ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Общие понятия

Типовыми называют идеализированные динамические звенья, свойства которых достаточно точно аппроксимируют свойства отдельных элементов реальных САР.

Любая САР может быть представлена в виде комбинации (последовательного или параллельного соединения) типовых звеньев.

К числу типовых звеньев, из которых состоят линейные САР, относятся следующие звенья с ПФ:

1. Усилительное звено
$$K(p) = k$$

2. Интегрирующее звено
$$K(p) = \frac{k}{p} = \frac{1}{Tp}$$

3. Дифференцирующее звено
$$K(p) = \tau p$$

4. Апериодическое звено
$$K(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$

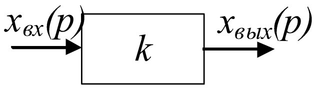
5. Форсирующее звено 1-го порядка
$$K(p) = \tau p + 1$$

6. Колебательное звено
$$K(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}, \qquad \xi < 1$$

7. Форсирующее звено 2-го порядка
$$K(p) = T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1$$

8. Звено чистого запаздывания
$$K(p) = e^{-\tau p}$$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ



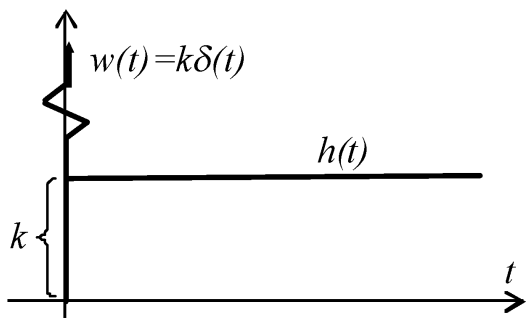
Пропорциональное звено (усилитель)

$K(p) = k$

$$x_{вых}(p) = k \cdot x_{вх}(p)$$

k $[1]$ – коэффициент передачи

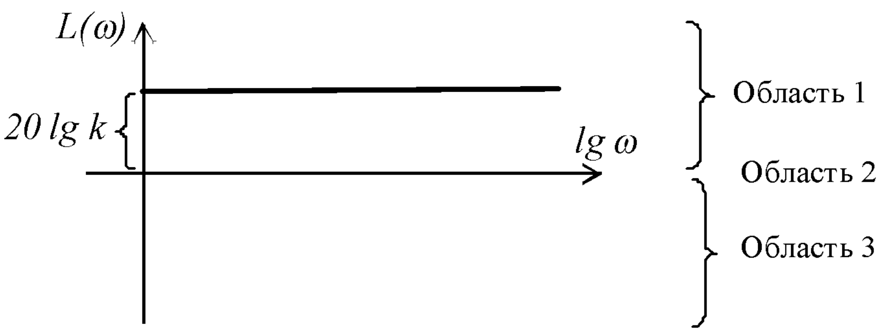
Дифференциальное уравнение $x_{вых}(t) = k \cdot x_{вх}(t)$

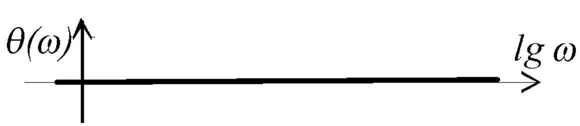


Переходная функция $h(t) = k \cdot 1(t) = k$

Весовая функция $w(t) = \dfrac{dh(t)}{dt} = k \cdot \delta(t)$

Частотная характеристика $K(j\omega) = k$





АЧХ $A(\omega) = |K(j\omega)| = k$

ФЧХ и ЛФЧХ $\theta(\omega) = 0$

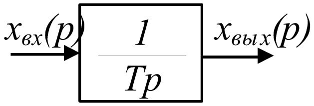
ЛАЧХ $L(\omega) = 20 \lg k$

Область 1 – при $k > 1$

Область 2 – при $k = 1$

Область 3 – при $k < 1$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ



Интегрирующее звено (интегратор)

$$K(p) = \frac{k}{p} = \frac{1}{Tp}$$

$$\boxed{x_{вых}(p) = \frac{k}{p} x_{вх}(p) = \frac{1}{Tp} x_{вх}(p)}$$

k [1/c] – коэффициент передачи; T [c] – постоянная времени.

Дифференциальное уравнение

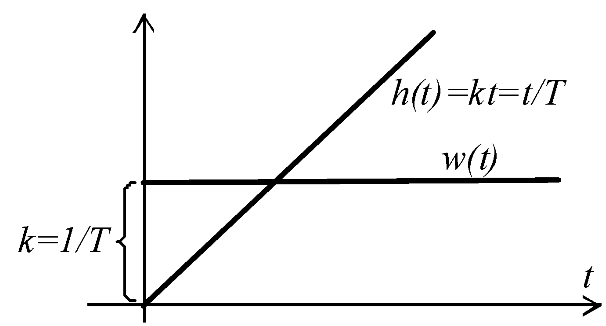
$$\boxed{x_{вых}(t) = \frac{1}{T}\int_0^t x_{вх}(t)dt = k\int_0^t x_{вх}(t)dt}$$

Переходная функция

$$h(t) = \frac{1}{T}\int_0^t 1(t)dt = \frac{1}{T}t = kt$$

Весовая функция

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{T} = k$$



ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Интегрирующее звено (интегратор)

Частотная характеристика $K(j\omega)=\dfrac{1}{j\omega T}=\dfrac{1}{\omega T e^{j\pi/2}}=\dfrac{1}{\omega T}e^{-j\pi/2}$

АЧХ $A(\omega)=|K(j\omega)|=\dfrac{1}{\omega T}$

ФЧХ $\theta(\omega)=\arg[K(j\omega)]=-\pi/2$

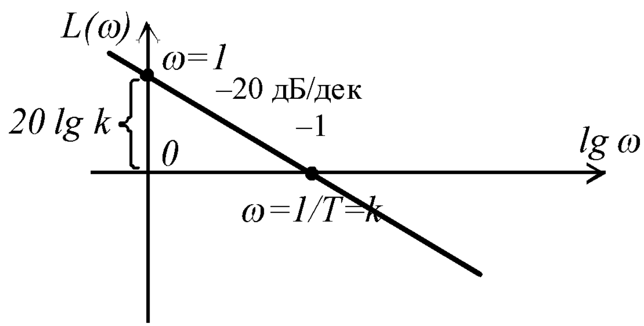
В интеграторе выходной сигнал отстает от входного по фазе на $\pi/2$, независимо от частоты ω.

ЛАЧХ $L(\omega)=20\lg\dfrac{1}{\omega T}=-20\lg\omega T$

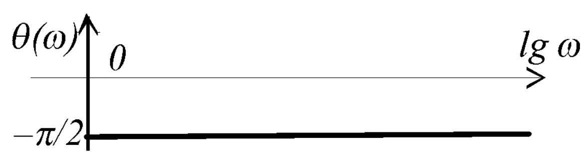
ЛФЧХ $\theta(\omega)=-\pi/2$

ЛАЧХ при какой-то определенной частоте ω_1 равна $L(\omega_1)= -20\lg\omega_1 T$. При увеличении частоты в 10 раз (на одну декаду) $L(10\omega_1) = -20\lg 10\omega_1 T = -20\lg\omega_1 T - 20$. Поскольку $L(\omega_1) - L(10\omega_1) = 20$ *дБ*, следовательно, ЛАЧХ интегрирующего звена представляет собой прямую с наклоном –20 дБ/дек.

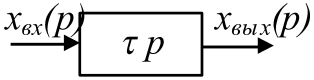
Построение ЛАЧХ производим по характерным точкам:
при $\omega=1$ $L(\omega)= -20\lg T = 20\lg 1/T = 20\lg k$.
при $\omega=1/T$ $L(\omega)=0$.



Наклон ЛАЧХ –20 дБ/дек соответствует наклону АЧХ –1,



Интегратор не пропускает на выход высокие частоты, являясь *фильтром низких частот*.



ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Дифференцирующее звено (дифференциатор)

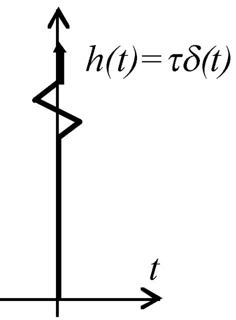
$K(p) = \tau p$

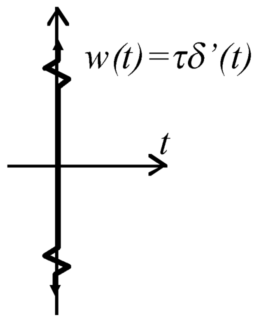
$\tau\ [c]$ – постоянная времени

$$x_{вых}(p) = \tau p x_{вх}(p)$$

Дифференциальное уравнение

$$x_{вых}(t) = \tau \frac{dx_{вх}(t)}{dt}$$





Переходная функция $h(t) = \tau \dfrac{d1(t)}{dt} = \tau\delta(t)$

Весовая функция $w(t) = \dfrac{dh(t)}{dt} = \tau\delta'(t)$

АЧХ $A(\omega) = |K(j\omega)| = \omega\tau$

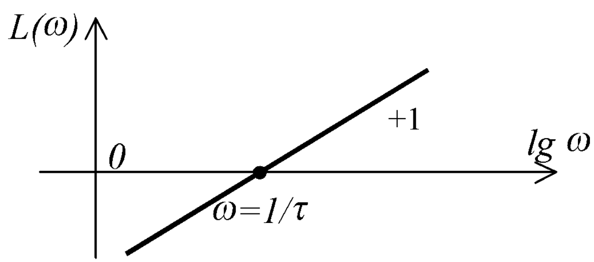
Частотная характеристика $K(j\omega) = j\omega\tau = \omega\tau e^{j\pi/2}$

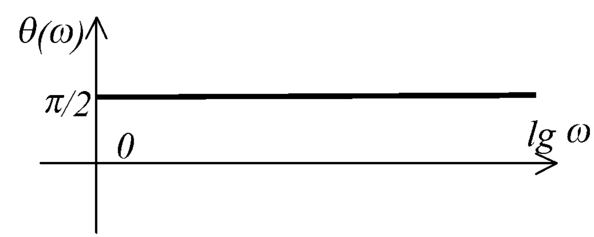
ФЧХ $\theta(\omega) = \arg[K(j\omega)] = \pi/2$

В дифференциаторе выходной сигнал опережает входной по фазе на *π/2*, независимо от частоты *ω*.

ЛАЧХ $L(\omega) = 20\lg\omega\tau$

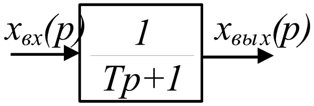
ЛФЧХ $\theta(\omega) = \pi/2$





Звено является помехо**не**устойчивым в том смысле, что оно подчеркивает высокочастотные помехи (наиболее частые на практике): даже при малой входной амплитуде высокочастотного сигнала на выходе можно наблюдать значительную высокочастотную составляющую

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ



Апериодическое (инерционное) звено

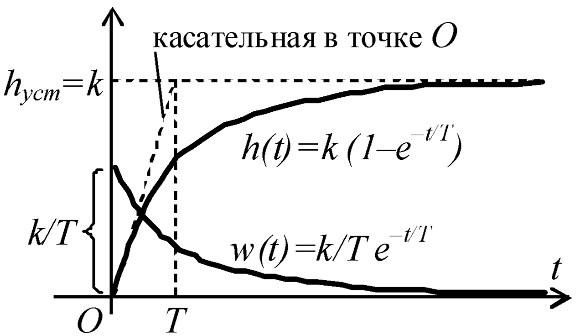
$$(Tp+1)x_{вых}(p) = kx_{вх}(p)$$

$$K(p) = \frac{k}{Tp+1}$$

k [1] – коэффициент передачи;
T [c] – постоянная времени

Дифференциальное уравнение

$$T\frac{dx_{вых}(t)}{dt} + x_{вых}(t) = kx_{вх}(t)$$



Весовая функция

$$w(t) = k(t) = \mathrm{L}^{-1}[k(t)] = \frac{k}{T}e^{-t/T}$$

Переходная функция

$$h(t) = \int_0^t w(t)dt = \int_0^t \frac{k}{T}e^{-t/T}dt = \frac{k}{T}(-T)e^{-t/T}\Big|_0^t = -k\left(e^{-t/T}-1\right) = k\left(1-e^{-t/T}\right)$$

Используя выражение для переходной функции, можно определить:

h(T) = 0,632 k = 0,632 hуст
h(2T) = 0,865 hуст
h(3T) = 0,950 hуст
h(4T) = 0,982 hуст

Таким образом, переходный процесс практически закончится при $t = (3 \div 4)T$

Постоянная времени *T* является мерой инерционности апериодического звена. Чем меньше значение *T*, тем быстрее протекает переходный процесс.

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Апериодическое (инерционное) звено

Частотная характеристика $$K(j\omega)=\frac{k}{j\omega T+1}=\frac{k}{\sqrt{1+\omega^2T^2}\cdot e^{j\,arctg\omega T}}=\frac{k}{\sqrt{1+\omega^2T^2}}e^{-j\,arctg\omega T}$$

АЧХ $$A(\omega)=|K(j\omega)|=\frac{k}{\sqrt{1+\omega^2T^2}}$$

ФЧХ $$\theta(\omega)=\arg[K(j\omega)]=-arctg\omega T$$

В апериодическом звене фазовый сдвиг зависит от частоты, причем максимальный фазовый сдвиг будет равен $-\pi/2$ при $\omega\to\infty$.

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

ЛФЧХ $$\theta(\omega)=-arctg\omega T$$

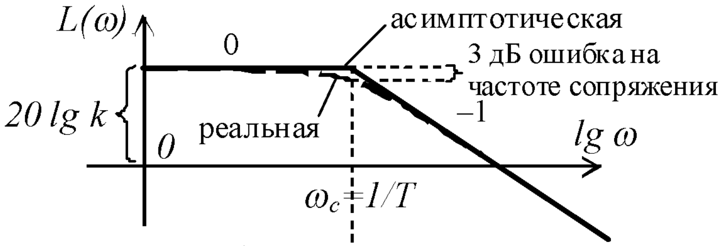
Асимптотическая ЛАЧХ

При малых частотах $\omega<<\omega_c=1/T$ $\quad \omega^2T^2<<1$ $\quad L(\omega)\approx 20\lg k$

При больших частотах $\omega>>\omega_c=1/T$ $\quad L(\omega)\approx 20\lg k-20\lg\omega T$

Асимптотическая ЛАЧХ состоит из двух отрезков, пересекающихся на оси частот в точке, соответствующей частоте $\omega_c=1/T$

$\omega_c=1/T$ *- частота сопряжения*

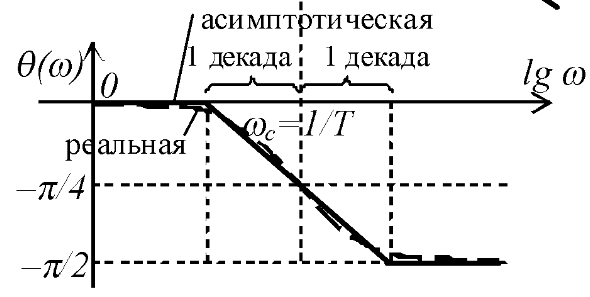


Асимптотическая ЛФЧХ

$\omega<<\omega_c \qquad \theta(\omega)\to 0$

$\omega_c=1/T \qquad \theta(\omega)=-arctg1=-\pi/4$

$\omega>>\omega_c \qquad \theta(\omega)\to-\pi/2$

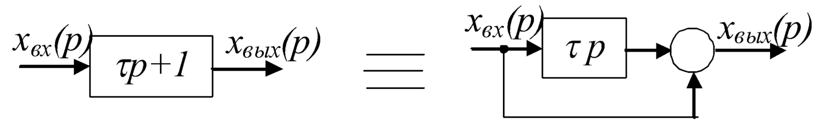


ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Форсирующее звено 1-го порядка

$$K(p)=\tau p+1$$

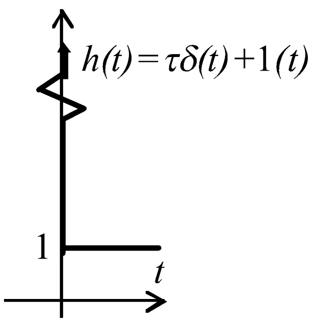
$\tau\ [c]$ – постоянная времени



$$x_{вых}(p)=(\tau p+1)x_{вх}(p)$$

Дифференциальное уравнение

$$x_{вых}(t)=\tau\frac{dx_{вх}(t)}{dt}+x_{вх}(t)$$



Переходная функция $h(t)=\tau\dfrac{d1(t)}{dt}+1(t)=\tau\delta(t)+1(t)$

Весовая функция: $w(t)=\dfrac{dh(t)}{dt}=\tau\delta'(t)+\delta(t)$

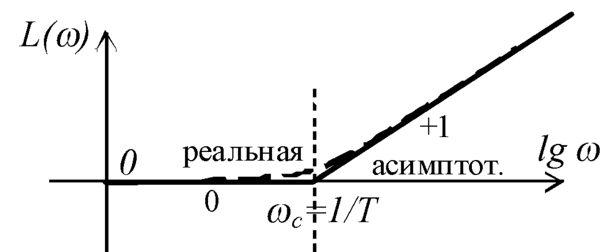
Частотная характеристика $K(j\omega)=j\omega\tau+1=\sqrt{1+\omega^2\tau^2}\,e^{j\,arctg\omega\tau}$

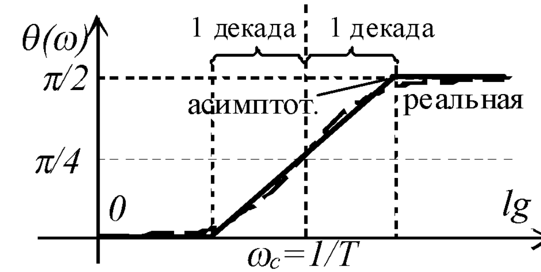
АЧХ $A(\omega)=|K(j\omega)|=\sqrt{1+\omega^2\tau^2}$

ФЧХ $\theta(\omega)=\arg[K(j\omega)]=arctg\omega\tau$

ЛАЧХ $L(\omega)=20\lg A(\omega)=20\lg\sqrt{1+\omega^2\tau^2}$

ЛФЧХ $\theta(\omega)=arctg\omega\tau$





ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Колебательное звено

$$K(p) = \frac{k}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1}$$

$$g(p) \longrightarrow \boxed{\frac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1}} \longrightarrow x(p)$$

k [1] – коэффициент усиления; *T* [c] – постоянная времени;

ξ [1] – коэффициент демпфирования, характеризует интенсивность затухания колебаний

Звено называют *колебательным*, если 0<*ξ*<1.

При *ξ*≥1 звено вырождается в *инерционное 2-го порядка.*

При *ξ=0* звено вырождается в *консервативное*, при *ξ*<0 звено неустойчиво.

Часто п.ф. колебательного звена представляют <u>в нестандартных формах</u>:

- $$K(p) = \frac{k\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}$$

ω_0 – угловая частота колебательного звена;

$$\omega_0 = 1/T$$

- $$K(p) = \frac{k\omega_0^2}{(p+\alpha)^2 + \beta^2}$$

α, *β* – коэффициент затухания и частота свободных колебаний, могут быть определены как модули действительной и мнимой частей полюсов п.ф. колебательного звена в результате решения характеристического уравнения $p^2 + 2p\alpha + \alpha^2 + \beta^2 = 0$:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \alpha^2 - \beta^2} = -\alpha \pm j\beta$$

Приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях *p* в перечисленных формах записи п.ф., можно найти:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} = \frac{1}{\omega_0}$$

$$\alpha = \frac{\xi}{T} = \xi\omega_0$$

$$\beta = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Колебательное звено

$$K(p)=\frac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1}$$

- $$K(p)=\frac{k}{T_1T_2p^2+T_2p+1}$$

T_1, T_2 – постоянные времени [с]

Сравнение со стандартной формой записи дает:

$$T_1T_2=T^2 \qquad T_2=2\xi T$$

или

$$T=\sqrt{T_1T_2} \qquad \xi=\frac{T_2}{2T}=\frac{T_2}{2\sqrt{T_1T_2}}=\frac{1}{2}\cdot\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

Эта форма записи часто используется в электромеханике. Например, в этой форме может быть представлен любой электродвигатель при определенных допущениях, причем T_1 выступает как электромагнитная постоянная времени; T_2 – механическая.

Если в результате анализа соотношения T_1 и T_2 оказывается, что $\xi<1$, полюсы $-\alpha\pm j\beta$ будут комплексные (комплексно-сопряженные), и получается объект в виде *колебательного* звена. В противном случае ($\xi\geq1$) корни знаменателя ПФ становятся вещественными, и звено представляет собой последовательное соединение двух апериодических звеньев, т.е. является *инерционным 2-го порядка*.

Т.о., значение ξ определяет характер переходного процесса (как будет показано ниже).

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Колебательное звено

Дифференциальное уравнение:

$$T^2 \frac{d^2 x_{вых}(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx_{вых}(t)}{dt} + x_{вых}(t) = k x_{вх}(t)$$

$$g(p) \longrightarrow \boxed{\dfrac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1}} \longrightarrow x(p)$$

Операторное уравнение:

$$\left(T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1\right)x(p) = kg(p)$$

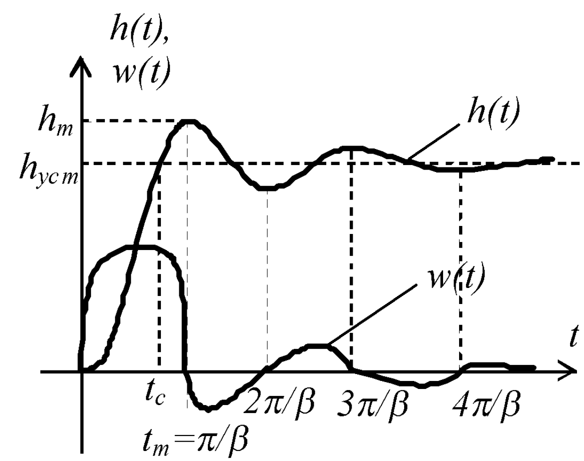
Переходная функция

$$h(t) = \mathrm{L}^{-1}\left[\frac{K(p)}{p}\right] = \mathrm{L}^{-1}\left[\frac{k\omega_0^2}{p(p+\alpha-j\beta)(p+\alpha+j\beta)}\right] =$$

$$= k\left[1 - \frac{\omega_0}{\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi)\right]$$

где

$$\varphi = arctg(\beta/\alpha)$$



Весовая функция

Установившееся значение: $h_{уст} = k$

$$w(t) = \mathrm{L}^{-1}[K(p)] = \quad = \frac{k\omega_0^2}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t$$

Значение **времени первого согласования *tc*** можно узнать, если в выражении для переходной функции приравнять синус нулю, тогда $\beta t_c + \varphi = \pi$

$$t_c = \frac{\pi - \varphi}{\beta}$$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Колебательное звено

Время t_m достижения максимального значения можно узнать, приравняв значение весовой функции нулю:

$$t_m = \frac{\pi}{\beta} = \frac{\pi T}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

Равенство нулю весовой функции будет иметь место также для всех $t = kt_m = k\pi/\beta$

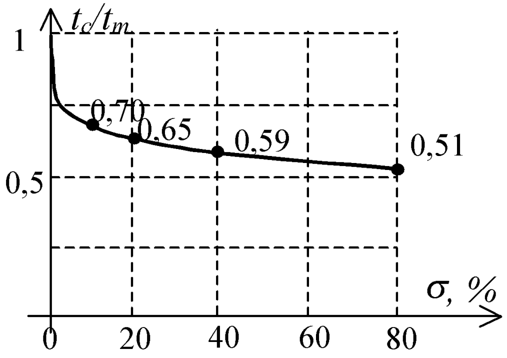
Подставив t_m в выражение для переходной функции, определим максимальное значение выходной переменной в переходном режиме:

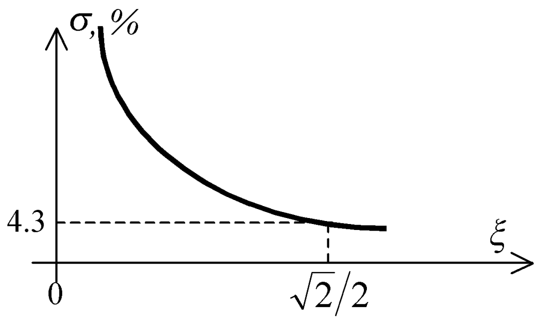
$$h_m = k\left[1 - \frac{\omega_0}{\beta} e^{-\alpha\pi/\beta} \sin(\pi + \varphi)\right] = k\left(1 + e^{-\alpha\pi/\beta}\right)$$

где $\sin\varphi = \beta/\omega_0$

Перерегулирование

$$\sigma = \frac{h_m - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = e^{-\alpha\pi/\beta} \cdot 100\%$$





ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Колебательное звено

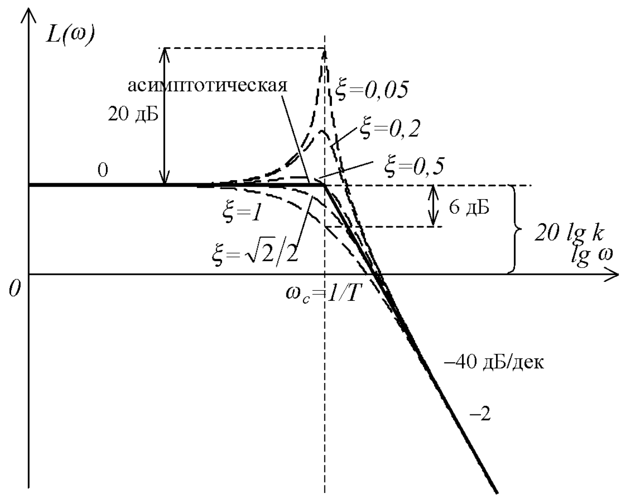
Частотная характеристика: $$K(j\omega)=\frac{k}{1-\omega^2T^2+j2\xi\omega T}=A(\omega)e^{j\theta(\omega)}$$

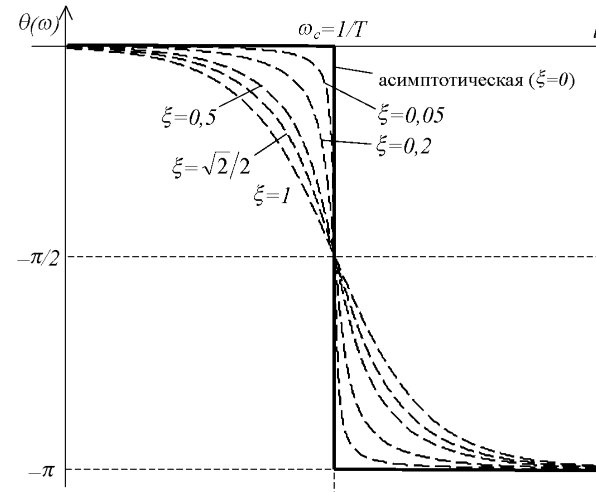
АЧХ $$A(\omega)=|K(j\omega)|=\frac{k}{\sqrt{\left(1-\omega^2T^2\right)^2+4\xi^2\omega^2T^2}}$$

ФЧХ $$\theta(\omega)=\arg[K(j\omega)]=-arctg\frac{2\xi\omega T}{1-\omega^2T^2}$$

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

ЛФЧХ $$\theta(\omega)=-arctg\frac{2\xi\omega T}{1-\omega^2T^2}$$





$$\omega_c=1/T$$

$$\theta(\omega)=-arctg\infty=-\pi/2$$

<u>Асимптотическая ЛАЧХ</u>

$\omega \ll \omega_c=1/T$ $\quad L(\omega)\approx 20\lg k$

$\omega \gg \omega_c=1/T$ $\quad L(\omega)\approx 20\lg k-20\lg\sqrt{\left(\omega^2T^2\right)^2+4\xi^2\omega^2T^2}\approx 20\lg k-40\lg\omega T$

<u>Асимптотическая ЛФЧХ</u>.

$$\theta(\omega)\to 0$$

$$\theta(\omega)\to -\pi$$

$x_{вх}(p) \rightarrow \boxed{T^2p^2+2\xi Tp+1} \rightarrow x_{вых}(p)$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Форсирующее звено 2-го порядка

$K(p)=\tau^2 p^2+2\xi\tau p+1$ $\qquad$ $\tau\ [c]$ – постоянная времени $\qquad$ $\left(\tau^2 p^2+2\xi\tau p+1\right)x_{вх}(p)=x_{вых}(p)$

Дифференциальное уравнение: $\tau^2\dfrac{d^2x_{вх}(t)}{dt^2}+2\xi\tau\dfrac{dx_{вх}(t)}{dt}+x_{вх}(t)=x_{вых}(t)$

Частотная характеристика: $K(j\omega)=1-\omega^2\tau^2+j2\xi\omega\tau=A(\omega)e^{j\theta(\omega)}$

АЧХ $\qquad A(\omega)=\left|K(j\omega)\right|=\sqrt{\left(1-\omega^2\tau^2\right)^2+4\xi^2\omega^2\tau^2}$

ФЧХ $\qquad \theta(\omega)=\arg\left[K(j\omega)\right]=arctg\dfrac{2\xi\omega\tau}{1-\omega^2\tau^2}$

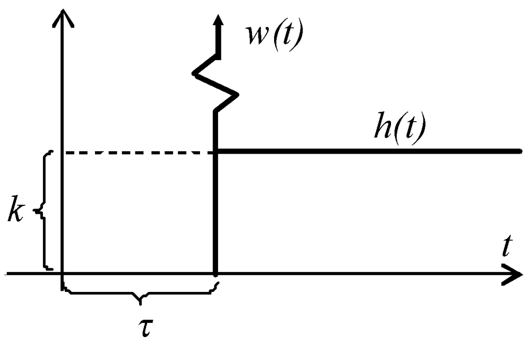
ЛАЧХ $\qquad L(\omega)=20\lg A(\omega)=20\lg\sqrt{\left(1-\omega^2\tau^2\right)^2+4\xi^2\omega^2\tau^2}$

ЛФЧХ $\qquad \theta(\omega)=arctg\dfrac{2\xi\omega\tau}{1-\omega^2\tau^2}$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Звено чистого (транспортного) запаздывания

Некоторые ОУ могут обладать запаздыванием (например, трубопроводы, длинные линии, транспортеры). Запаздывание проявляется в том, что при изменении входного воздействия выходная переменная начинает изменяться не сразу, а спустя некоторый промежуток времени τ, называемый временем *чистого* или *транспортного запаздывания*.



$$K(p) = ke^{-\tau p}$$

Переходная функция $h(t) = k1(t-\tau)$

Весовая функция $w(t) = k\delta(t-\tau)$

Частотная характеристика: $K(j\omega) = ke^{-j\tau\omega} = k(\cos\tau\omega - j\sin\tau\omega)$

АЧХ $A(\omega) = |K(j\omega)| = k$

ФЧХ $\theta(\omega) = \arg[K(j\omega)] = -\tau\omega$

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

ЛФЧХ $\theta(\omega) = -\tau\omega$

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Построение логарифмических характеристик последовательного соединения произвольных типовых звеньев

Пусть имеется произвольное последовательное соединение *n* типовых звеньев с результирующей ПФ

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n} W_i(p) \qquad (1)$$

По определению ЛАЧХ и ЛФЧХ вычисляются следующим образом:

$$L(\omega) = 20\lg|W(j\omega)| = 20\sum_{i=1}^{n}\lg|W_i(j\omega)| \qquad \theta(\omega) = \arg[W(j\omega)] = \sum_{i=1}^{n}\arg[W_i(j\omega)]$$

Таким образом, для построения ЛАЧХ или ЛФЧХ последовательного соединения звеньев следует построить соответствующие характеристики каждого звена, и затем геометрически их сложить.

Передаточную функцию (1) совокупности звеньев целесообразно представить в более развернутом виде:

$$W(p) = \frac{k_\nu}{p^\nu}\prod_{i=1}^{n}\overline{W}_i(p) = \frac{k_\nu}{p^\nu}\overline{W}(p) \qquad (2)$$

$\overline{W}(s)$ – *нормированная ПФ* – отношение произведений ПФ элементарных звеньев 1-го и 2-го порядков т. е., вида

$Tp \pm 1$ $\quad T^2p^2 \pm 2\xi Tp + 1$ при $0 \le \xi \le 1$ с единичным передаточным коэффициентом $\overline{W}(0) = 1$

k_ν – результирующий коэффициент передачи (усиления);

ν – порядок *астатизма* ПФ, численно равный количеству последовательно соединенных интеграторов в предположении, что чистые дифференцирующие звенья отсутствуют.

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Построение логарифмических характеристик последовательного соединения произвольных типовых звеньев

Пример. Построить асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ звена с ПФ

$$W(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{p(T_3 p + 1)(T_1^2 p^2 + T_1 p + 1)}$$

где значение коэффициента усиления и постоянных времени известны, и известно, что

$$1/k < T_1 < T_2 < T_3$$

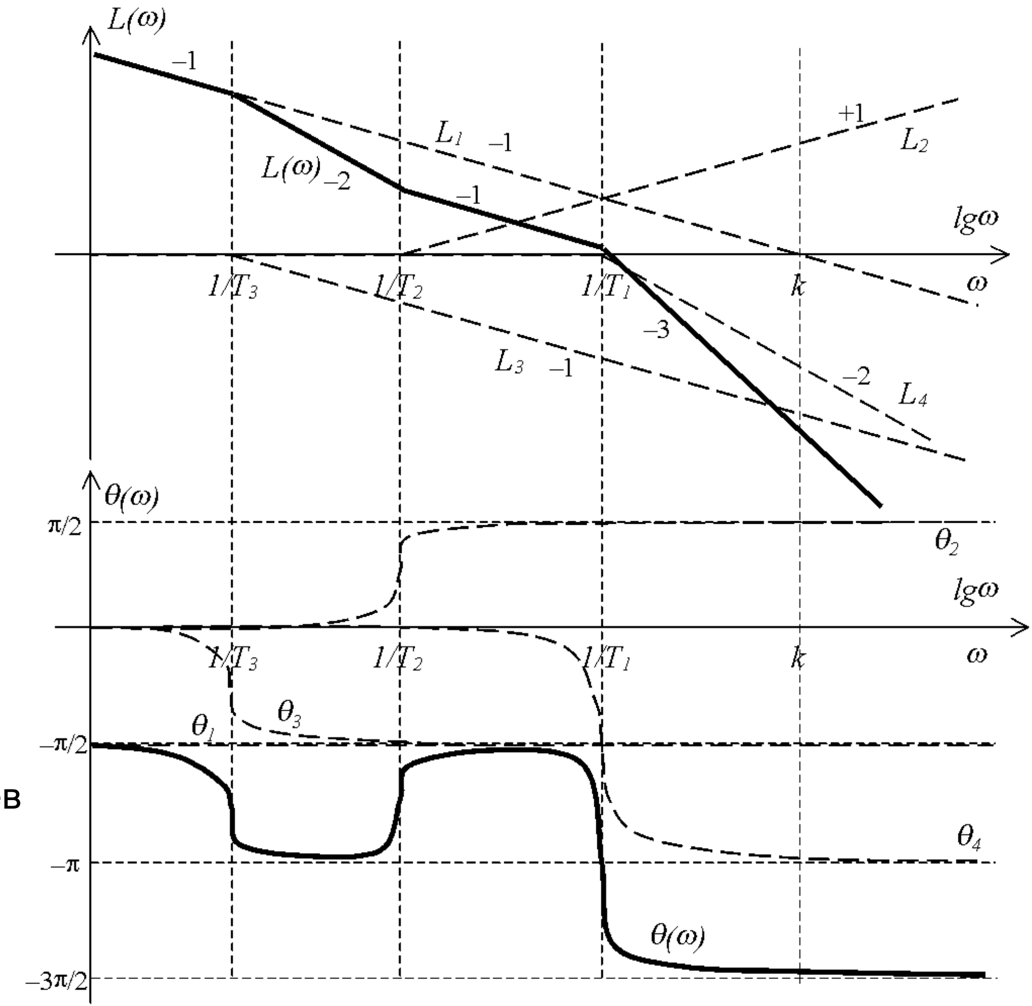
$$\overline{W}(p) = \frac{T_2 p + 1}{(T_3 p + 1)(T_1^2 p^2 + T_1 p + 1)} \qquad k_v = k \qquad v = 1$$

Очевидно, имеем последовательное соединение четырех типовых звеньев

$$W_1(p) = k/p \qquad W_2(p) = T_2 p + 1 \qquad W_3(p) = \frac{1}{T_3 p + 1}$$

$$W_4(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1} \qquad \xi = 0{,}5$$

Строим асимптотические ЛАЧХ каждого из звеньев (пунктирные линии) и их геометрическую сумму (сплошная линия), которая и является результирующей ЛАЧХ. Аналогично поступаем с ЛФЧХ.



ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Построение логарифмических характеристик последовательного соединения произвольных типовых звеньев

После анализа ЛАЧХ можно предложить следующее правило:

1) Пользуясь представлением (2) передаточной функции, вычисляют все частоты сопряжения $\omega_i = 1/T_i$ которые нумеруют в порядке возрастания и откладывают на оси частот;

2) Предварительную ЛАЧХ начинают строить от области низких частот, проводя прямую под наклоном $-\nu$ 20 дБ/дек ($-\nu$) так, чтобы она (или ее продолжение) пересекала ось частот при частоте $\omega_0 = \sqrt[\nu]{k_\nu}$

(Эта ЛАЧХ будет пересекать ось ординат в точке $20\lg k_\nu$

Именно такой вид будет иметь ЛАЧХ совокупности ν последовательно соединенных интеграторов, соответствующая первому множителю ПФ вида (2).

3) Низкочастотная ЛАЧХ будет претерпевать изломы только при частотах сопряжения ω_i причем наклон будет изменяться на 20 дБ/дек (+1), если i -м звеном оказывается форсирующее звено 1-го порядка,

на –20 дБ/дек (–1) – если апериодическое звено,

на +40 дБ/дек (+2) – если форсирующее звено 2-го порядка,

на –40 дБ/дек (–2) – если колебательное звено.

Что касается ЛФЧХ, то следует построить ЛФЧХ отдельных звеньев, и затем геометрически их просуммировать.

В случае наличия последовательно соединенного звена чистого запаздывания ЛАЧХ соединения остается без изменения, однако это звено окажет влияние на фазовый сдвиг.

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ

Построение логарифмических характеристик последовательного соединения произвольных типовых звеньев

Пример. Пользуясь правилом, построить ЛАЧХ соединения звеньев с ПФ:

$$W(p)=\frac{100}{p^2(0{,}01p+1)}$$

Очевидно, что здесь $\nu=2$, $k_\nu=100$, $T_1=0{,}01$.

Тогда $\omega_0=\sqrt{k_\nu}=10$, $\omega_1=1/T_1=100$. Проводим прямую под наклоном –2 (–40 дБ/дек), которая будет пересекать ось частот в точке ω_0. При $\omega=\omega_1$ ЛАЧХ изменит наклон на –1, поскольку ω_1 соответствует частоте сопряжения апериодического звена. Следовательно, при $\omega>\omega_1$ ЛАЧХ будет иметь наклон –3 (–2–1=–3).