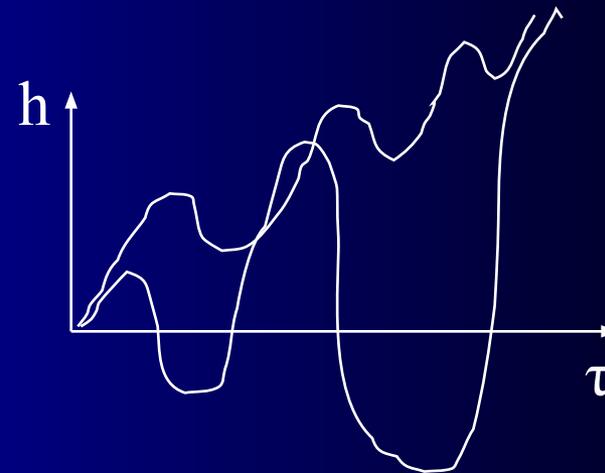
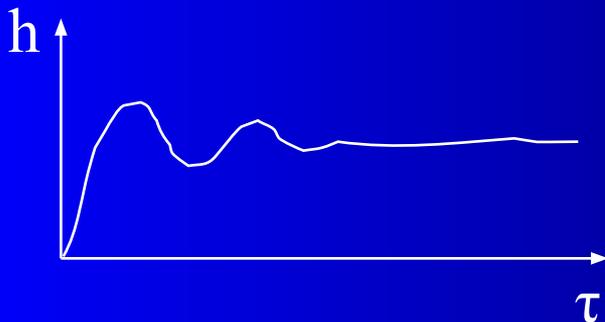
1.12. Устойчивость линейных САР



Понятие устойчивости: Если при ступенчатом входном воздействии или возмущении $\lim_{\tau \rightarrow \infty} y = y_{уст}$, то система устойчива.

Устойчивая САР

Неустойчивые САР



Для нелинейных систем это соответствует устойчивости по Ляпунову (устойчивости в малом).

Леонов Сергей Леонидович

70
07/29/2023

Устойчивость линейных САР

Необходимое и достаточное условие устойчивости:

Система описывается передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{a_n s^n + \dots + a_0}{b_k s^k + \dots + b_0}$$

Для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы корни знаменателя ПФ ($b_k s^k + \dots + b_0$) имели отрицательные вещественные части.

Действительно, устойчивость системы определяется решением однородного уравнения, которое зависит от решения характеристического уравнения $b_k s^k + \dots + b_0 = 0$.

1. Действительный корень s_i : $y_i(\tau) = C_i \exp(s_i \tau)$; при $s_i > 0$ $\lim_{\tau \rightarrow \infty} y_i = \infty$
2. Пара комплексных корней $s_i = \alpha_i \pm \omega_j$:

$$y_i(\tau) = e^{\alpha_i \tau} (C_i \sin \omega_i \tau + D_i \cos \omega_i \tau); \quad \alpha_i > 0 \Rightarrow \lim_{\tau \rightarrow \infty} y_i = \infty$$

$$y(\tau) = \sum y_i(\tau)$$

Леонов Сергей Леонидович

71

07/29/2023

Устойчивость линейных САР

Необходимое и достаточное условие устойчивости:

Примеры:

1) $W(s) = \frac{2}{2s^2 + 2s + 1}$; $2s^2 + 2s + 1 = 0$;
 $s_{1,2} = -0,5 \pm 0,5j$

Т.к. действительная часть корня (-0,5) отрицательна – система устойчива.

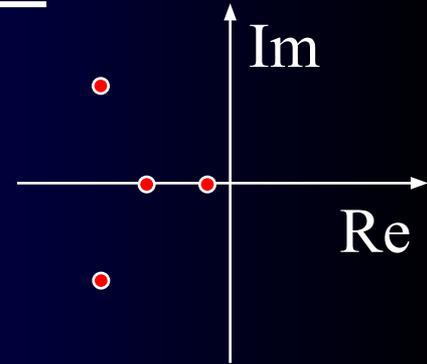
2) $W(s) = \frac{3s + 2}{s^2 + 4s + 1}$; $s^2 + 4s + 1 = 0$; $s_{1,2} = \frac{-4 \pm \sqrt{16 - 4}}{2} = -2 \pm \sqrt{3}$
 $s_1 = -2 + \sqrt{3} \approx -0,268 < 0$; $s_2 = -2 - \sqrt{3} \approx -3,732 < 0$

Т.к. оба корня отрицательны – система устойчива.

3) $W(s) = \frac{2}{4s^2 + 1}$; $4s^2 + 1 = 0$; $s_{1,2} = \pm j\sqrt{1/4} = \pm 0,5j$

Действительная часть корня равна 0 – система находится на границе устойчивости.

Леонов Сергей Леонидович



Устойчивость линейных САР

Необходимое условие устойчивости:

(не является достаточным)

Для устойчивости системы необходимо, чтобы все коэффициенты знаменателя передаточной функции (характеристического уравнения) имели одинаковые знаки.

Если хоть один из коэффициентов имеет знак, отличный от остальных коэффициентов – система неустойчива. Если все знаки одинаковые – ничего неизвестно.

Устойчивость линейных САР

Критерий Рауса-Гурвица (необходимый и достаточный):

Знаменатель передаточной функции: $Q(s) = b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_n$

Матрица коэффициентов:

$$\left[\begin{array}{cccc|cccc|cc} b_1 & b_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & b_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_5 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_7 & b_6 & b_5 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_n \end{array} \right] \quad \text{Размерность } n \times n$$

Для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все угловые определители матрицы были положительны и выполнялось необходимое условие устойчивости.

Устойчивость линейных САР

Критерий Рауса-Гурвица

Примеры:

1) $W(s) = \frac{2s+1}{4s^3+3s^2-2s+1}$; Система неустойчива по необходимому условию.

2) $W(s) = \frac{2s+1}{4s^3+3s^2-2s+1}$; $\begin{vmatrix} 3 & 4 & 0 \\ 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$

a) $3 > 0$

b) $\begin{vmatrix} 3 & 4 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 6 - 4 = 2 > 0$

c) $\begin{vmatrix} 3 & 4 & 0 \\ 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 2 > 0$

Система устойчива.

Устойчивость линейных САР

Критерий Рауса-Гурвица

Сведение к более простым условиям:

1) Система 1-го порядка: $b_0s + b_1 = 0 \rightarrow b_1 > 0; b_0 > 0$

2) 2-го порядка: $b_0s^2 + b_1s + b_2 = 0 \rightarrow \begin{vmatrix} b_1 & b_0 \\ 0 & b_2 \end{vmatrix} \rightarrow b_0 > 0; b_1 > 0; b_2 > 0$

3) 3-го порядка: $b_0s^3 + b_1s^2 + b_2s + b_3 = 0 \rightarrow \begin{cases} b_i > 0, i = 0 \dots 3 \\ b_1b_2 > b_0b_3 \end{cases}$

4) 4-го порядка: $b_0s^4 + b_1s^3 + b_2s^2 + b_3s + b_4 = 0 \rightarrow \begin{cases} b_i > 0, i = 0 \dots 4 \\ b_3(b_1b_2 - b_0b_3) > b_4b_1^2 \end{cases}$

5) 5-го порядка: $b_0s^5 + b_1s^4 + b_2s^3 + b_3s^2 + b_4s + b_5 = 0$

$$\begin{cases} b_i > 0, i = 0 \dots 5 \\ b_1b_2 > b_0b_3 \\ (b_1b_2 - b_0b_3)(b_3b_4 - b_2b_5) > (b_1b_4 - b_0b_5)^2 \end{cases}$$

Устойчивость линейных САР

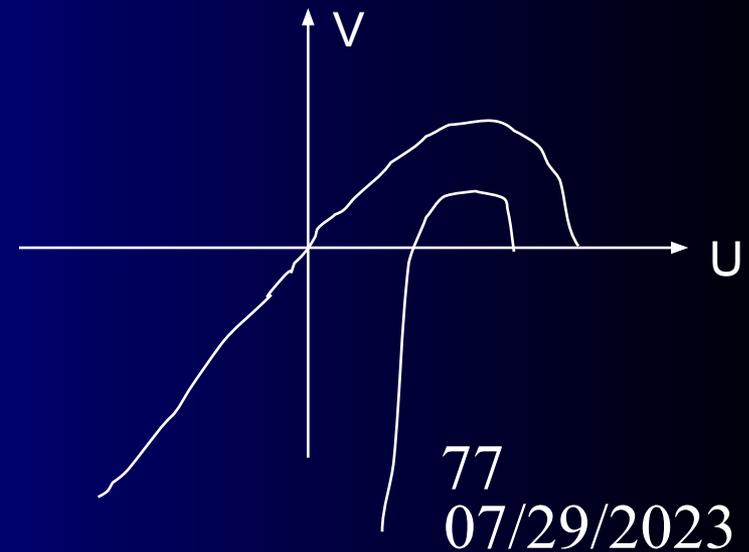
Частотный критерий Михайлова:

Знаменатель передаточной функции: $Q(s)$. Заменяем s на $j\omega$: $Q(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$. Годограф этого выражения называется годографом Михайлова.

САР n -го порядка устойчива, если годограф Михайлова начинается при $\omega=0$ на положительной действительной полуоси ($V(0)=0, U(0)>0$) и с увеличением ω от 0 до ∞ проходит в положительном направлении последовательно n квадрантов нигде не обращаясь в 0 .



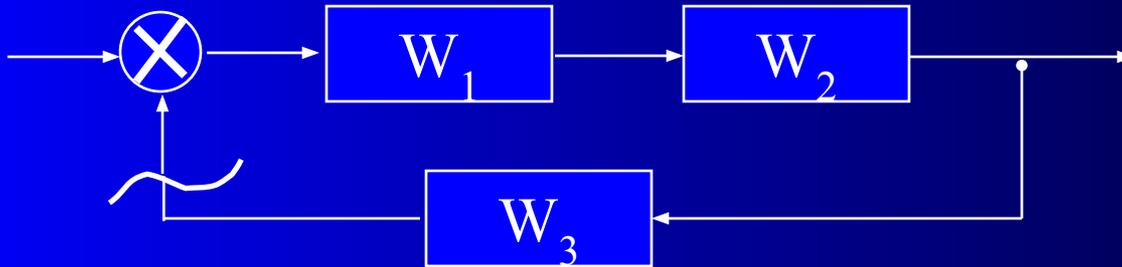
НЕУСТОЙЧИВЫЕ



Устойчивость линейных САР

Частотный критерий Найквиста:

Замкнутая система



Разомкнутая система, соответствующая замкнутой



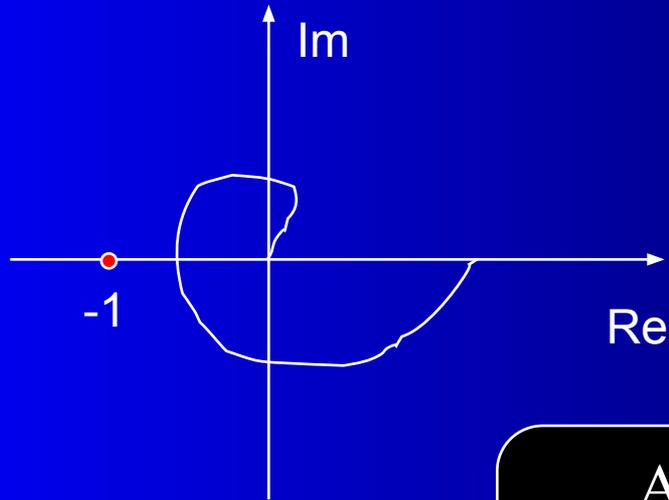
Если разомкнутая САР устойчива или находится на границе устойчивости, то соответствующая ей замкнутая САР устойчива, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1; 0j)$. И наоборот.

Устойчивость линейных САР

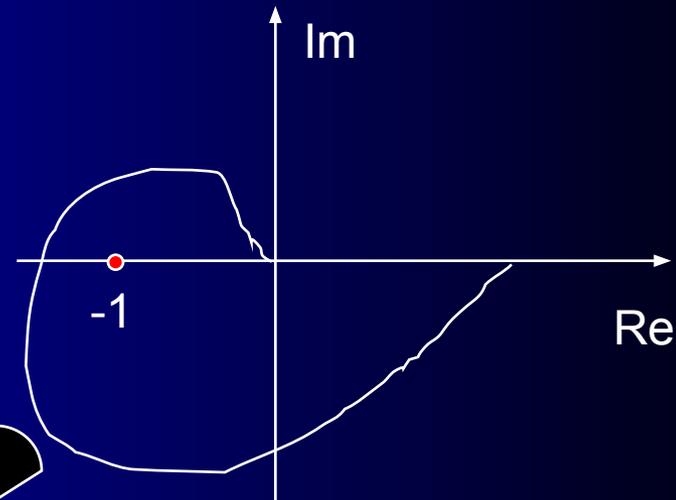
Частотный критерий Найквиста:

Если разомкнутая САР устойчива или находится на границе устойчивости, то соответствующая ей замкнутая САР устойчива, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1; 0j)$. И наоборот.

Устойчивая



Неустойчивая



АФЧХ
разомкнутой
САР

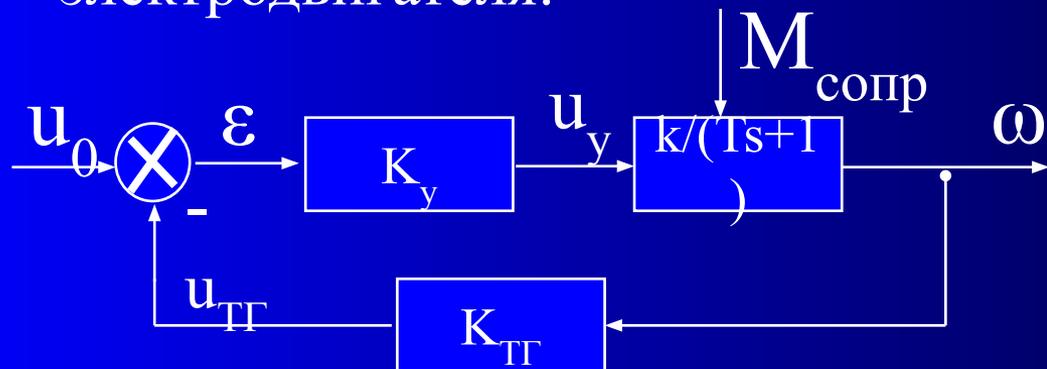
Устойчивость линейных САР

Сравнительные характеристики критериев устойчивости:

1. Необходимое и достаточное условие устойчивости (по корням знаменателя передаточной функции) носит вспомогательный характер (основа для вывода других критериев)
2. Необходимое условие устойчивости (по коэффициентам знаменателя передаточной функции) дополняет другие критерии и позволяет отсеять явно неустойчивые системы.
3. Критерий Рауса-Гурвица используется для систем сравнительно невысокого порядка – обычно до 10-го. Для более высоких порядков условия устойчивости становятся слишком сложными.
4. Частотные критерии (Михайлова и Найквиста) обычно используются для систем высокого порядка, т.к. сложность критериев мало растет с увеличением порядка системы.
5. Критерии Михайлова и Найквиста обладают примерно одинаковой сложностью, но критерий Найквиста используется

1.13. Запас устойчивости САР

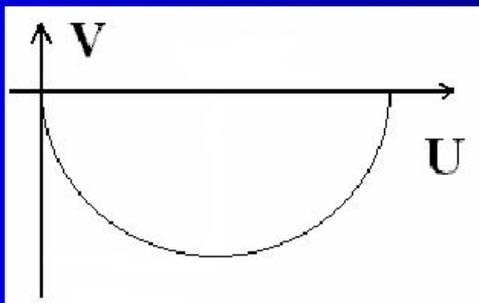
1. Рассмотрим снова систему стабилизации скорости вращения электродвигателя:



Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_p = \frac{k_y k k_{\text{ОД}}}{Ts + 1}$$

АФЧХ -



Замкнутая система всегда устойчива (по критерию Найквиста).

1.13. Запас устойчивости САР

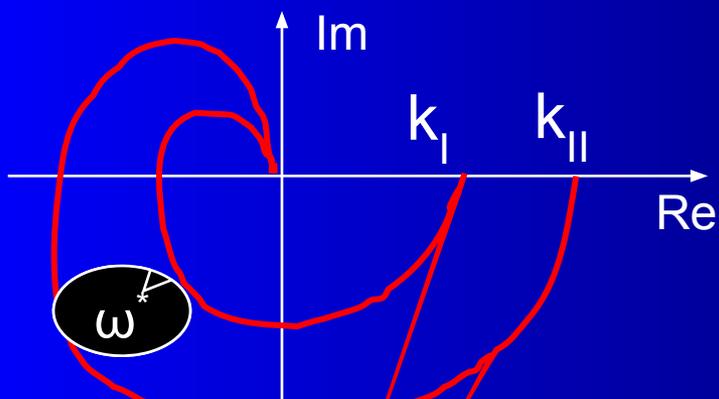
2. Рассмотрим систему стабилизации скорости вращения шпинделя станка с ременной передачей от двигателя:



$$W_{Dv} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 2eT_2 s}$$

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_p = \frac{k}{T_1 T_2^2 s^3 + T_2 (2eT_1 + T_2) s^2 + (T_1 + 2eT_2) s + 1}$$

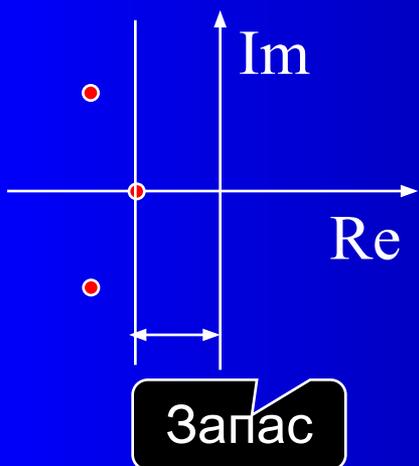


$$k_I < k_{II}, \quad \omega^* = \sqrt{\frac{T_1 + 2eT_2}{T_1 T_2}}$$

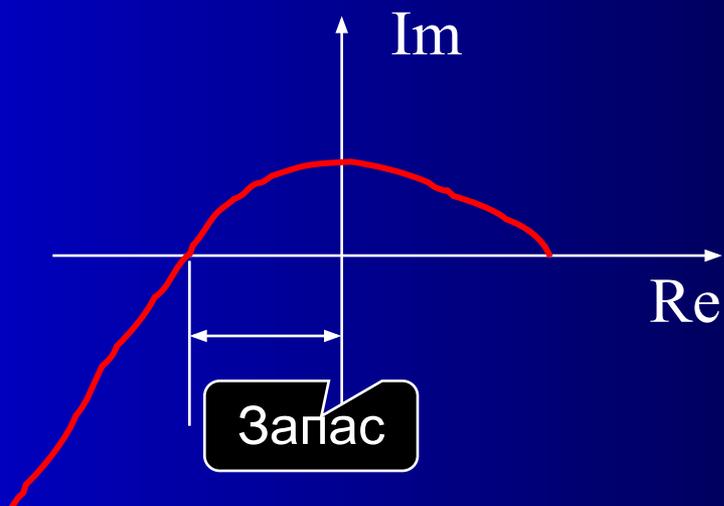
При увеличении k система становится неустойчивой и в ней возникают колебания. Поэтому есть граница между устойчивостью и неустойчивостью.

Запас устойчивости САР

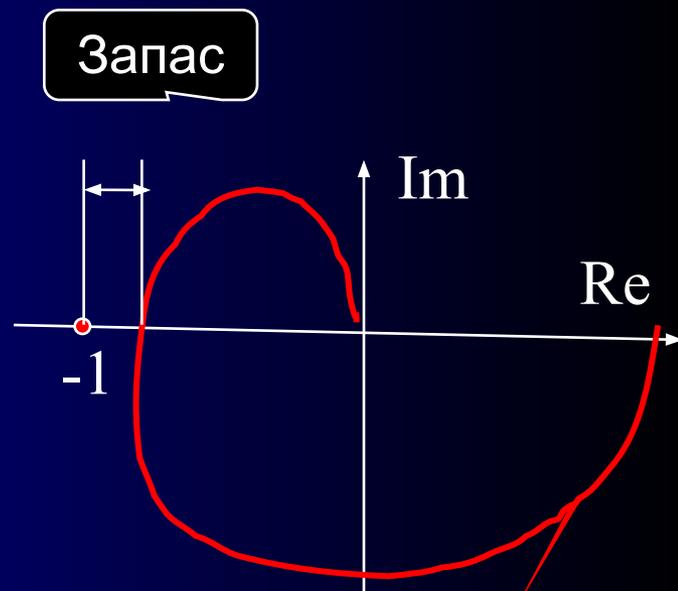
Запас устойчивости САР – «расстояние» от границы устойчивости. При увеличении усиления система становится неустойчивой (неработоспособной – запас устойчивости = 0). Но при малом усилении (большой запас устойчивости) система имеет большую статическую ошибку.



по корням характеристического уравнения



по критерию Михайлова



по критерию Найквиста

83

07/29/2023

D-разбиение

Это оценка запаса устойчивости одновременно по двум параметрам.

Обозначим знаменатель передаточной функции $Q(s)$.

$Q(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$. Граница устойчивости по критерию Михайлова:

$$Q(j\omega) = 0 \Rightarrow \begin{cases} U(\omega) = 0 \\ V(\omega) = 0 \end{cases} \begin{array}{l} \text{Пусть } Q(s) = Q(s, A, B). \\ \text{Тогда граница устойчивости:} \end{array} \begin{cases} U(\omega, A, B) \\ V(\omega, A, B) \end{cases}$$

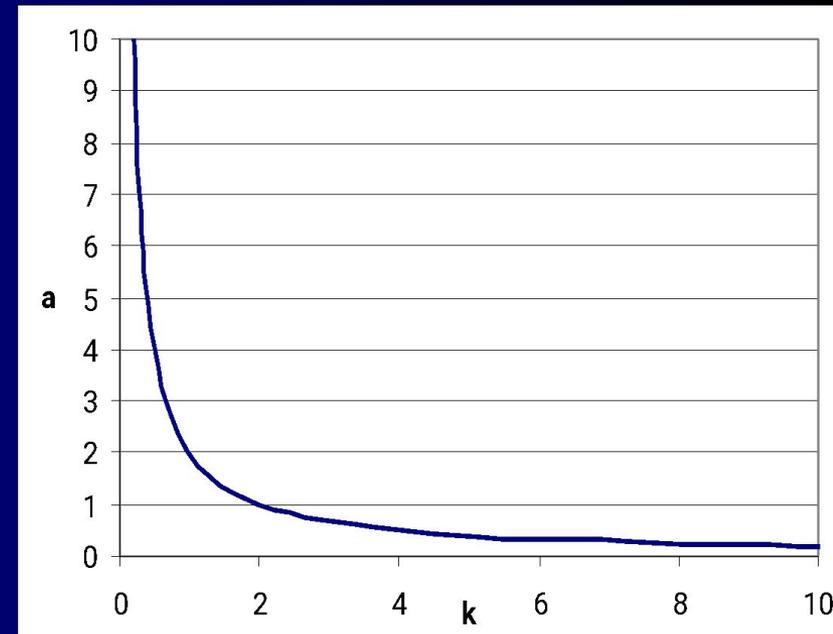
Это параметрически-заданная кривая называется D-разбиение.

Пример: $Q(s) = as^3 + 2s^2 + s + k$; $Q(j\omega) = -j\omega^3 a - 2\omega^2 + j\omega + k =$
 $= k - 2\omega^2 + j(\omega - a\omega^3) = 0$

$$\begin{cases} U(\omega) = k - 2\omega^2 = 0 \\ V(\omega) = \omega - a\omega^3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k = 2\omega^2 \\ a = 1/\omega^2 \end{cases}$$

ω	0	1	2	...	∞
k	0	2	8	...	∞
a	∞	1	0.25	...	0

Леонов Сергей Леонидович



1.14. Законы регулирования



1. Пропорциональный закон (П-регулятор): $y=k\varepsilon$; $W(s)=k$.
Обладает хорошими динамическими свойствами. Система с П-регулятором имеет статическую ошибку.
Пример: усилитель.

2. Интегральный закон (И-регулятор): $y = k \int_0^t \varepsilon dt \Rightarrow \dot{y} = k\varepsilon \Rightarrow W(s)$

Обладает пониженными динамическими свойствами. Система с И-регулятором не имеет статической ошибки (астатическая САР).

Пример: двигатель+заслонка.

1.14. Законы регулирования



3. Пропорционально-интегральный закон (ПИ-регулятор):

$$y = k\left(\varepsilon + \frac{1}{T} \int_0^t \varepsilon dt\right) \Rightarrow \dot{y} = k\left(\dot{\varepsilon} + \frac{1}{T} \varepsilon\right) \Rightarrow W(s) = \frac{k(Ts + 1)}{Ts}$$

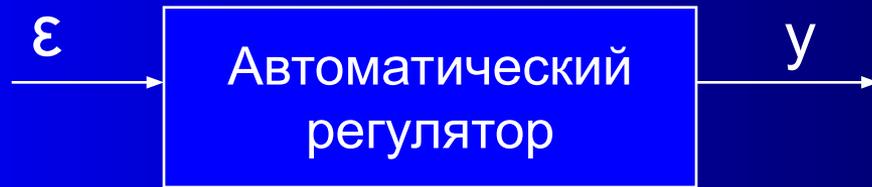
Обладает хорошими динамическими свойствами. Система с ПИ-регулятором не имеет статической ошибки (астатическая САР).

4. Пропорционально-дифференциальный закон (ПД-регулятор):

$$y = k(\varepsilon + T\dot{\varepsilon}) \Rightarrow W(s) = k(Ts + 1)$$

Обладает очень хорошими динамическими свойствами, но САР имеет статическую ошибку.

1.14. Законы регулирования



5. Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-регулятор):

$$y = k\left(\varepsilon + \frac{1}{T_1} \int_0^t \varepsilon dt + T_2 \dot{\varepsilon}\right) \Rightarrow \dot{y} = k\left(\dot{\varepsilon} + \frac{1}{T_1} \varepsilon + T_2 \ddot{\varepsilon}\right)$$

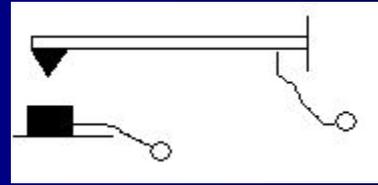
$$W(s) = \frac{k(T_1 T_2 s^2 + T_1 s + 1)}{T_1 s}$$

Обладает очень хорошими динамическими свойствами. Система с ПИД-регулятором не имеет статической ошибки (астатическая САР).

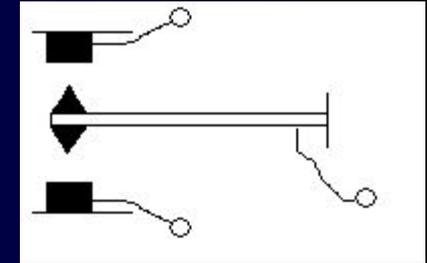
2. Датчики САР

1. Датчики сопротивления.

а) контактные датчики

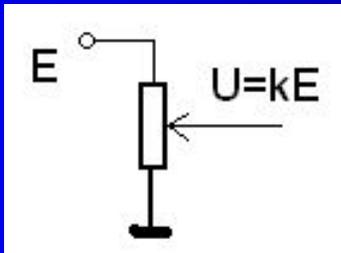


односторонний

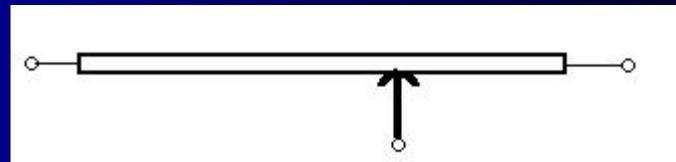


двусторонний

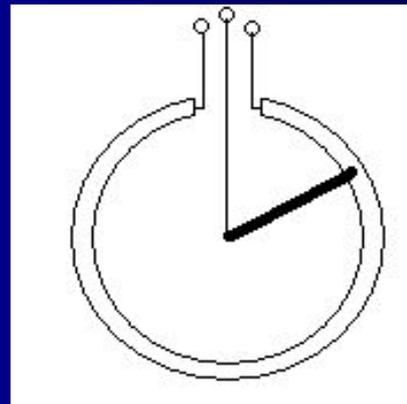
б) потенциометрические



$k = E R / R_0$ (если не учитывать выходной ток)



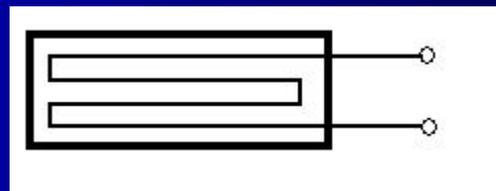
линейный



поворотный

в) тензодатчики

$$R = \rho L / S$$



Проволочные,
фольговые

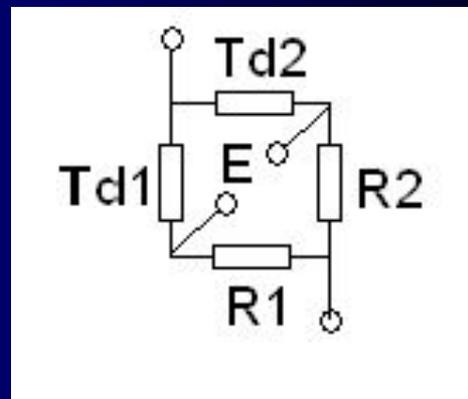
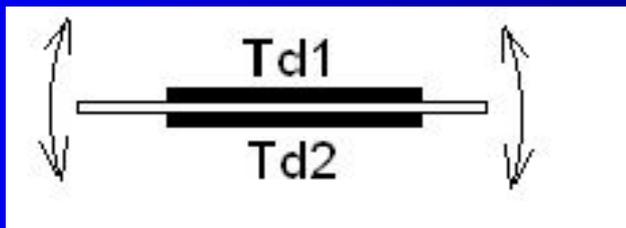
88

07/29/2023

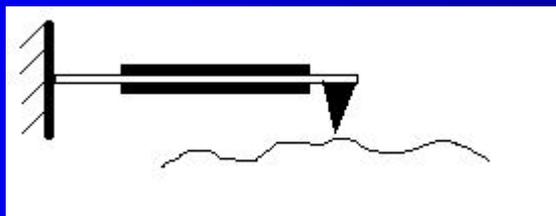
Датчики САР

Примеры использования тензодатчиков:

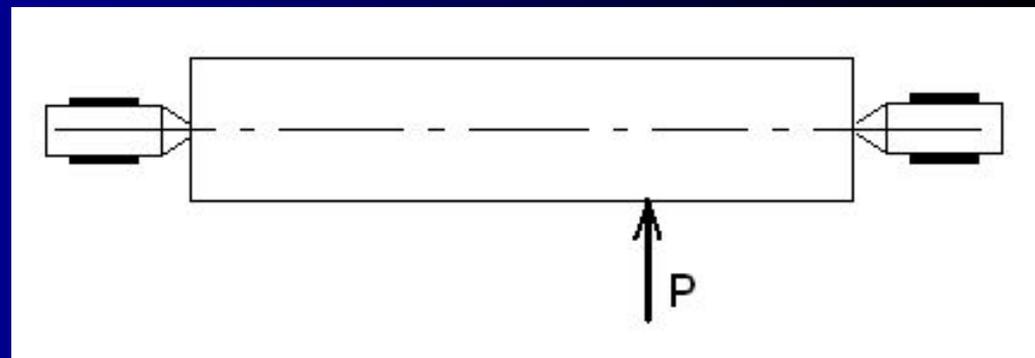
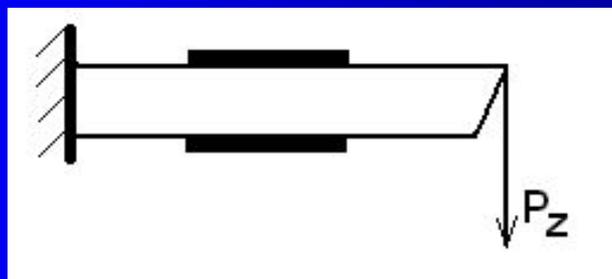
- Измерение деформаций



- Профилографирование



- Измерение сил резания



2. Датчики САР

1. Датчики сопротивления.

г) термосопротивления. Применяются для измерения медленно изменяющейся температуры: $R = R_0(1 + \alpha T)$.

- полупроводниковые термисторы – нелинейная зависимость от температуры (0...100 °С), но высокая чувствительность.
- проволочные – никелевая или платиновая проволока – зависимость от температуры почти линейная (до 800 °С), но чувствительность низкая.

Применяются для регулирования температуры при нагревании (печи, термошкафы) или охлаждении (вентиляции).

д) фотосопротивления. Применяются для измерения медленно изменяющейся освещенности. Имеют нелинейную характеристику и значительную инерционность.

Кроме того, фотосопротивления чувствительны к температуре.

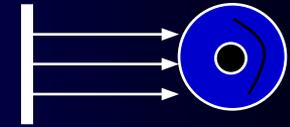
Леонов Сергей Леонидович

90
07/29/2023

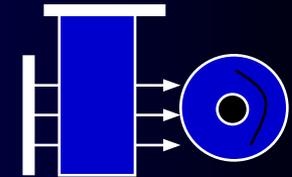
2. Датчики SAR

Использование фотосопротивлений:

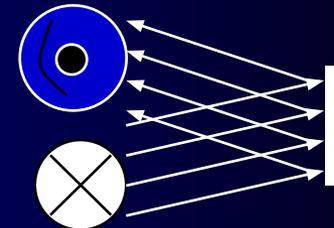
- Измерение светового потока (пирометры)



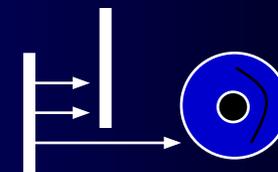
- Определение степени прозрачности объекта



- Определение состояния поверхности

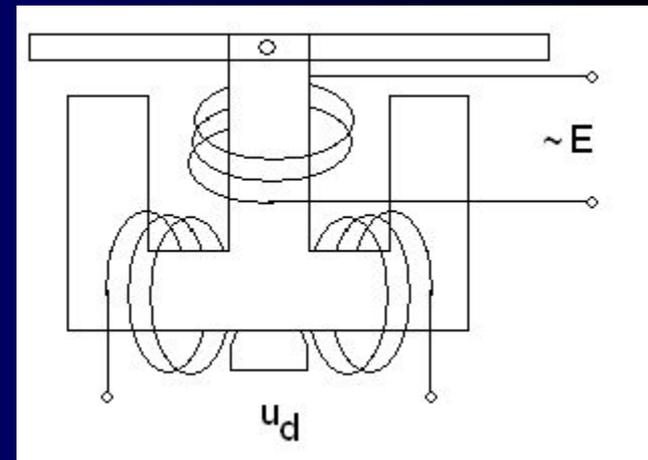
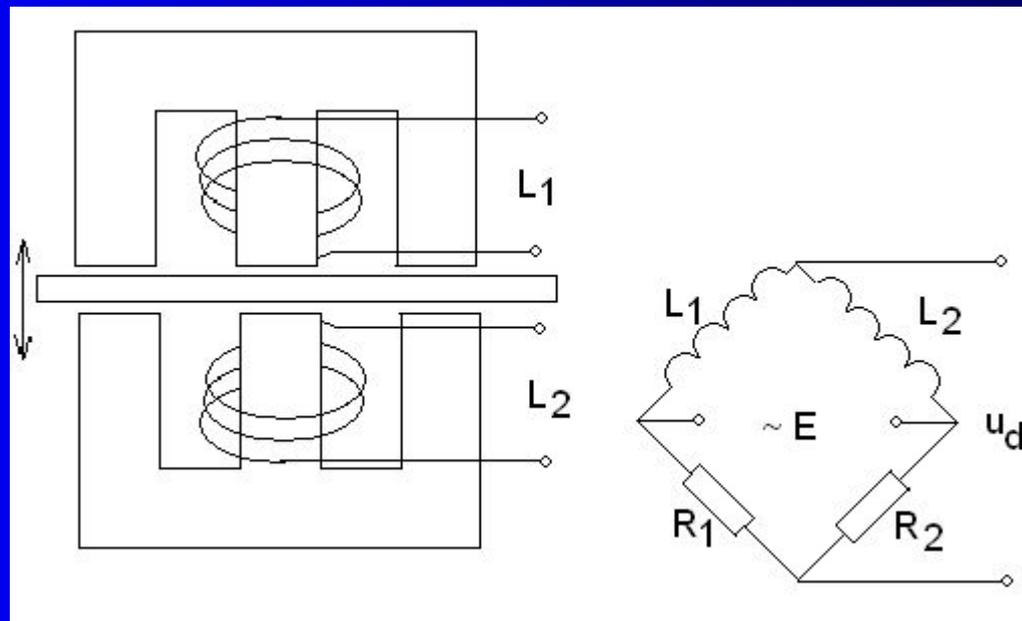


- Определение количество и размера объектов

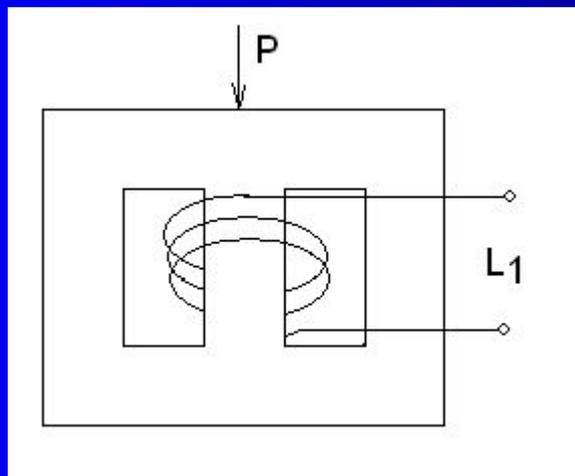


2. Датчики САР

2. Индуктивные датчики.



Обмотки включены навстречу друг другу

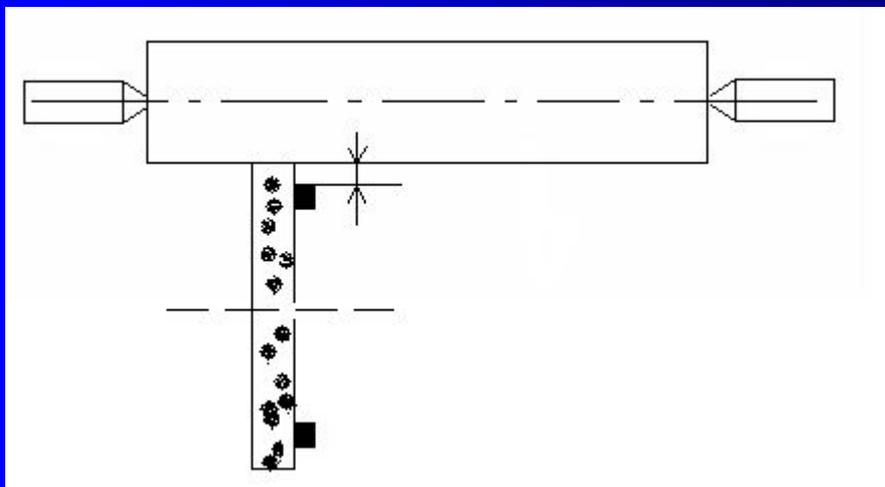
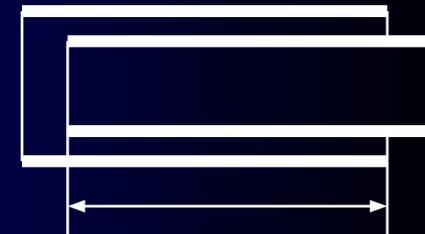
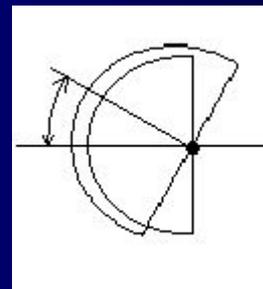
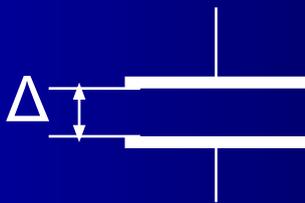


Основано на явлении магнитоупругости:

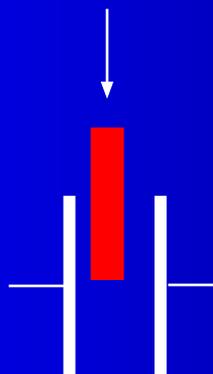
$$\mu = f(P) \Rightarrow L = f_1(P)$$

2. Датчики САР

3. Емкостные датчики.



Измерение износа шлифовального круга и относительных колебаний



- Замена контактного датчика емкостным
- Измерение перемещений

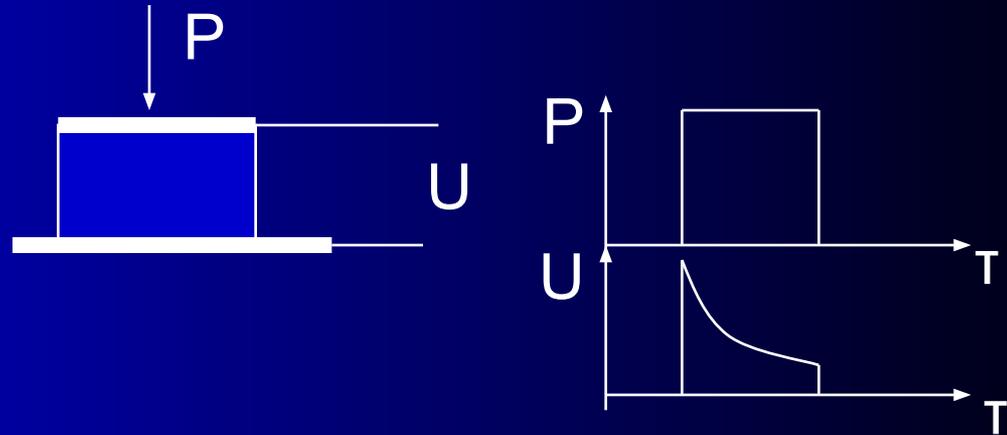
2. Датчики САР

4. Датчики напряжения:

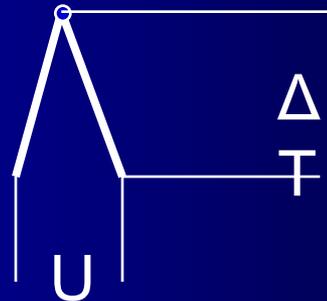
- тахогенератор



- пьезоэлемент



- термопара (до 1500 °С)
(хромель-капель,
железо-константан
и др.)



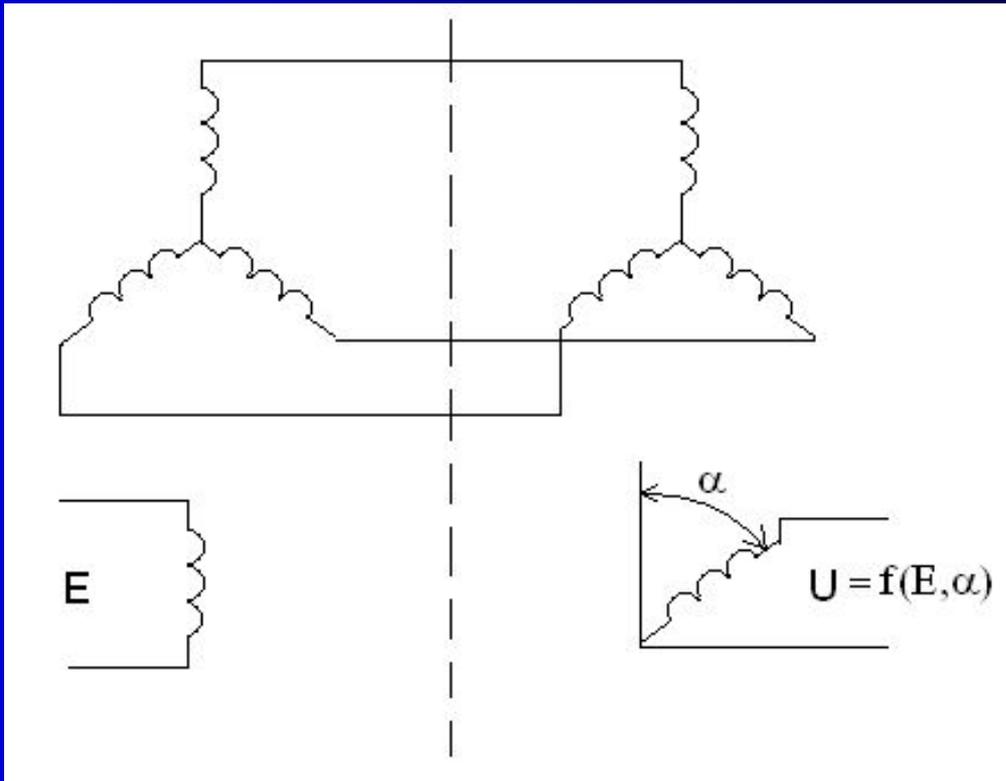
- фотодатчики (фотодиоды, фототранзисторы и др.) -
более высокая чувствительность и меньшая

инерционность (можно измерять вибрации)

2. Датчики САР

4. Датчики напряжения:

- сельсины (измерение углов поворота)



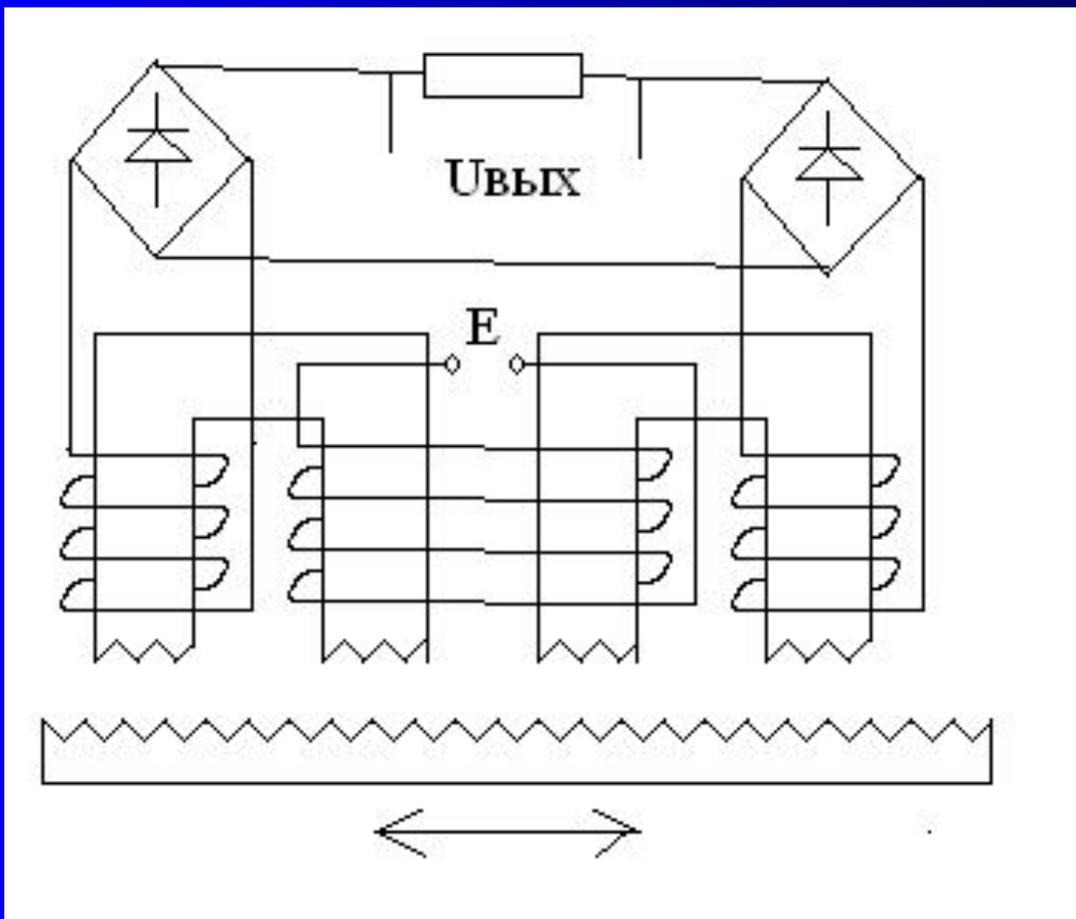
- Силовая схема – для передачи крутящего момента
- Трансформаторная схема – для измерения углов поворота

95

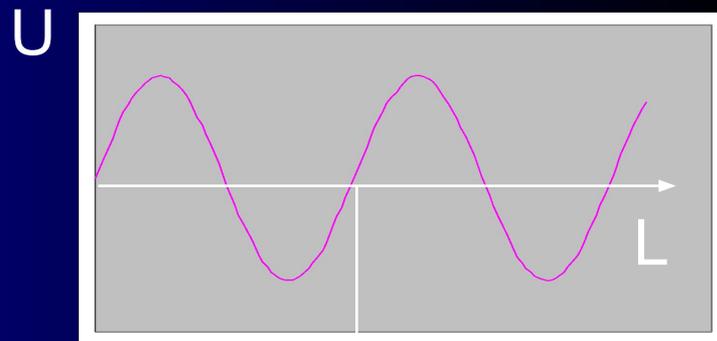
2. Датчики САР

5. Датчики оборудования с ЧПУ:

- линейный магнитный зубчатый датчик



Зубья одного сердечника смещены относительно другого на 0,5 шага



шаг

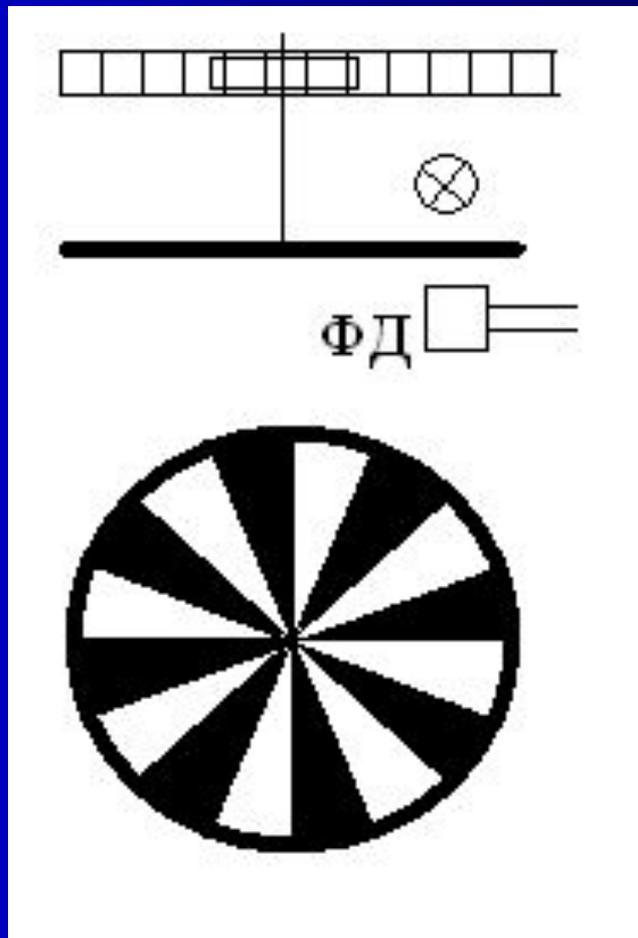
Точность – до $\frac{1}{96}$ 10 мкм

07/29/2023

2. Датчики САР

5. Датчики оборудования с ЧПУ:

- фотоэлектрический импульсный датчик

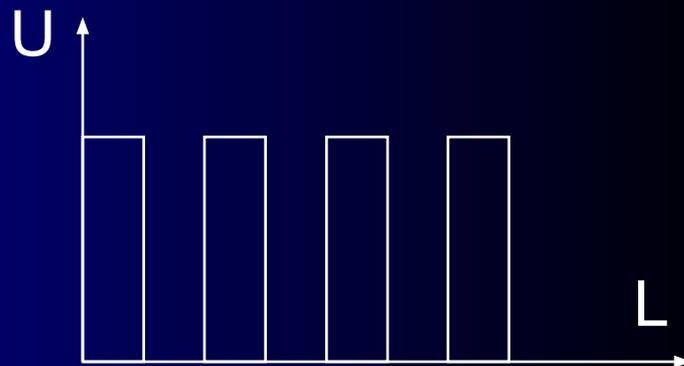


Диск

Зубчатая передача

Осветитель

Фотоприемник

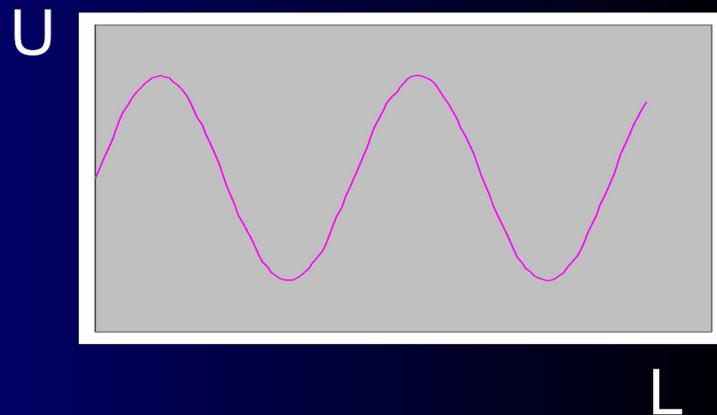


Точность — до 5 мкм

2. Датчики САР

5. Датчики оборудования с ЧПУ:

- фотоэлектрический датчик с дифракционными решетками

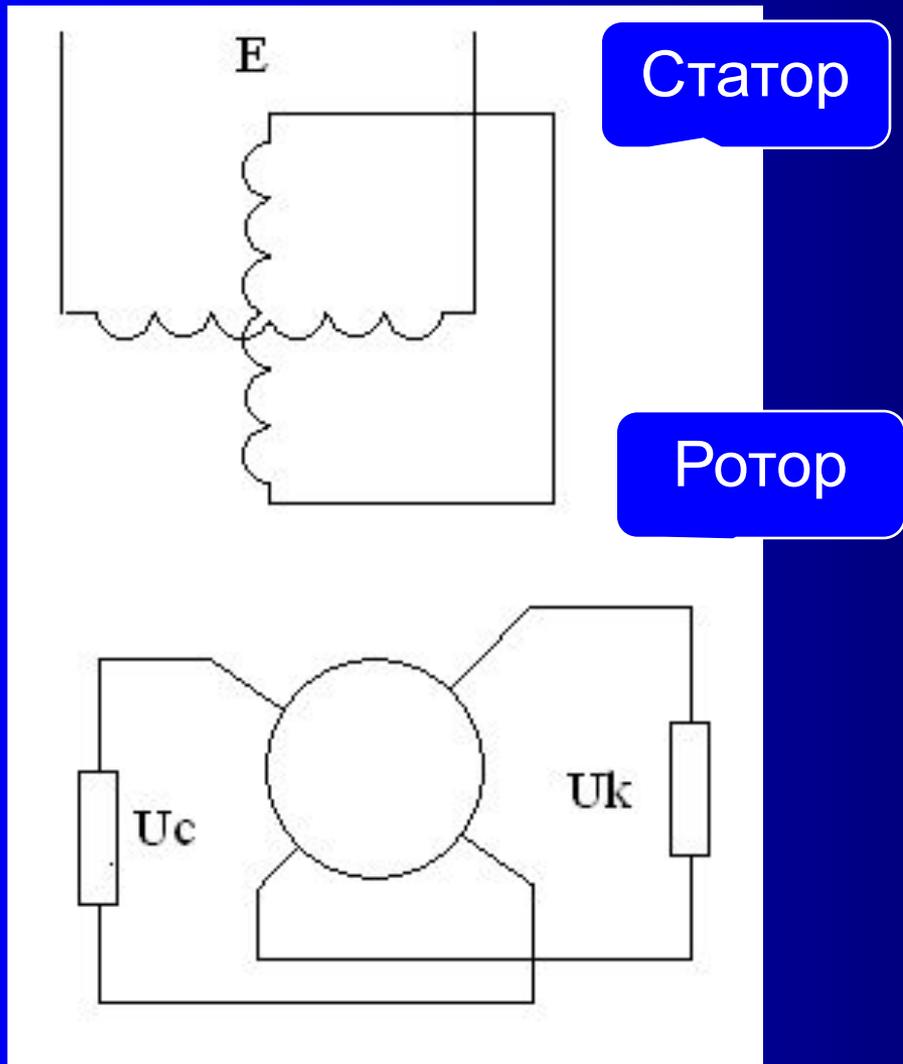


Точность – до 0,5 мкм
98
07/29/2023

2. Датчики САР

5. Датчики оборудования с ЧПУ:

- вращающиеся трансформаторы



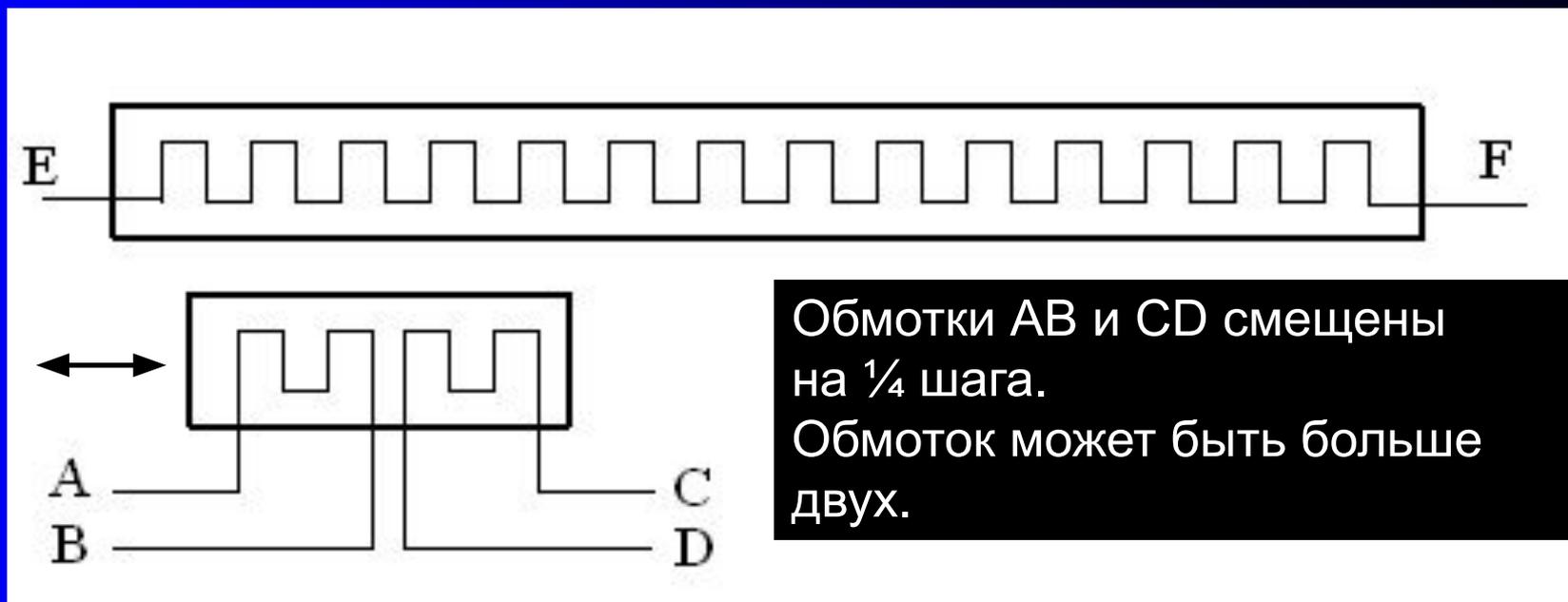
$$U_c = K \cdot E \sin \varphi$$

$$U_k = K \cdot E \cos \varphi$$

2. Датчики САР

5. Датчики оборудования с ЧПУ:

- индуктосины

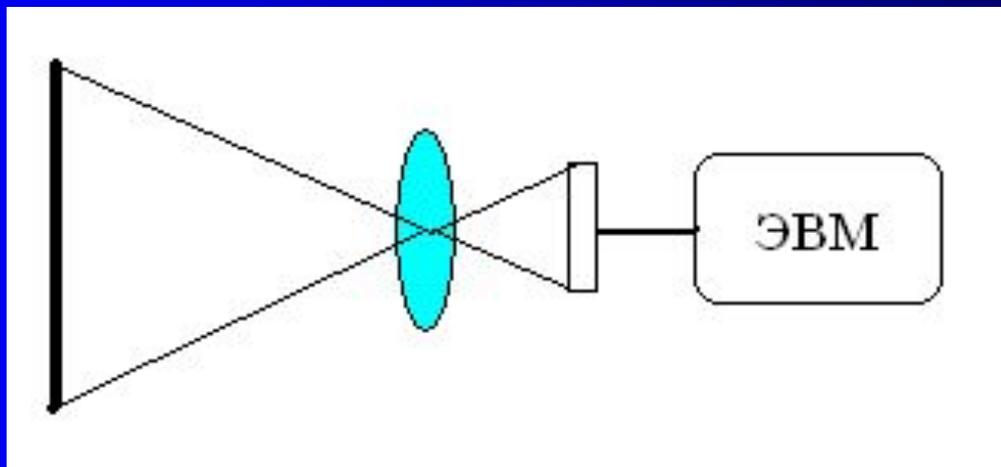


При подаче на обмотки АВ и ВС напряжений, смещенных по фазе на 90° , на обмотке EF индуцируется напряжение, фаза которого зависит от положения, а амплитуда постоянна. Точность – до 1 мкм.

2. Датчики САР

5. Датчики оборудования с ЧПУ:

- фотодатчики: фотодиодные и ПЗС линейки и матрицы.



Линейки позволяют производить измерение размеров с точностью до 1 мкм, осуществлять измерение состояния поверхности, профилограммы и т.д.

Объект
измерения

Оптическая
система

Датчик

Фотодиодные и ПЗС-матрицы являются основой для создания систем технического зрения.

Усилительные элементы

№	Усилитель	Чувствительность	Мощность	Быстродействие
1	Реле	средняя	средняя	низкое
2	Электронный	высокая	низкая	высокое
3	Магнитный	средняя	средняя	среднее
4	Электрома- шинный	низкая	высокая	низкое

Моделирование САР

1. ЭЦВМ – для моделирования используются численные методы решения дифференциальных уравнений (метод Эйлера, Рунге-Кутта и др.)

Преимущества:

- Универсальность
- Удобное оформление результатов (красивость)

Проблемы:

- Точность и время решения зависят от шага интегрирования
- Сложности представления решения в графическом виде
- Высокая цена

2. АВМ – моделирование на основе использования электронной схемы.

Преимущества:

- Высокое быстродействие (теоретически ∞)
- Низкая цена
- Простота изучения и программирования
- Удобство сопряжения с графическими устройствами

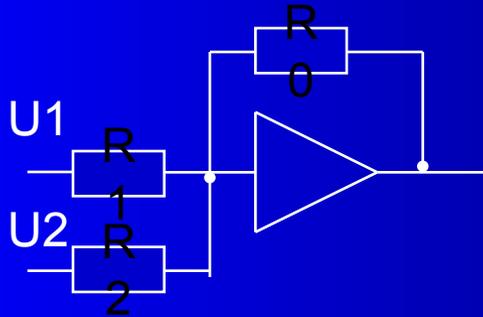
Недостатки

- Специализированность
- Более низкая точность

Моделирование САР

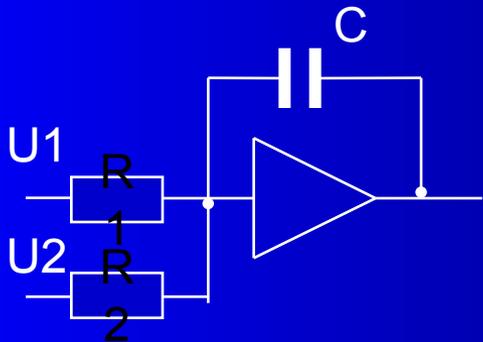
Блоки АВМ:

1. Сумматор



$$U = -\left(\frac{R1}{R0}U1 + \frac{R2}{R0}U2\right) = -(\alpha_1U1 + \alpha_2U2)$$

2. Интегросумматор

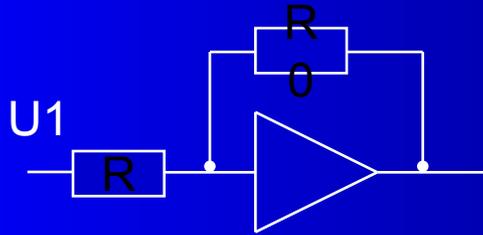


$$U = -\int_0^{\tau} \left(\frac{1}{R_1 C}U1 + \frac{1}{R_2 C}U2\right) d\tau = -\int_0^{\tau} (\alpha_1U1 + \alpha_2U2) d\tau$$

Моделирование САР

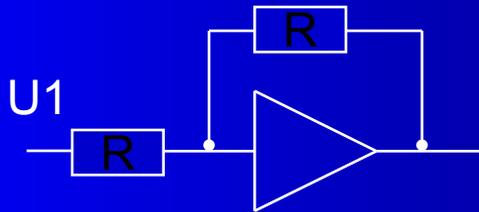
Блоки АВМ:

3. Масштабный блок



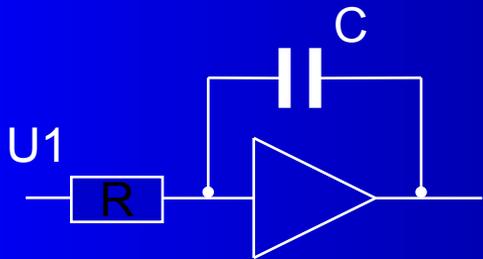
$$U = -\frac{R}{R_0}U_1 = -\alpha_1 U_1$$

4. Инвертор



$$U = -U_1$$

5. Интегратор



$$U = -\int_0^{\tau} \frac{1}{RC} U_1 d\tau = -\int_0^{\tau} \alpha U_1 d\tau$$

Моделирование САУ

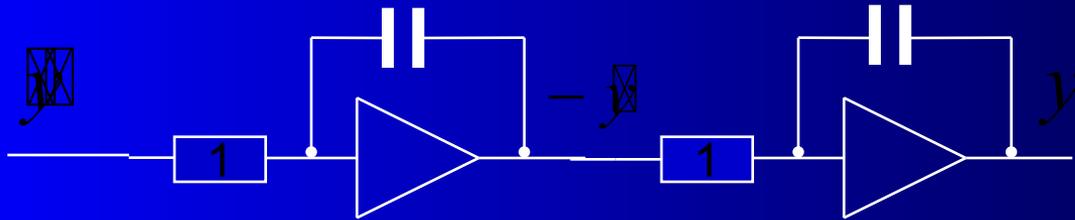
Решение линейных дифференциальных уравнений:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = x(\tau); \quad y(0) = y_0; \quad \dot{y}(0) = y_1$$

1. Выражаем старшую производную:

$$\ddot{y} = \frac{1}{a}x(\tau) - \frac{b}{a}\dot{y} - \frac{c}{a}y$$

2. Составляем схему



Моделирование САР

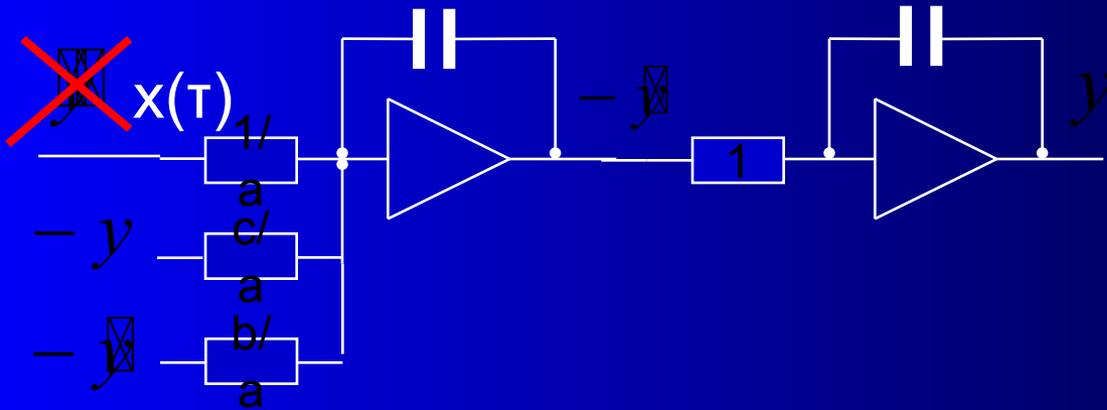
Решение линейных дифференциальных уравнений:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = x(\tau); \quad y(0) = y_0; \quad \dot{y}(0) = y_1$$

1. Выражаем старшую производную:

$$\ddot{y} = \frac{1}{a}x(\tau) - \frac{b}{a}\dot{y} - \frac{c}{a}y$$

2. Составляем схему



Моделирование САУ

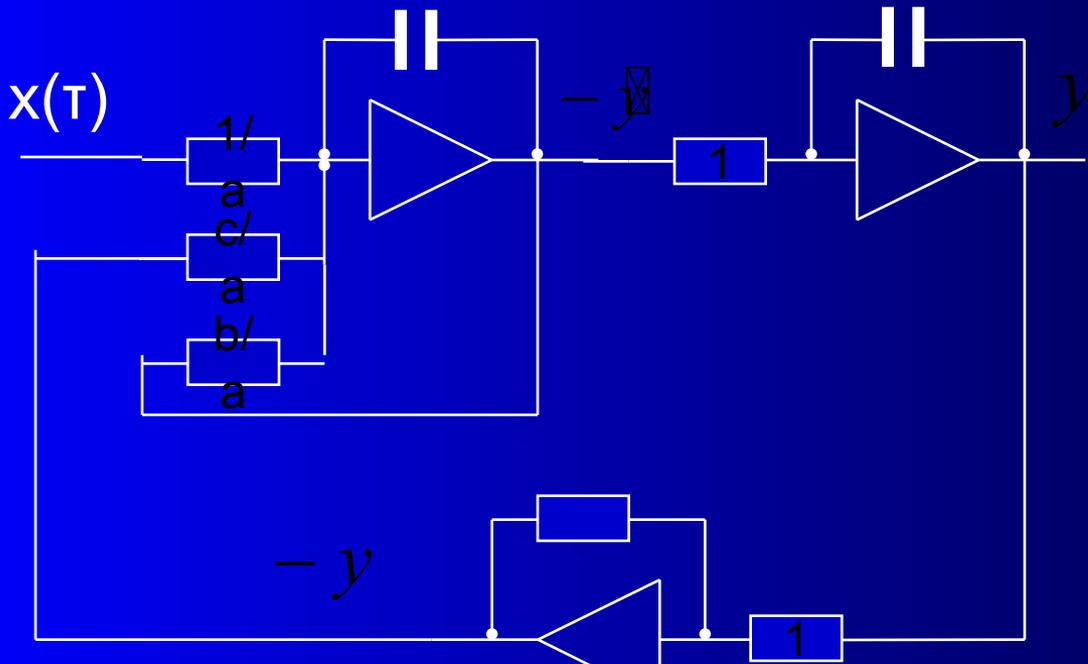
Решение линейных дифференциальных уравнений:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = x(\tau); \quad y(0) = y_0; \quad \dot{y}(0) = y_1$$

1. Выражаем старшую производную:

$$\ddot{y} = \frac{1}{a}x(\tau) - \frac{b}{a}\dot{y} - \frac{c}{a}y$$

2. Составляем схему



Последовательность действий:

1. Соединяем последовательно n интеграторов
2. На входе первого интегратора создаем схему, соответствующую преобразованному ДУ
3. Соединяем входы этой схемы с соответствующими выходами интеграторов, при необходимости включая инверторы