МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е.АЛЕКСЕЕВА

Институт радиоэлектроники и информационных технологий

ОТЧЕТ

по лабораторной работе №2

«Исследование свойств типового звена W6»

по дисциплине

«Основы теории управления»

РУКОВОДИТЕЛЬ:

________________ _ Никулин.Е.А__

(подпись) (фамилия, и.,о.)

СТУДЕНТ:

________________ _ Сухоруков В.А.___

(подпись) (фамилия, и.,о.)

________________ _ Мосташов В.С.___

(подпись) (фамилия, и.,о.)

______19-ВМ_______

(шифр группы)

Работа защищена «___»____________

С оценкой ________________________

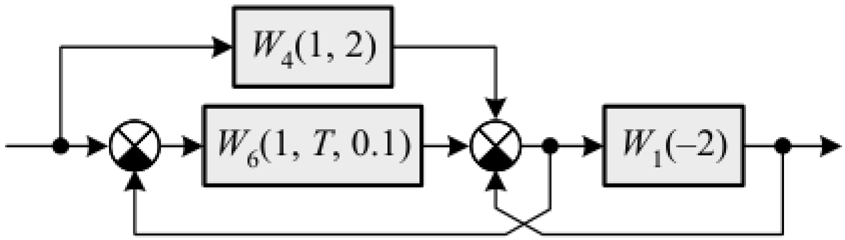
Нижний Новгород 2022

Цель работы

Исследовать все свойства типового звена W6, вывести и построить графики частотных и временных характеристик. Синтезировать схему на операционном усилителе.

Исходные данные

Вариант 6:



$$W_6(K, T, \xi) = \frac{K}{1 + 2\xi Ts + T^2 s^2}$$

$$W_6(1, T, 0.1) = \frac{1}{1 + 0.2Ts + T^2 s^2}$$

$$T = 1; \quad W_6(1,1,0.1) = \frac{1}{1 + 0.2s + s^2}$$

Ход работы

1 Вывод функционального уравнения

$$Y(s) = X(s) * W(s) = X(s) * \frac{B(s)}{A(s)} = X(s) * \frac{1}{1 + 0.2s + s^2}$$

$$Y(s) + 0.2s * Y(s) + s^2 * Y(s) = X(s)$$

Заменим s на $\frac{d}{dt}$.

$\underline{y(t) + 0.2 * y(t)' + y(t)'' = x(t)}$ – Дифференциальное уравнение второго порядка.

2 Вывод частотных характеристик

❖ **Комплексная частотная характеристика:**

$$\text{C}(\omega) = W(i\omega) = \frac{K}{1 + 2\xi Ti\omega + T^2 (i\omega)^2} = \frac{K}{1 + 2\xi Ti\omega - T^2\omega^2} =$$

$$= \frac{K(1 - T^2\omega^2 - 2\xi Ti\omega)}{(1 - T^2\omega^2 + 2\xi Ti\omega) * (1 - T^2\omega^2 - 2\xi Ti\omega)} = \frac{K(1 - T^2\omega^2 - 2\xi Ti\omega)}{(1 - T^2\omega^2)^2 - (2\xi Ti\omega)^2} =$$

$$= \frac{K(1 - T^2\omega^2 - 2\xi Ti\omega)}{1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2 T^2\omega^2} = \frac{K(1 - T^2\omega^2 - 2\xi Ti\omega)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} =$$

$$= \frac{K(1 - T^2\omega^2)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} - \frac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} * i$$

<u>При K=1, ξ =0.1</u>

$$\mathrm{C}(\omega) = \frac{1 - T^2\omega^2}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 0.04) + 1} - \frac{0.2T\omega}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 0.04) + 1} * i =$$
$$= \frac{1 - T^2\omega^2}{1 - 1.96 * T^2\omega^2 + T^4\omega^4} - \frac{0.2T\omega}{1 - 1.96 * T^2\omega^2 + T^4\omega^4} * i$$

- **Вещественная частотная характеристика:**

$$P(\omega) = Re\big(C(\omega)\big) = Re(\frac{K(1 - T^2\omega^2)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} -$$

$$- \frac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} * i) = \frac{K(1 - T^2\omega^2)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1}$$

<u>При K=1, ξ =0.1</u>

$$P(\omega) = \frac{K(1 - T^2\omega^{2)}}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} = \frac{1 - T^2\omega^2}{1 - 1.96 * T^2\omega^2 + T^4\omega^4}$$

Рассмотрим три разных значения параметра T:

- T1 = 1
- T2 = 0.1
- T3 = -1

$$P1(\omega) = \frac{1 - T1^2\omega^2}{1 - 1.96 * T1^2\omega^2 + T1^4\omega^4} = \frac{1 - \omega^2}{1 - 1.96 * \omega^2 + \omega^4}$$

$$P2(\omega) = \frac{1 - T2^2\omega^2}{1 - 1.96 * T2^2\omega^2 + T2^4\omega^4} = \frac{1 - 0.01\omega^2}{1 - 1.96 * 0.01\omega^2 + 0.0001\omega^4} =$$

$$= \frac{1 - 0.01\omega^2}{1 - 0.0196\omega^2 + 0.0001\omega^4}$$

$$P3(\omega) = \frac{1 - T3^2\omega^2}{1 - 1.96 * T3^2\omega^2 + T3^4\omega^4} = \frac{1 - \omega^2}{1 - 1.96\omega^2 + \omega^4}$$

$$\omega := 0, 0.01 \ldots 100$$

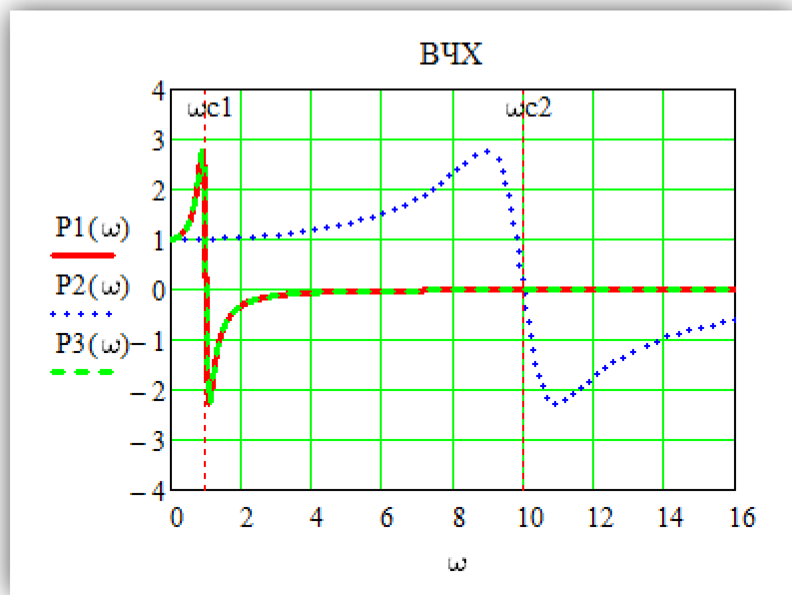


Рис 1.

$$\omega_{c1} = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{1} = 1 \qquad \omega_{c2} = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0.1} = 10$$

При уменьшении модуля параметра Т график вытягивается вдоль оси абсцисс. Изменение знака параметра Т на график не влияет.

❖ **Мнимая частотная характеристика:**

$$Q(\omega) = Im\big(C(\omega)\big) = Im\Big(\frac{K(1 - T^2\omega^2)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} -$$

$$- \frac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} * i\Big) = -\frac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1}$$

<u>При K=1, ξ =0.1</u>

$$Q(\omega) = -\frac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2 - 2 + 4\xi^2) + 1} = -\frac{0.2T\omega}{1 - 1.96 * T^2\omega^2 + T^4\omega^4}$$

$$Q1(\omega) = -\frac{0.2T1\omega}{1 - 1.96 * T1^2\omega^2 + T1^4\omega^4} = -\frac{0.2\omega}{1 - 1.96 * \omega^2 + \omega^4}$$

$$Q2(\omega) = -\frac{0.2T2\omega}{1 - 1.96 * T2^2\omega^2 + T2^4\omega^4} = -\frac{0.02\omega}{1 - 0.0196\omega^2 + 0.0001\omega^4}$$

$$Q3(\omega) = -\frac{0.2T3\omega}{1 - 1.96 * T3^2\omega^2 + T3^4\omega^4} = \frac{0.2\omega}{1 - 1.96 * \omega^2 + \omega^4}$$

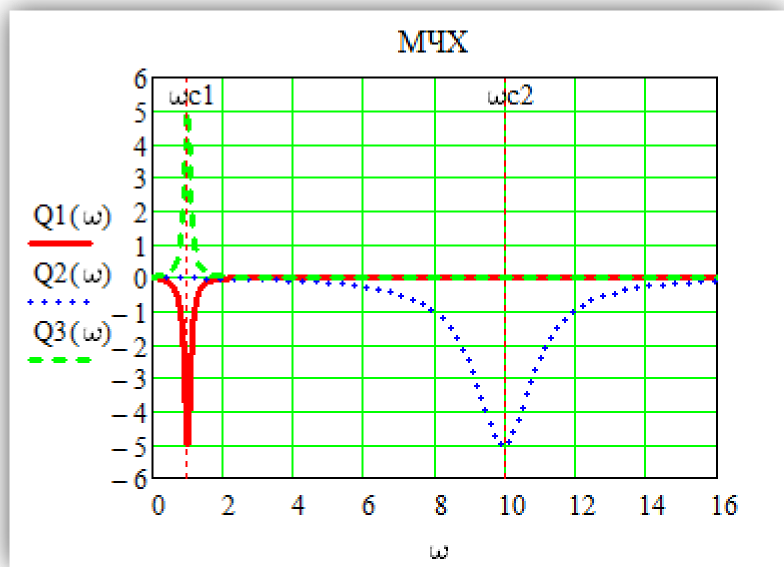


Рис 2.

При уменьшении модуля параметра T график вытягивается вдоль оси абсцисс. При изменении знака параметра T график отражается относительно оси абсцисс.

❖ **Амплитудная частотная характеристика:**

$$A(\omega) = |C(\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} =$$

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

$$= \sqrt{\frac{K^2(1 - T^2\omega^2)^2 + (2\xi T\omega K)^2}{(1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2T^2\omega^2)^2}} = \sqrt{\frac{K^2(1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4) + 4\xi^2T^2\omega^2K^2}{(1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2T^2\omega^2)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{K^2(1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2T^2\omega^2)}{(1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2T^2\omega^2)^2}} = \sqrt{\frac{K^2}{1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2T^2\omega^2}} =$$

$$= \frac{|K|}{\sqrt{1 - 2T^2\omega^2 + T^4\omega^4 + 4\xi^2T^2\omega^2}} = \frac{|K|}{\sqrt{T^2\omega^2(4\xi^2 + T^2\omega^2 - 2) + 1}}$$

При $K=1$, $\xi=0.1$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T^2\omega^2(0.04 + T^2\omega^2 - 2) + 1}} = \frac{1}{\sqrt{T^2\omega^2(-1.96 + T^2\omega^2) + 1}}$$

$$A1(\omega)=\frac{1}{\sqrt{T1^2\omega^2(-1.96+T1^2\omega^2)+1}}=\frac{1}{\sqrt{\omega^2(-1.96+\omega^2)+1}}$$

$$A2(\omega)=\frac{1}{\sqrt{T2^2\omega^2(-1.96+T2^2\omega^2)+1}}=\frac{1}{\sqrt{0.01\omega^2(-1.96+0.01\omega^2)+1}}$$

$$A3(\omega)=\frac{1}{\sqrt{T3^2\omega^2(-1.96+T3^2\omega^2)+1}}=\frac{1}{\sqrt{\omega^2(-1.96+\omega^2)+1}}$$

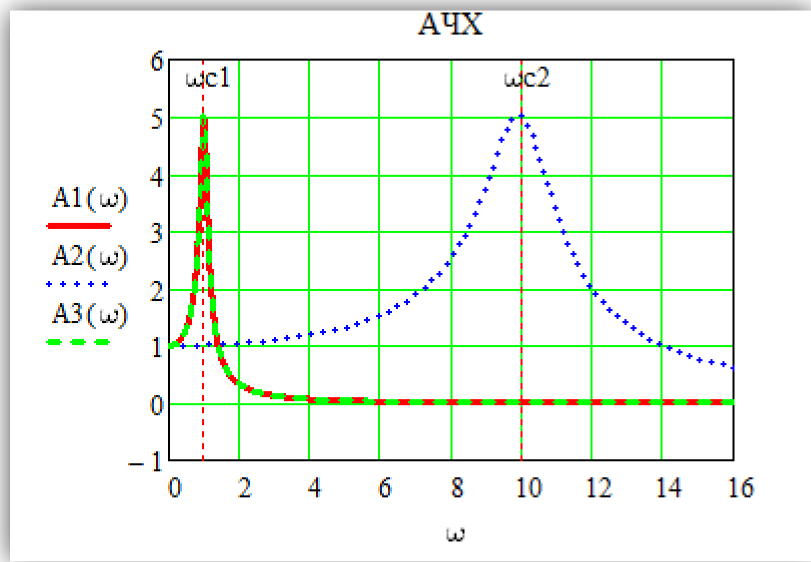


Рис 3.

При уменьшении модуля параметра T график вытягивается вдоль оси абсцисс. Изменение знака параметра T на график не влияет.

❖ **Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика:**

$$L(\omega)=20\log\big(A(\omega)\big)=20\log\left(\frac{|K|}{\sqrt{T^2\omega^2(4\xi^2+T^2\omega^2-2)+1}}\right)=$$

$$=20log(|K|)-10log(T^2\omega^2(4\xi^2+T^2\omega^2-2)+1)$$

При K=1, ξ =0.1

$$L(\omega)=20log(|1|)-10log(T^2\omega^2(0.04+T^2\omega^2-2)+1)=$$

$$=-10log(T^2\omega^2(-1.96+T^2\omega^2)+1)$$

$$L1(\omega)=-10log(T1^2\omega^2(-1.96+T1^2\omega^2)+1)=-10log(\omega^2(-1.96+\omega^2)+1)$$

$$L2(\omega)=-10log(T2^2\omega^2(-1.96+T2^2\omega^2)+1)=-10log(0.01\omega^2(-1.96+0.01\omega^2)+1)$$

$$L3(\omega)=-10log(T3^2\omega^2(-1.96+T3^2\omega^2)+1)=-10log(\omega^2(-1.96+\omega^2)+1)$$

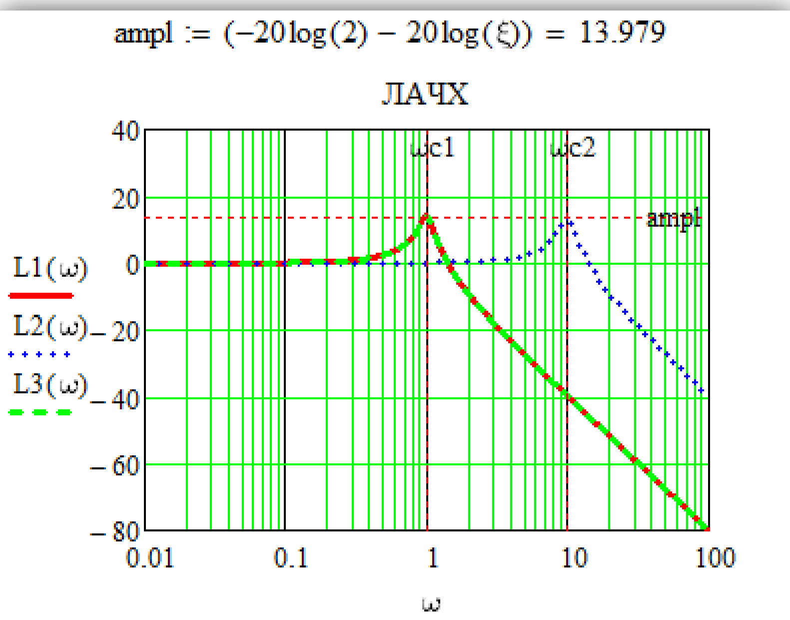


Рис 4.

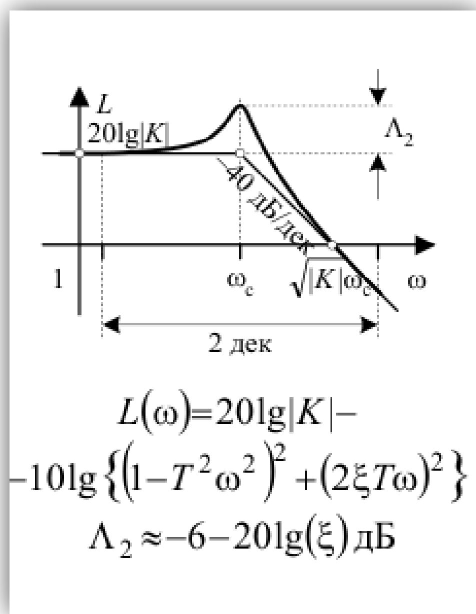


Рис 5.

При уменьшении модуля параметра T график сдвигается вправо относительно оси абсцисс. Изменение знака параметра T на график не влияет.

Проверим правильность построения графика по таблице «Приложение 1. Частотные и временные характеристики типовых звеньев» (Рис 5).

1. $20\lg(|K|) = 20\lg(1) = 0$
2. Изменение амплитуды при $\omega_c = \frac{1}{T}$ равно $-6 - 20\log(\xi)$
3. При изменении частоты от $\omega_1 = \frac{\omega_c}{10}$ до $\omega_2 = \omega_c * 10$ амплитуда колебания уменьшается на 20 дБ.

График построен верно.

❖ **Логарифмическая фазо-частотная характеристика:**

$$\Phi(\omega) = arctg(C(\omega)) = arctg\left(\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}\right) =$$

$$= \begin{cases} arctg\left(-\dfrac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2-2+4\xi^2)+1} : \dfrac{K(1-T^2\omega^2)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2-2+4\xi^2)+1}\right) \text{ при } K>0 \\ arctg\left(-\dfrac{2\xi T\omega K}{T^2\omega^2(T^2\omega^2-2+4\xi^2)+1} : \dfrac{K(1-T^2\omega^2)}{T^2\omega^2(T^2\omega^2-2+4\xi^2)+1}\right) \pm 180\,° \text{при } K<0 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} arctg\left(-\dfrac{2\xi T\omega K}{K(1-T^2\omega^2)}\right) \text{ при } K>0 \\ arctg\left(-\dfrac{2\xi T\omega K}{K(1-T^2\omega^2)}\right) \pm 180\,° \text{при } K<0 \end{cases} =$$

$$= \begin{cases} -arctg\left(\dfrac{2\xi T\omega}{1-T^2\omega^2}\right) \text{ при } K>0 \\ -arctg\left(\dfrac{2\xi T\omega}{1-T^2\omega^2}\right) \pm 180\,° \text{при } K<0 \end{cases}$$

<u>При K=1, ξ =0.1</u>

$$\Phi(\omega) = -arctg\left(\frac{2\xi T\omega}{1-T^2\omega^2}\right) = -arctg\left(\frac{0.2T\omega}{1-T^2\omega^2}\right)$$

$$\Phi1(\omega) = -arctg\left(\frac{0.2T1\omega}{1-T1^2\omega^2}\right) = -arctg\left(\frac{0.2\omega}{1-\omega^2}\right)$$

$$\Phi2(\omega) = -arctg\left(\frac{0.2T2\omega}{1-T2^2\omega^2}\right) = -arctg\left(\frac{0.02\omega}{1-0.01\omega^2}\right)$$

$$\Phi3(\omega) = -arctg\left(\frac{0.2T3\omega}{1-T3^2\omega^2}\right) = -arctg\left(\frac{-0.2\omega}{1-\omega^2}\right)$$

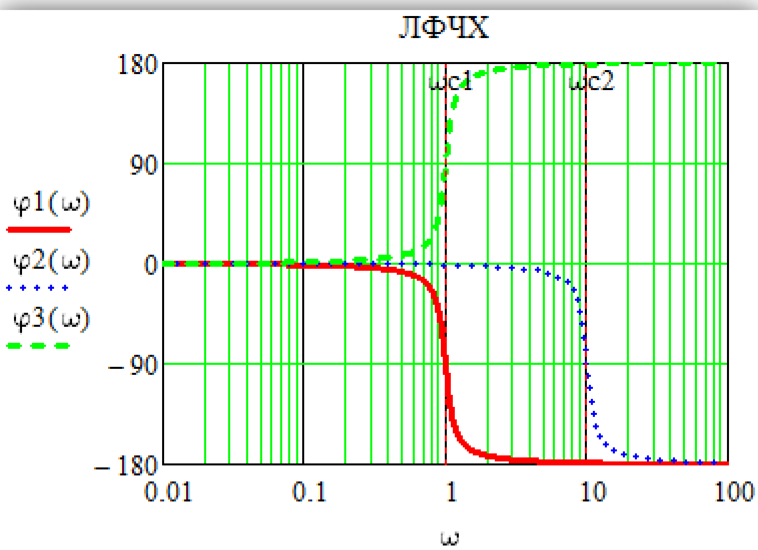


Рис 6.

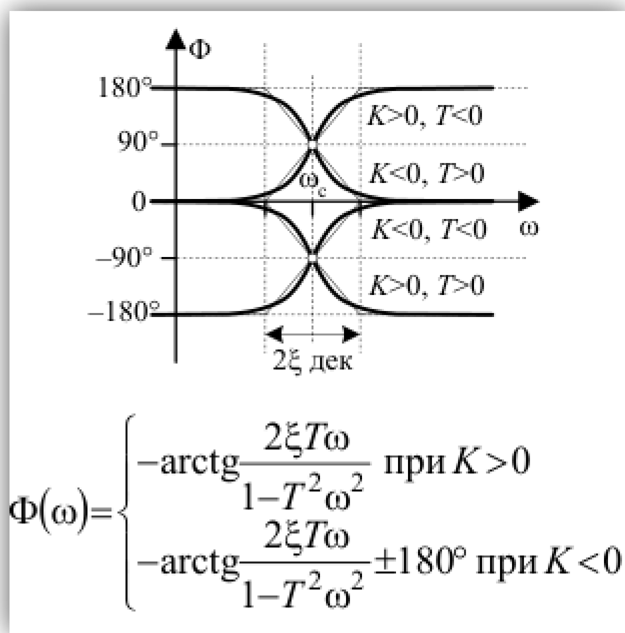


Рис 7.

При уменьшении модуля параметра T график смещается вдоль оси абсцисс. Изменение знака параметра T приводит к отражению графика относительно оси абсцисс.

Проверим правильность построения графика по таблице <u>«Приложение 1. Частотные и временные характеристики типовых звеньев»</u> (Рис 7).

График построен верно.

❖ **Годограф:**

$$Q1(\omega) = -\frac{0.2\omega}{1 - 1.96 * \omega^2 + \omega^4} \qquad P1(\omega) = \frac{1 - \omega^2}{1 - 1.96 * \omega^2 + \omega^4}$$

$$Q2(\omega) = -\frac{0.02\omega}{1 - 0.0196\omega^2 + 0.0001\omega^4} \qquad P2(\omega) = \frac{1 - 0.01\omega^2}{1 - 0.0196\omega^2 + 0.0001\omega^4}$$

$$Q3(\omega) = \frac{0.2\omega}{1 - 1.96 * \omega^2 + \omega^4} \qquad P3(\omega) = \frac{1 - \omega^2}{1 - 1.96\omega^2 + \omega^4}$$

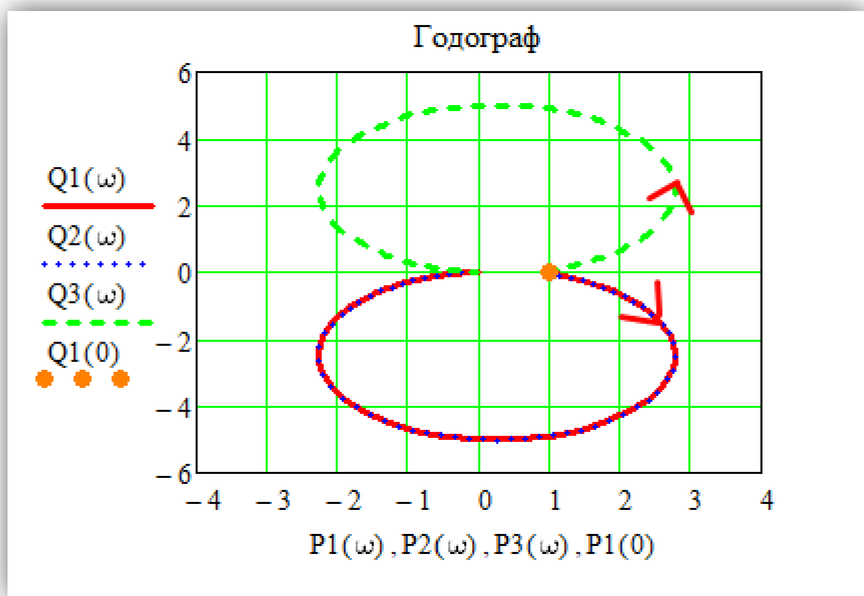


Рис 8.

Уменьшение модуля параметра T не влияет на график. Изменение знака параметра T приводит к отражению графика относительно оси абсцисс.

3 Вывод временных характеристик

❖ **Импульсная характеристика:**

$$w(t) = L^{-1}(W(s)) = L^{-1}\left(\frac{K}{1 + 2\xi Ts + T^2s^2}\right) = K * L^{-1}\left(\frac{1}{1 + 2\xi Ts + T^2s^2}\right)$$

По таблице обратного преобразования Лапласа, изображение $F(s) = \frac{1}{1+2\xi Ts+T^2s^2}$ соответствует оригиналу $f(t) = Ce^{-\beta t}\sin(\omega t)$, где

$$C = \frac{1}{\omega T^2}; \quad \beta = \frac{\xi}{T}; \quad \omega T = \sqrt{1 - \xi^2}$$

$$w(t) = \frac{K}{\omega T^2} * e^{-\frac{\xi t}{T}} * \sin(\omega t)$$

<u>При K=1, ξ =0.1</u>

$$w(t) = \frac{1}{\omega T^2} * e^{-\frac{0.1t}{T}} * \sin(\omega t) \qquad \omega T = \sqrt{1-\xi^2}$$

$$w1(t) = \frac{1}{\omega T1^2} * e^{-\frac{0.1t}{T1}} * \sin(\omega t) = \frac{1}{\omega} * e^{-0.1t} * \sin(\omega t) = \frac{e^{-0.1t}}{\sqrt{0.99}} * \sin\left(\frac{t}{\sqrt{0.99}}\right)$$

$$w2(t) = \frac{1}{\omega T2^2} * e^{-\frac{0.1t}{T2}} * \sin(\omega t) = \frac{100}{\omega} * e^{-t} * \sin(\omega t) = \frac{10e^{-t}}{\sqrt{0.99}} * \sin\left(\frac{0.1t}{\sqrt{0.99}}\right)$$

$$w3(t) = \frac{1}{\omega T3^2} * e^{-\frac{0.1t}{T3}} * \sin(\omega t) = \frac{1}{\omega} * e^{0.1t} * \sin(\omega t) = \frac{-e^{0.1t}}{\sqrt{0.99}} * \sin\left(\frac{-t}{\sqrt{0.99}}\right)$$

$w01 := \lim_{t \to 0} w1(t) \to 0$ $\quad wy1 := \lim_{t \to \infty} w1(t) \to 0.0$ $\quad w02 := \lim_{t \to 0} w2(t) \to 0$ $\quad wy2 := \lim_{t \to \infty} w2(t) \to 0.0$

$\Delta 1 := |wy1 - w01| \cdot 5\%$ float, 3 $\to 0.0$ $\quad \Delta 2 := |wy2 - w02| \cdot 5\%$ float, 3 $\to 0.0$

$ty1 := \frac{3T1}{\xi}$ float, 3 $\to 30.0$ $\quad ty2 := \frac{3T2}{\xi}$ float, 3 $\to 3.0$

$w1(t) := w1(t) \cdot \Phi(t)$

$w2(t) := w2(t) \cdot \Phi(t)$

$w3(t) := w3(t) \cdot \Phi(t)$

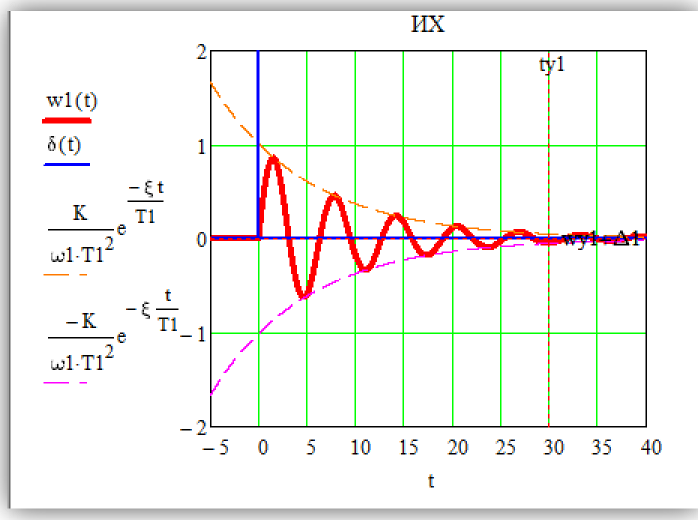


Рис 9.

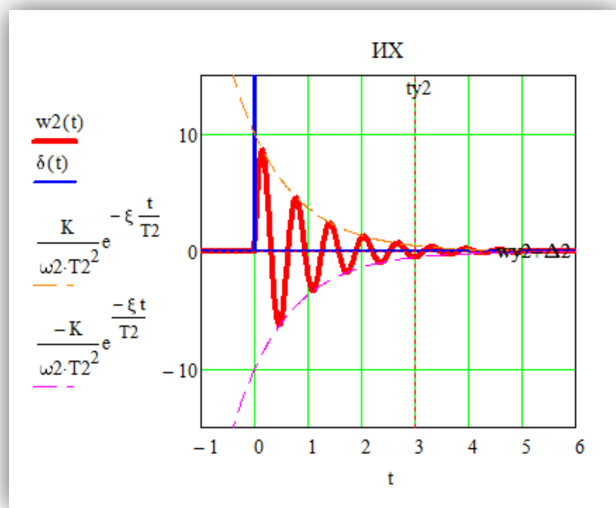


Рис 10.

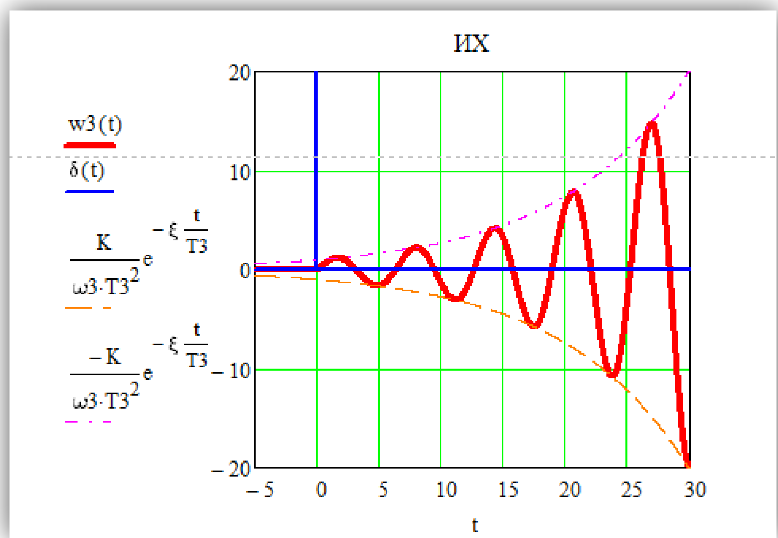


Рис 11.

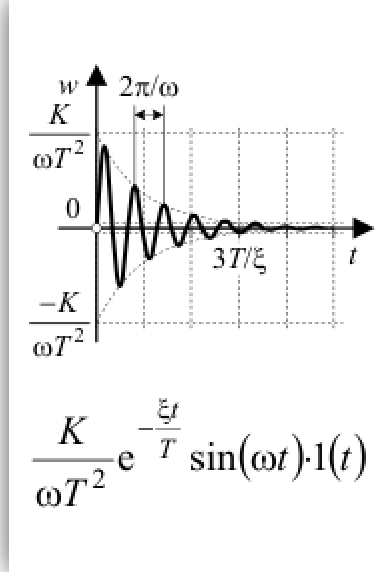


Рис 12.

При уменьшении модуля параметра T, график вытягивается вдоль оси ординат и сжимается вдоль оси абсцисс. Изменение знака параметра T, приводит к расходимости графика.

Проверим правильность построения графика по таблице «Приложение 1. Частотные и временные характеристики типовых звеньев» (Рис 12). График построен верно.

❖ **Переходная характеристика:**

$$h(t) = L^{-1}\left(\frac{W(s)}{s}\right) = L^{-1}\left(\frac{K}{s(1 + 2\xi T s + T^2 s^2)}\right) =$$

$$= K * L^{-1}\left(\frac{1}{s(1 + 2\xi T s + T^2 s^2)}\right)$$

По таблице обратного преобразования Лапласа, изображение $F(s) = \frac{1}{s(1+2\xi T s+T^2 s^2)}$ соответствует оригиналу $f(t) = 1 - Ce^{-\beta t}\sin(\omega t + \varphi)$, где

$$C = \frac{1}{\omega T}\ ; \quad \beta = \frac{\xi}{T}\ ; \quad \omega T = \sqrt{1 - \xi^2};\ \varphi = arctg\left(\frac{\omega}{\beta}\right) = arctg\left(\frac{\omega T}{\xi}\right) =$$

$$= arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}\right)$$

$$h(t) = K\left(1 - \frac{e^{-\frac{\xi}{T}t}}{\omega \mathrm{T}}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}\right)\right)\right)$$

При K=1, ξ =0.1

$$h(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{0.1}{T}t}}{\omega T}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right)$$

$$h1(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{0.1}{T1}t}}{\omega T1}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right) = 1 - \frac{e^{-0.1t}}{\sqrt{0.99}}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right)$$

$$h2(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{0.1}{T2}t}}{\omega T2}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right) = 1 - \frac{10e^{-t}}{\sqrt{0.99}}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right)$$

$$h3(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{0.1}{T3}t}}{\omega T3}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right) = 1 + \frac{e^{0.1t}}{\sqrt{0.99}}\sin\left(\omega t + arctg\left(\frac{\sqrt{0.99}}{0.1}\right)\right)$$

$h1(t) := h1(t)\cdot\Phi(t)$

$h2(t) := h2(t)\cdot\Phi(t)$

$h3(t) := h3(t)\cdot\Phi(t)$

$ty1 := \frac{3T1}{\xi}\ \text{float},3 \ \rightarrow 30.0$ $\qquad ty2 := \frac{3T2}{\xi}\ \text{float},3 \ \rightarrow 3.0$

$h01 := \lim_{t \to 0} h1(t) \rightarrow 0$ $\quad hy1 := \lim_{t \to \infty} h1(t) \rightarrow 1.0$ $\quad h02 := \lim_{t \to 0} h2(t) \rightarrow 0$ $\quad hy2 := \lim_{t \to \infty} h2(t) \rightarrow 1.0$

$\Delta 1h := |hy1 - h01| \cdot 5\%\ \text{float},3 \ \rightarrow 0.05$ $\qquad \Delta 2h := |hy2 - h02| \cdot 5\%\ \text{float},3 \ \rightarrow 0.05$

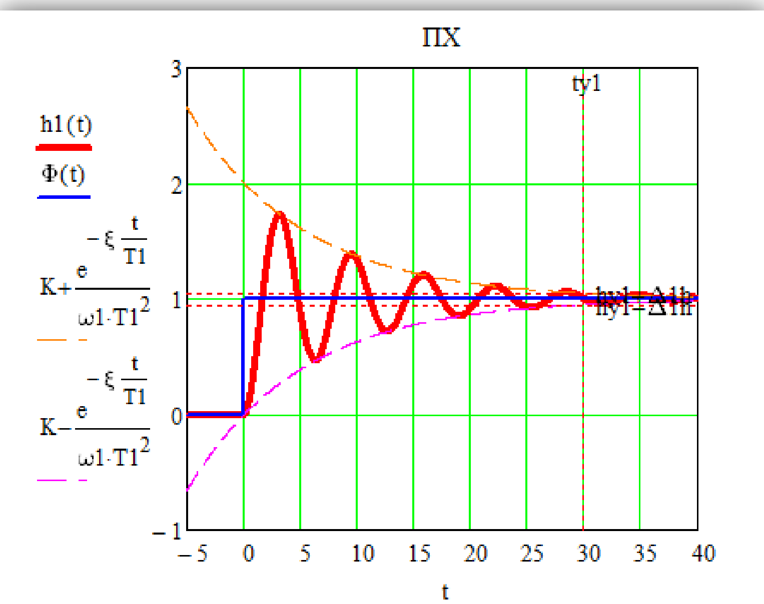


Рис 13.

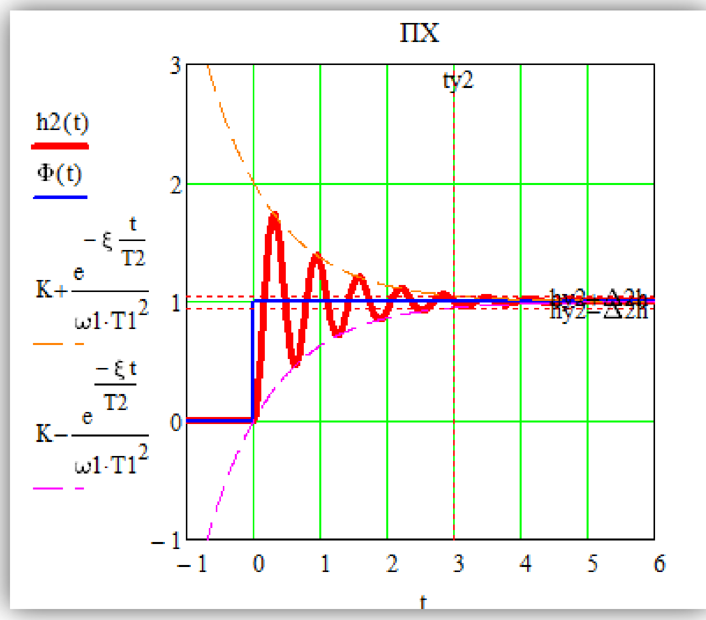


Рис 14.

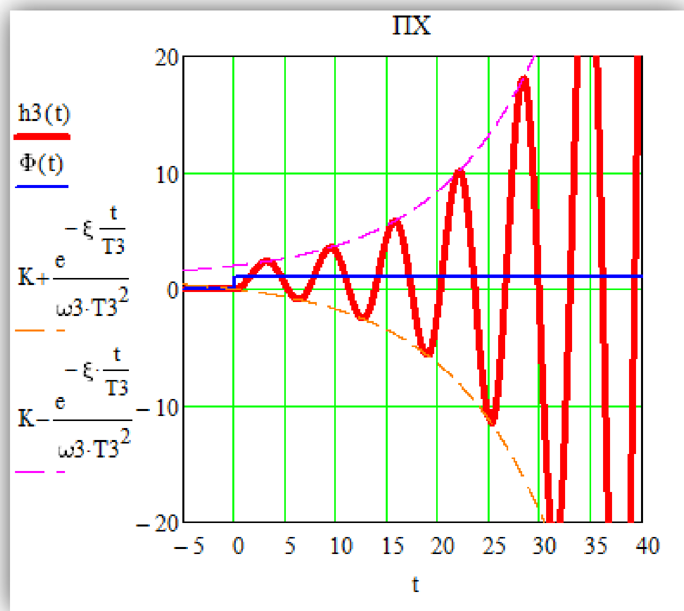


Рис 15.

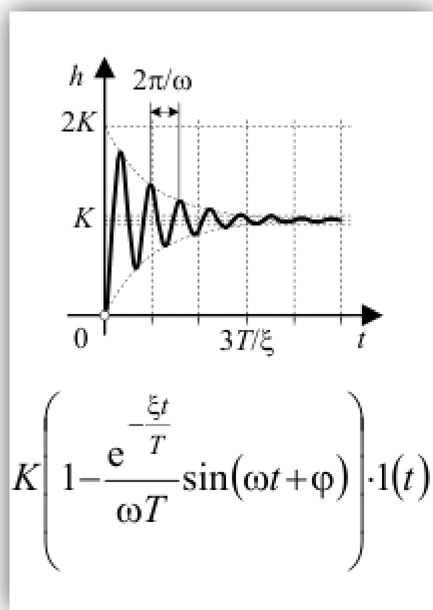


Рис 16.

При уменьшении параметра T, график сжимается вдоль оси абсцисс. Изменение знака параметра T, приводит к расходимости графика.

Проверим правильность построения графика по таблице «Приложение 1. Частотные и временные характеристики типовых звеньев» (Рис 16). График построен верно.

4 Синтез схемы на операционном усилителе

Передаточная функция:

$$W_6(1,1,0.1) = \frac{1}{1 + 0.2s + s^2}$$

Вычислим суммы коэффициентов усиления по прямому и инверсному входам

$$S_1(s) = \frac{1}{1 + 0.2s + s^2} \qquad S_2(s) = 0$$

Условие баланса:

$$S_1(s) = S_2(s) + 1$$

$$\frac{1}{1 + 0.2s + s^2} \neq 0 + 1$$

Условие баланса не выполняется, значит нужно подобрать передаточные функции $W_{10}(s)$ и $W_{20}(s)$ с положительными коэффициентами, удовлетворяющие условию
$S_1(s) + W_{10}(s) = S_2(s) + 1 + W_{20}(s)$

$$\frac{1}{1 + 0.2s + s^2} + W_{10}(s) = 1 + W_{20}(s)$$

Для оптимальной схемы (в целях экономии элементов) предположим $W_{20}(s) = 0$.

$$W_{10}(s) = 1 - \frac{1}{1 + 0.2s + s^2} = \frac{0.2s + s^2}{1 + 0.2s + s^2}$$

Полиномы числителя и знаменателя с положительными коэффициентами, следовательно, предположение верно и $W_{20}(s) = 0$.

Эскизная схема имеет вид:

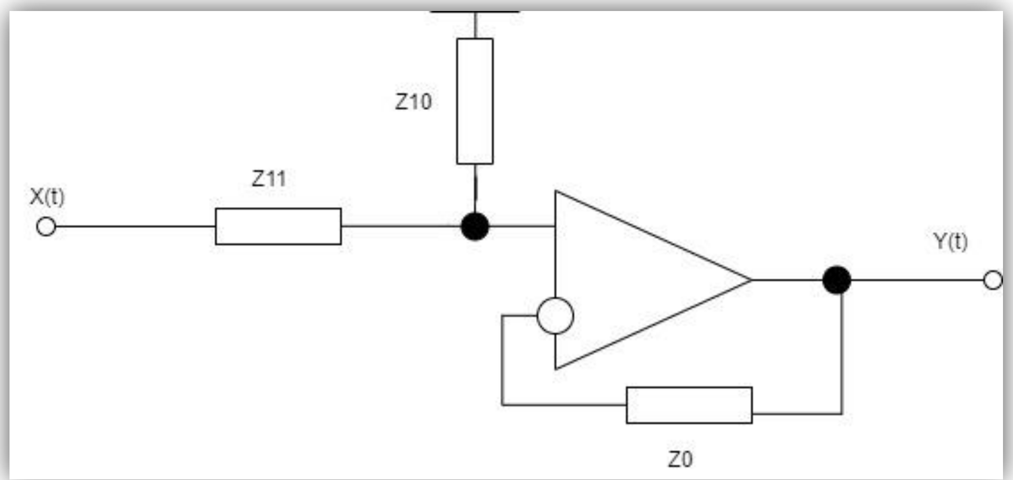


Рис 17.

Для инверсного входа:

$$W_0 * \mathrm{Z}_0 = const$$

$$1 * \mathrm{Z}_0 = const$$

1.В качестве константы можно взять любое неотрицательное число. Возьмем константу равную нулю, тогда сопротивление $\mathrm{Z}_0 = 0$ Ом.

2. Z_0 можно заменить проводом, поскольку входное сопротивление <u>*идеального*</u> ОУ бесконечно велико, и входной ток равен нулю.

Для прямого входа:

$$W_{10} * \mathrm{Z}_{10} = W_{11} * \mathrm{Z}_{11} = const$$

$$\frac{0.2s + s^2}{1 + 0.2s + s^2} * \mathrm{Z}_{10} = \frac{1}{1 + 0.2s + s^2} * \mathrm{Z}_{11} = const$$

$$(0.2s + s^2) * \mathrm{Z}_{10} = \mathrm{Z}_{11} = const$$

$$s(0.2 + s) * \mathrm{Z}_{10} = \mathrm{Z}_{11}$$

Возьмём Z_{10} равное сопративлению конденсатора $= \frac{1}{C_{10} * s}$, так как при таком выборе в уравнении сократится s.

$$\mathrm{Z}_{11} = \frac{s(0.2 + s)}{C_{10} * s} = \frac{(0.2 + s)}{C_{10}}$$

Последовательное соединение резистора и индуктивности равно R+Ls. Сопротивление индуктивности равно Ls.

$$Z_{11} = \frac{(0.2+s)}{C_{10}} = \frac{0.2}{C_{10}} + \frac{s}{C_{10}} = R_{11} + L_{11}$$

$$R_{11} = \frac{0.2}{c_0} \quad L_{11} = \frac{1}{c_0}$$

Возьмем $C_{10} = 10$мкФ, тогда $R_{11} = 20$ КОм, $L_{11} = 100$КГн.

Итоговая схема имеет вид:

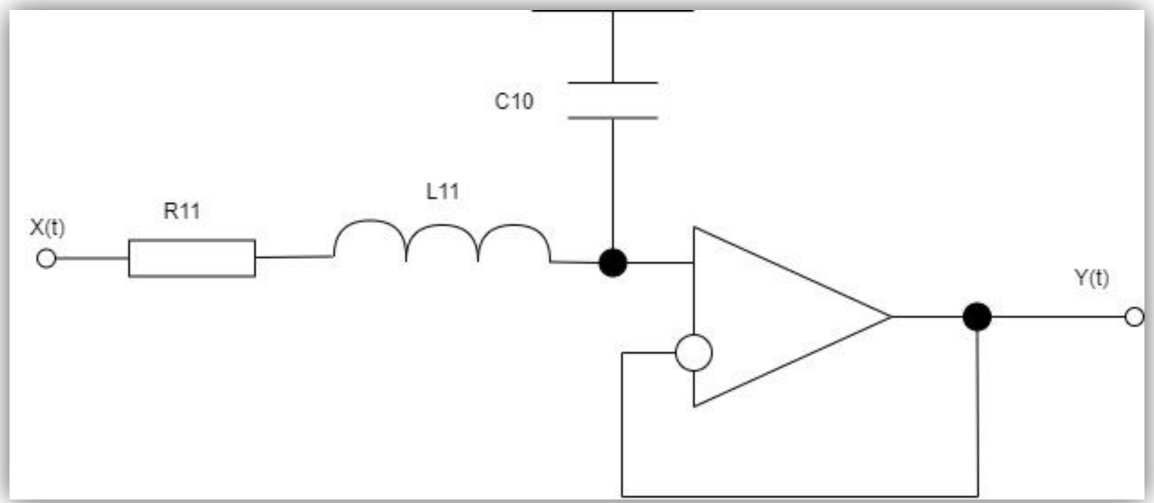
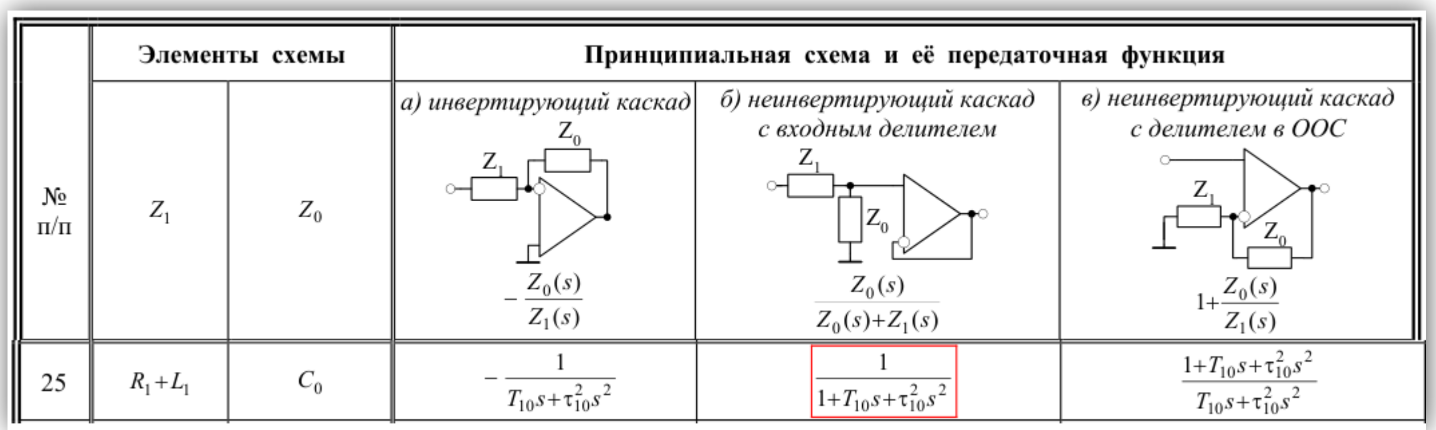


Рис 18.

Проверим правильность построения схемы по таблице «Приложение 2. Схемы каскадов на ОУ» (Рис 19). Схема соответствует строке 25, столбцу б.



№ п/п	Элементы схемы		Принципиальная схема и её передаточная функция		
	Z_1	Z_0	*а) инвертирующий каскад* $-\frac{Z_0(s)}{Z_1(s)}$	*б) неинвертирующий каскад с входным делителем* $\frac{Z_0(s)}{Z_0(s)+Z_1(s)}$	*в) неинвертирующий каскад с делителем в ООС* $1+\frac{Z_0(s)}{Z_1(s)}$
25	R_1+L_1	C_0	$-\frac{1}{T_{10}s+\tau_{10}^2 s^2}$	$\frac{1}{1+T_{10}s+\tau_{10}^2 s^2}$	$\frac{1+T_{10}s+\tau_{10}^2 s^2}{T_{10}s+\tau_{10}^2 s^2}$

Рис 19.

5 Использование программы WorkBench

5.1 Синтез и сборка схемы моделирования на ОУ в EWB

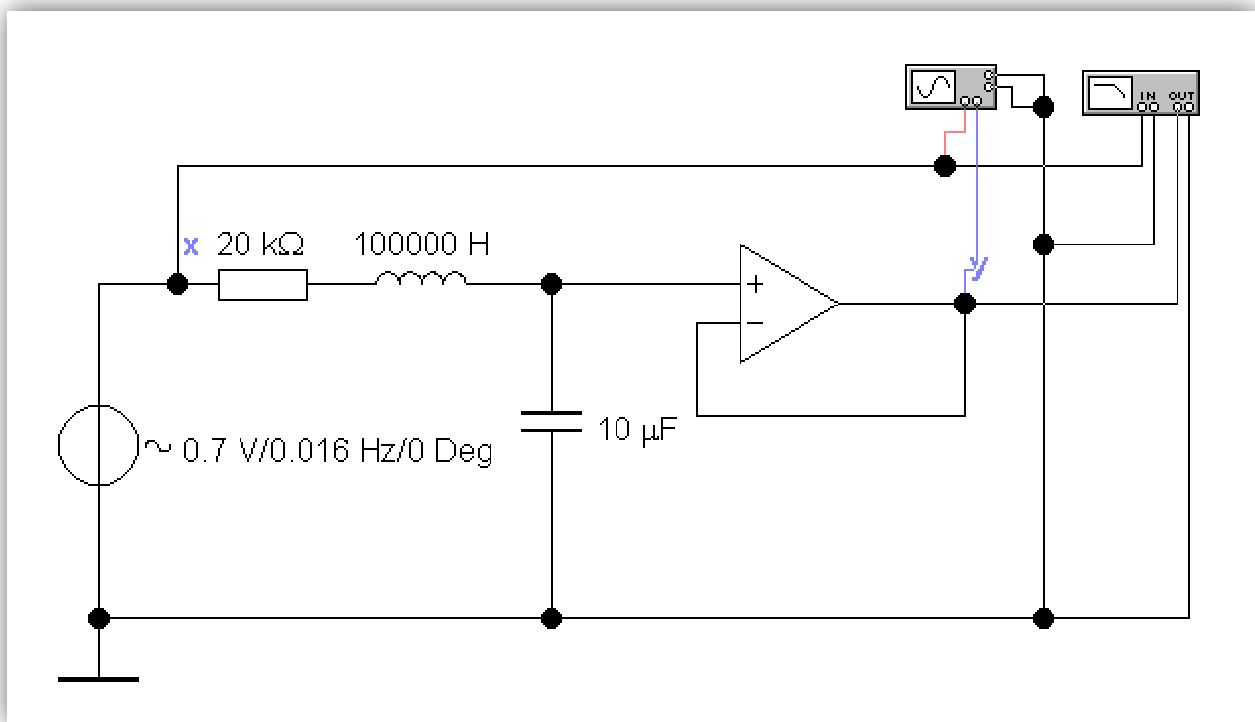


Рис 20.

5.2 Исследование частотных характеристик

Заполним таблицу значений логарифмического усиления L, линейного усиления A и фазового сдвига φ для средних, низких и высоких частот.

Частота сопряжения $\omega_c = \frac{1}{T} = \frac{1}{1} = 1\,\frac{\text{рад}}{\text{с}} = \frac{1}{2\pi}$ ГЦ≈0,16 ГЦ=f_{cp} - это средняя частота. $T_\text{к} = 2\pi T \approx 6{,}24$ сек

Низкая частота $f_\text{н} = 0{,}1 * f_\text{ср}$ ≈0,016 ГЦ. $T_\text{к} =\approx 62{,}4$ сек

Высокая частота $f_\text{в} = 10 * f_\text{ср}$ ≈1,6 ГЦ. $T_\text{к} =\approx 0{,}624$ сек

Для этого на генераторе гармонических колебаний установим

- ❖ амплитуду Ax=1B,
- ❖ значение напряжения установим равное значению действующего напряжения = Ax/√2=0.7 Ax,
- ❖ фазу сигнала равную 0°

и поочередно будем менять значение частоты.

На осциллографе строятся графики входного $x(t) = A_x sin(2\pi f t)$ и выходного $y(t) = A_y sin(2\pi f t + \varphi)$, по которым в установившемся режиме измеряются амплитуда A_y, фазовый сдвиг φ, и вычисляется коэффициент усиления $A = A_y / A_x$.

Время установления $ty = 3T/\xi$ =30 (с).

Приведем графики для 3 частот с измерениями после времени установления.

❖ **<u>Низкая частота</u>**

- Общий график

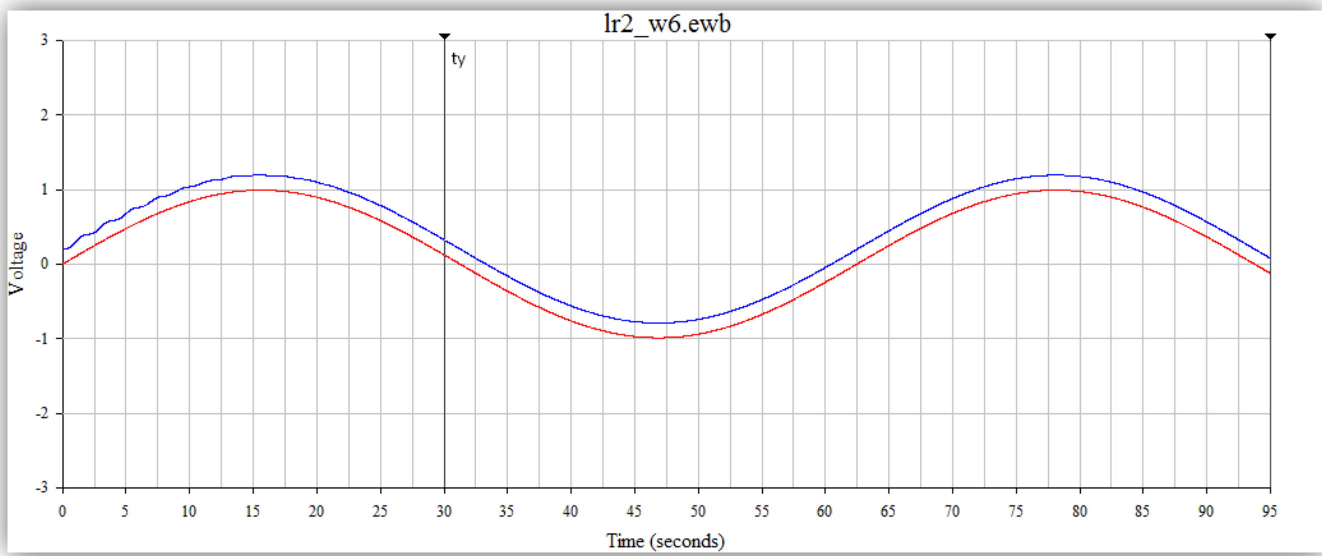


Рис 21.

- Моменты времени, когда x(t)=0 и y(t)=0

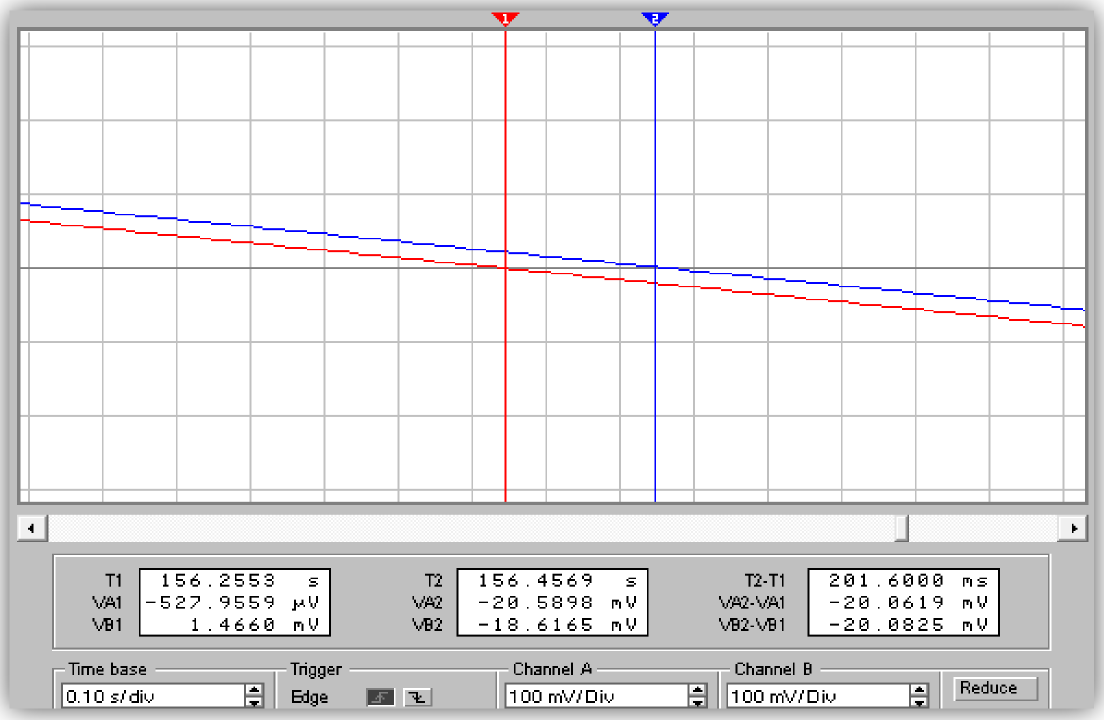


Рис 22.

- Моменты времени, когда x(t)=Ax и y(t)=Ay

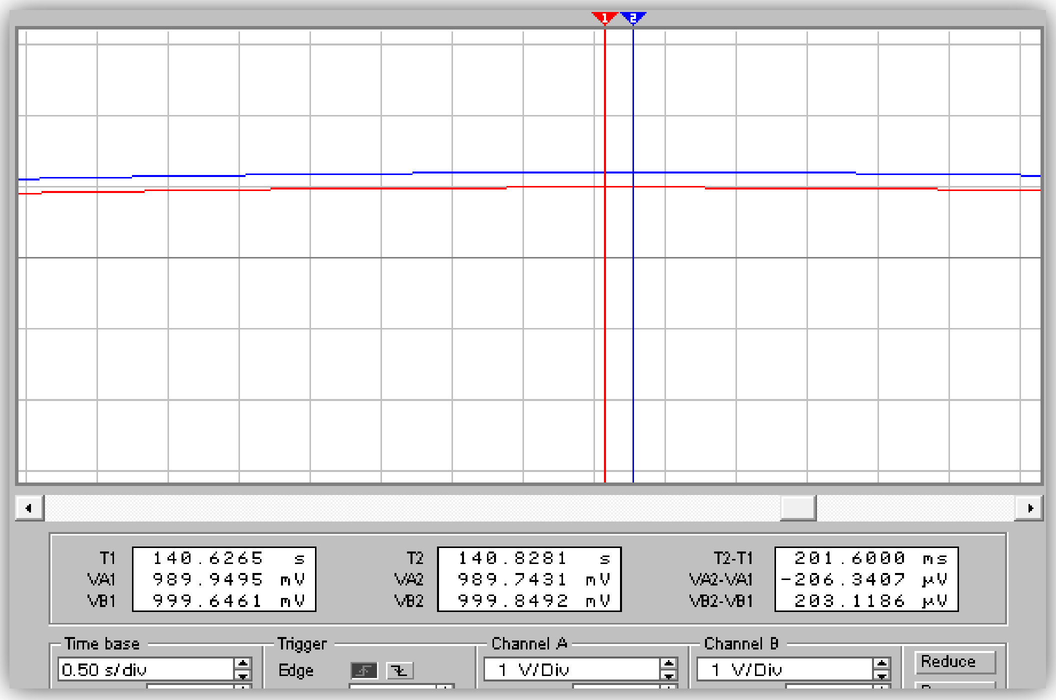


Рис 23.

$$A = \frac{A_y}{A_x} = \frac{999.8492\,mV}{989.9495\,mV} \approx 1.01$$

$\Delta t = 0{,}202$ сек $\qquad \varphi = -\Delta t * f * 360° \approx -1.16°$

$L = 20\lg(A) \approx 0.086$ дБ

❖ **<u>Средняя частота</u>**

- Общий график

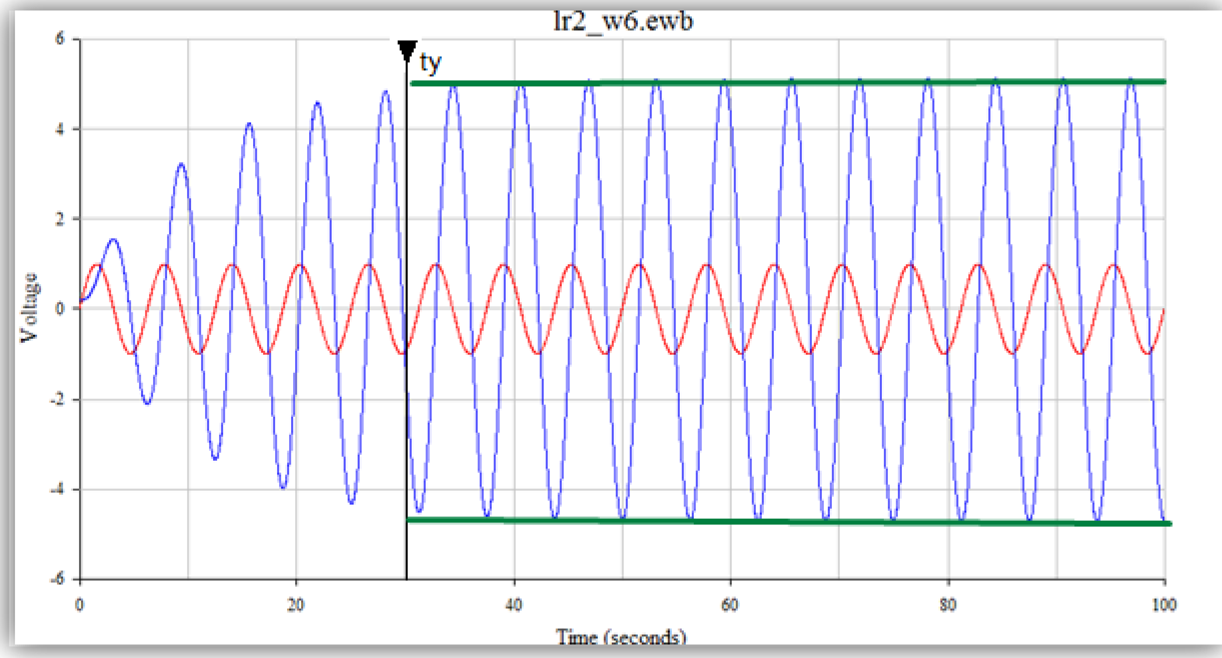


Рис 24.

- Моменты времени, когда x(t)=0 и y(t)=0

Рис 25.

- Моменты времени, когда x(t)=Ax и y(t)=Ay

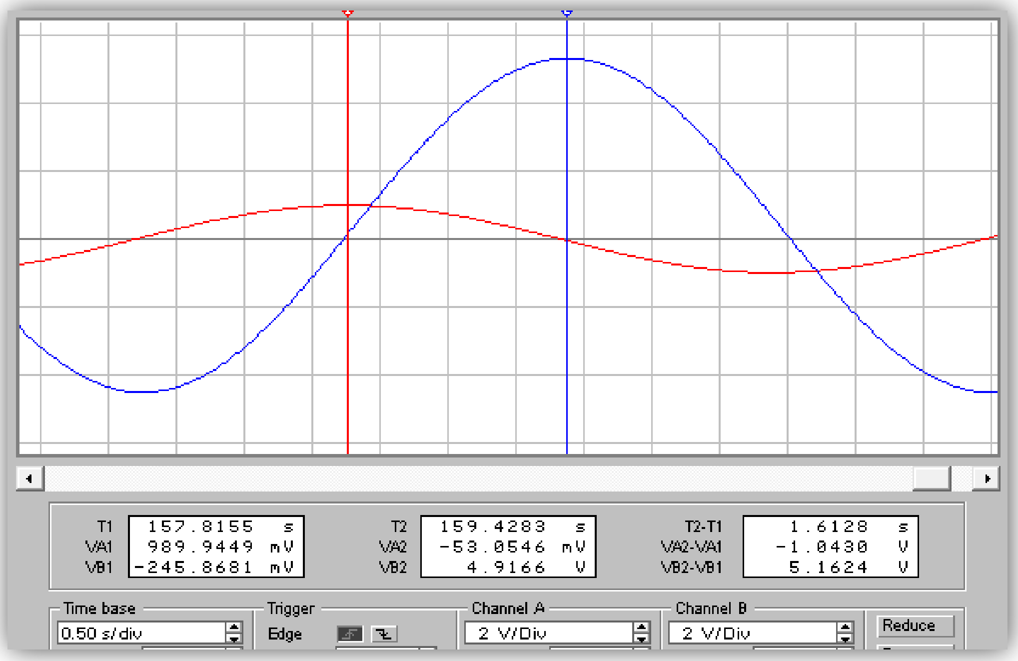


Рис 26.

$$A = \frac{A_y}{A_x} = \frac{4.9166V}{989.9495\ mV} \approx 4.97$$

$\Delta t = 1.6128$ сек $\qquad \varphi = -\Delta t * f * 360° \approx -92.89°$

$L = 20\lg(A) \approx 13.92$ дБ

❖ **<u>Высокая частота</u>**

- Общий график

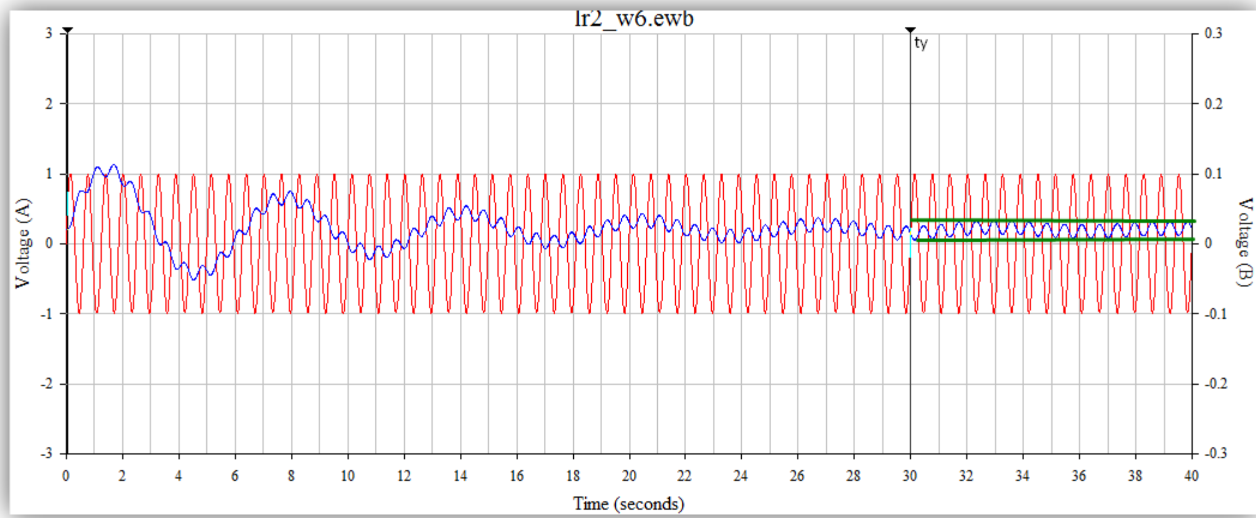


Рис 27.

- Моменты времени, когда x(t)=0 и y(t)=0

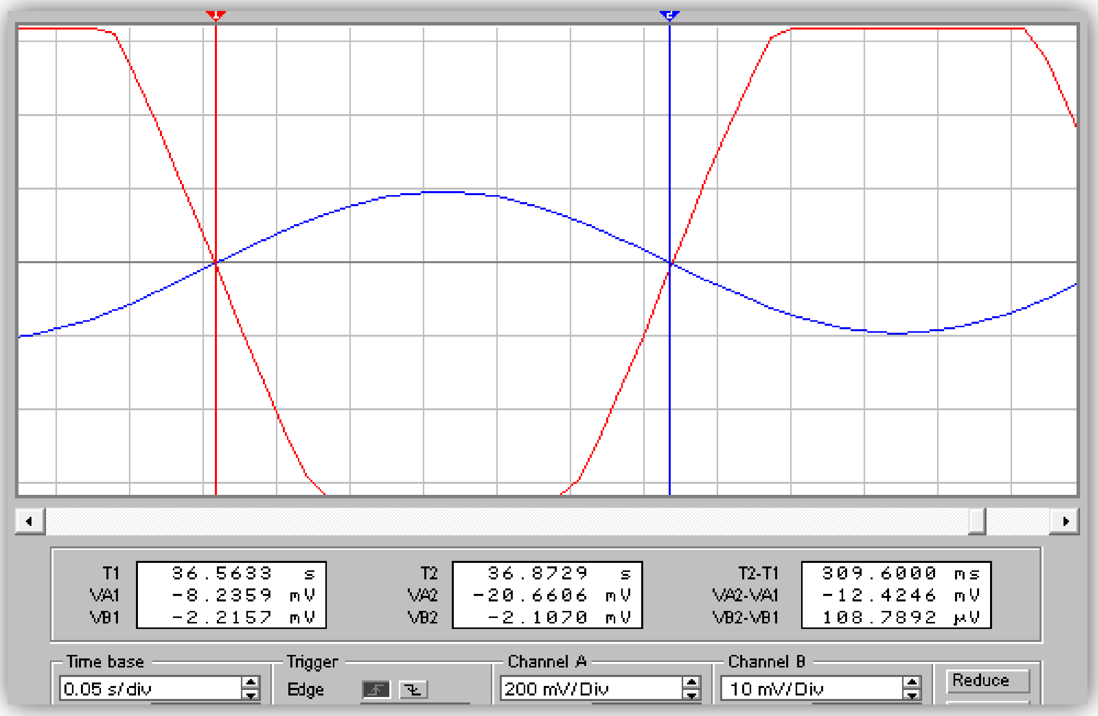


Рис 28.

- Моменты времени, когда x(t)=Ax и y(t)=Ay

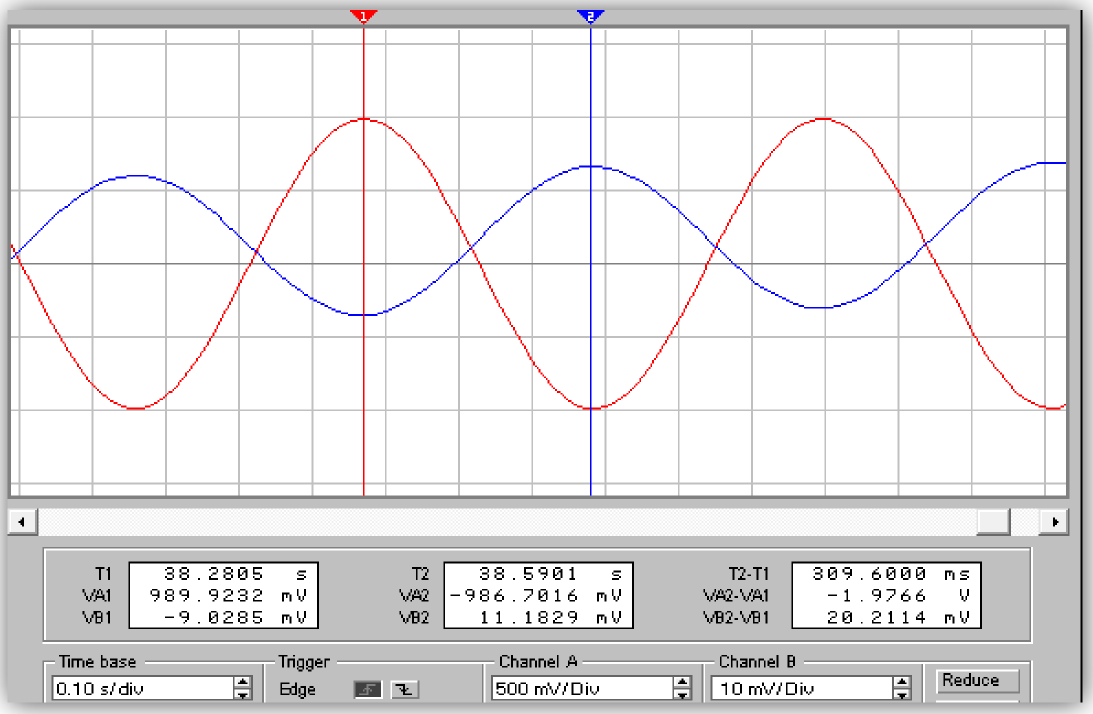


Рис 29.

$$A = \frac{A_y}{A_x} = \frac{11.18296mV}{989.9495\,mV} \approx 0.011$$

$$\Delta t = 0.3096 \text{ сек} \qquad \varphi = -\Delta t * f * 360° \approx -178.33°$$

$$L = 20\,lg(A) \approx -38.94\,\text{дБ}$$

Частота, Гц	L, ДБ	A	φ, °
$f_н \approx 0{,}016$	0.086	1.01	−1.16
$f_{ср} \approx 0{,}16$	13.92	4.97	−92.89
$f_в \approx 1{,}6$	−38.94	0.011	−178.33

__Объяснение свойств выходного сигнала:__ Собранная схема является селективным усилителем частот. Селективный усилитель — усилитель, у которого коэффициент усиления максимален в узком диапазоне частот и много больше за его пределами.

При частоте $f_н$=0,016 Гц выходной сигнал y(t) копирует сигнал x(t) с небольшим отставанием.

При частоте $f_{ср}$=0,16 Гц линейный коэффициент усиления равен 4.97 – средние частоты усиливаются почти в 5 раз.

При высокой частоте 1,6 Гц сигнал на выходе составляет ≈ одну сотую входного сигнала – высокие частоты не пропускаются через усилитель.

Селективные усилители применяют в промышленных системах обработки информации, когда необходимо из широкого спектра частот входного сигнала выделить составляющие, несущие информацию. Также данные усилители используются в радиоприёмниках для настройки на нужную частоту вещания.

Объяснение свойств выходного сигнала при высокой частоте:

Выведем формулу выходного сигнала.

$$Y(s) + 0.2s * Y(s) + s^2 * Y(s) = X(s)$$

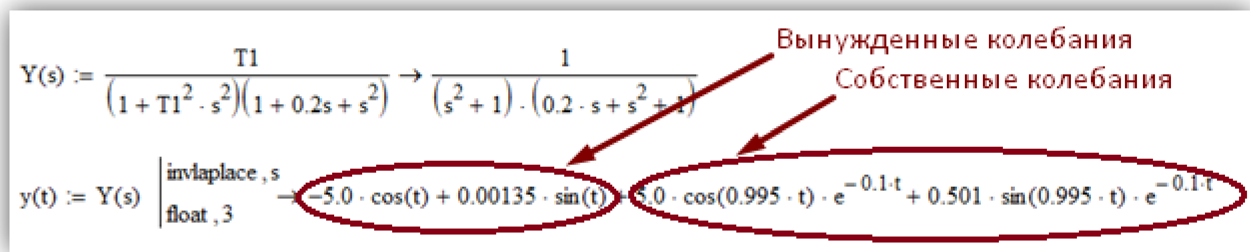
Оригинал $x(t) = \sin(\omega t) \rightarrow$ Изображение $X(s) = \dfrac{T}{1 + T^2 s^2}$

$$Y(s) + 0.2s * Y(s) + s^2 * Y(s) = \frac{T}{1 + T^2 s^2}$$

$$Y(s)(1 + 0.2s + s^2) = \frac{T}{1 + T^2 s^2}$$

$$Y(s) = \frac{T}{(1 + T^2 s^2)(1 + 0.2s + s^2)}$$

Вычислим значение y(t) с помощью Mathcad.



В формуле выходного сигнала как слагаемые присутствуют:

1)Произведение экспоненты в отрицательной степени и косинуса.

2)Произведение экспоненты в отрицательной степени и синуса.

Колебания происходят с амплитудой, уменьшающейся по экспоненте. При уменьшении значения экспонаты, график сходится к незатухающим колебаниям.

5.3 Сравнение полученных значений с графиками, построенными в Mathcad

Для проверки соответствия данных, полученных двумя способами, воспользуемся функцией «Трассировка» в программе Mathcad.

❖ **<u>Низкая частота</u>**

$f_н$≈0,016 Гц≈ 0,1 Рад/с

- Линейное усиление – Значение совпадает.

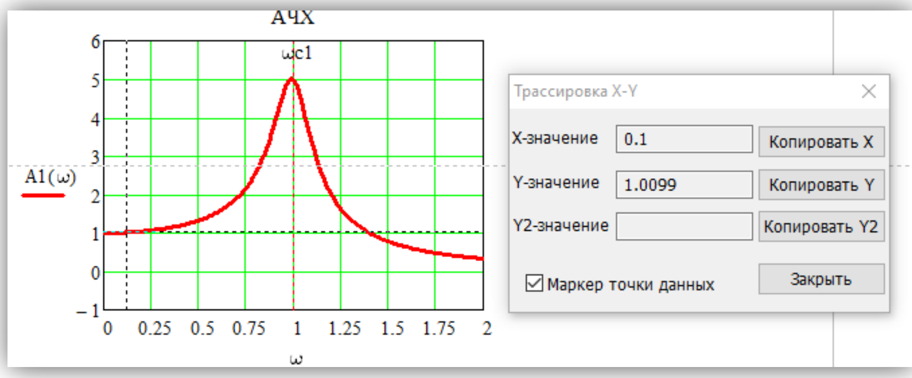


Рис 30.

- Логарифмическое усиление – Значение совпадает.

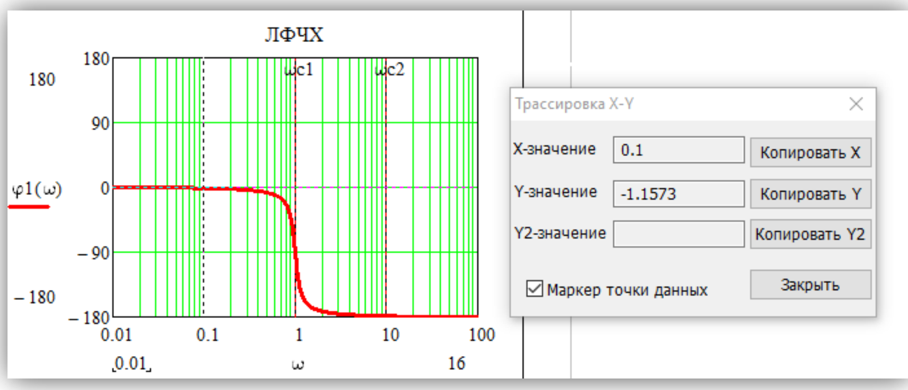


Рис 31.

- Фазовый сдвиг – Значение совпадает.

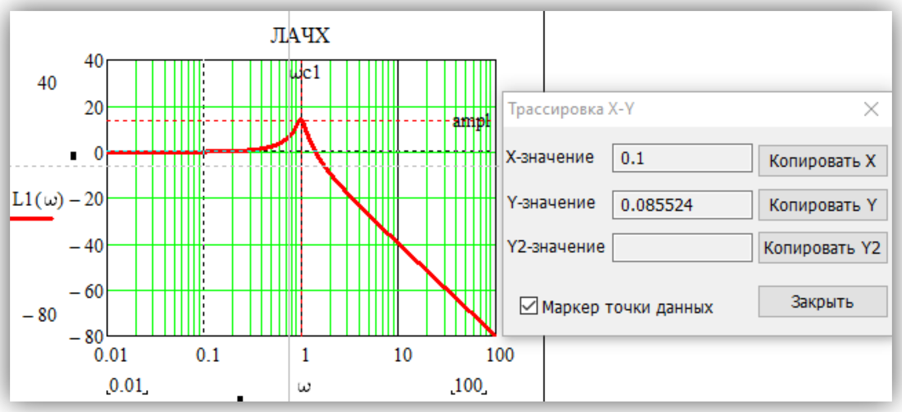


Рис 32.

❖ **Средняя частота**

fср≈0,16 Гц≈ 1 Рад/с

•Линейное усиление – Значение совпадает.

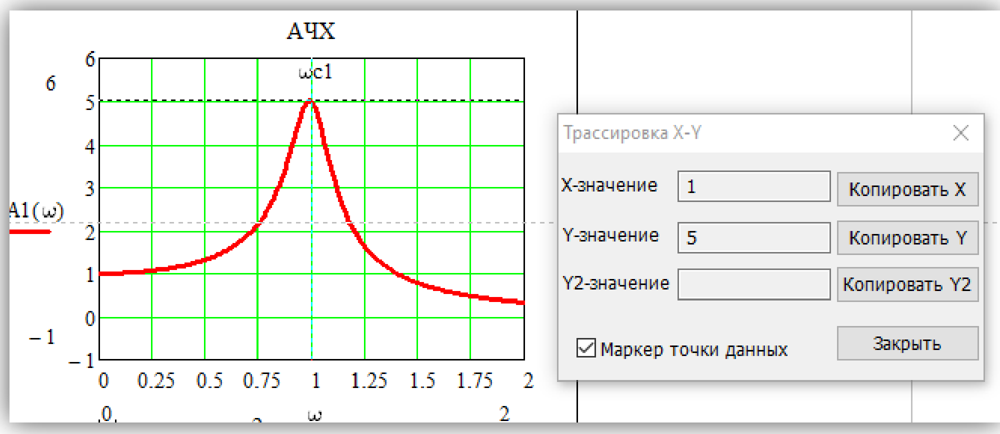


Рис 33.

• Логарифмическое усиление – Значение совпадает.

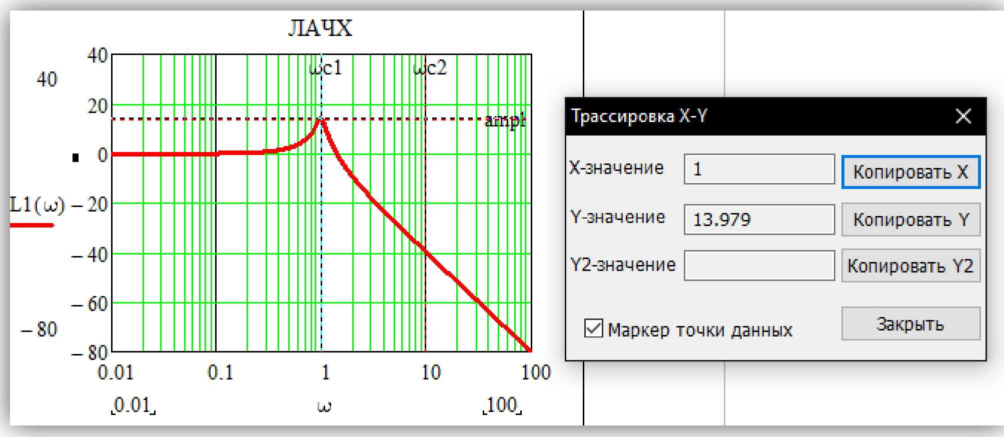


Рис 34.

• Фазовый сдвиг – Значение совпадает.

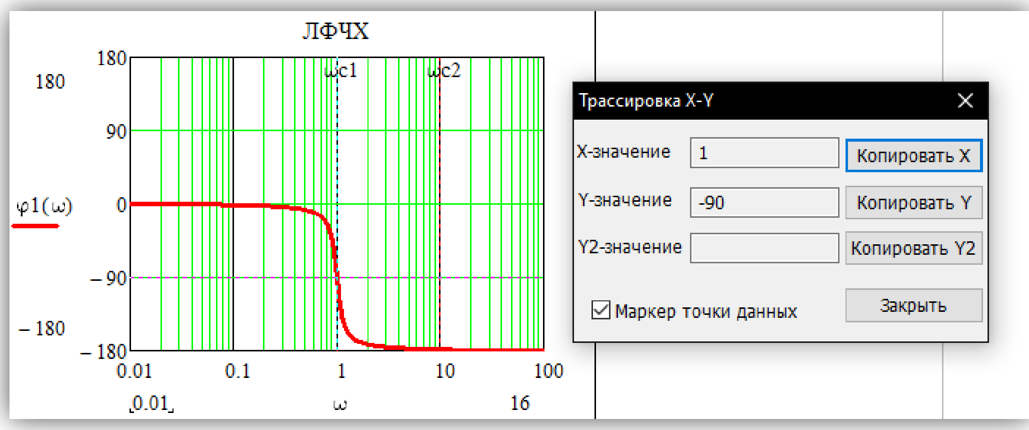


Рис 35.

❖ **<u>Высокая частота</u>**

$f_{выс}$≈1,6 Гц≈ 10 Рад/с

- Линейное усиление – Значение совпадает

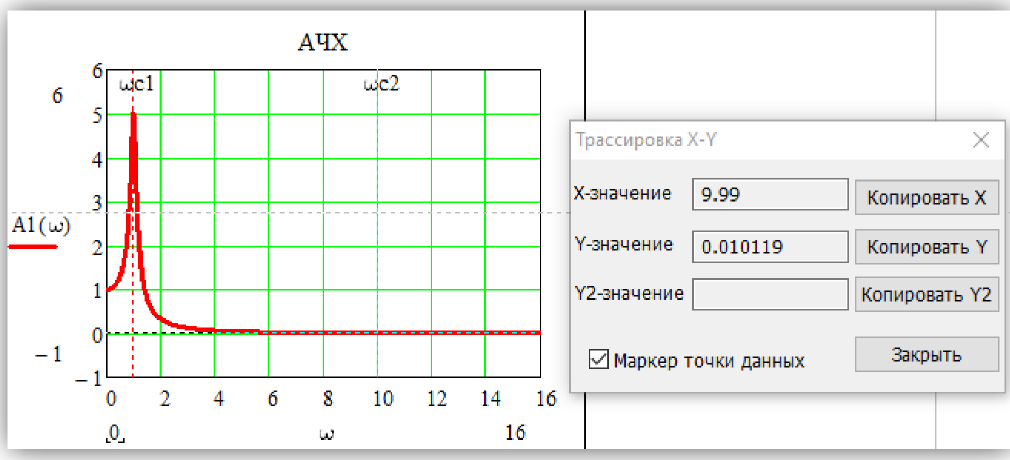


Рис 36.

- Логарифмическое усиление – Значение совпадает.

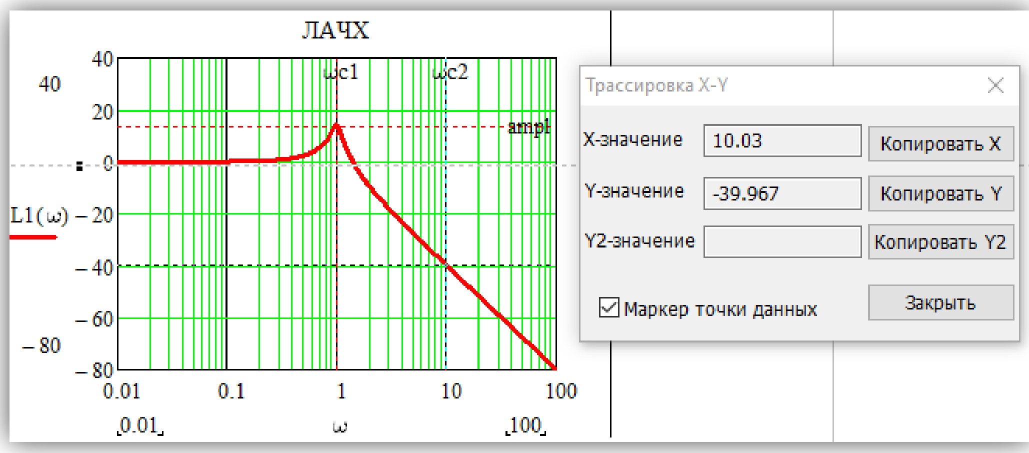


Рис 37.

- Фазовый сдвиг – Значение совпадает.

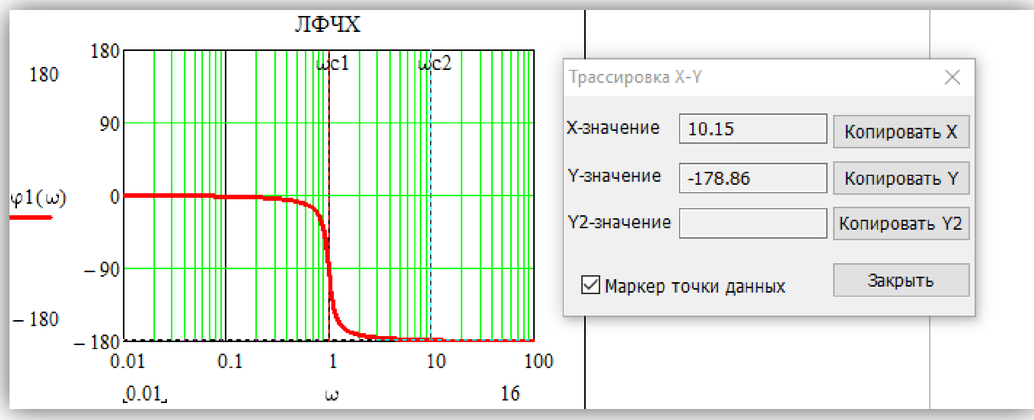


Рис 38.

5.4 Исследование временных характеристик

Исследуем реакции типового звена на негармонические входные воздействия — функции Дирака δ(t) и Хевисайда 1(t). Для этого подключим к схеме импульсный генератор.

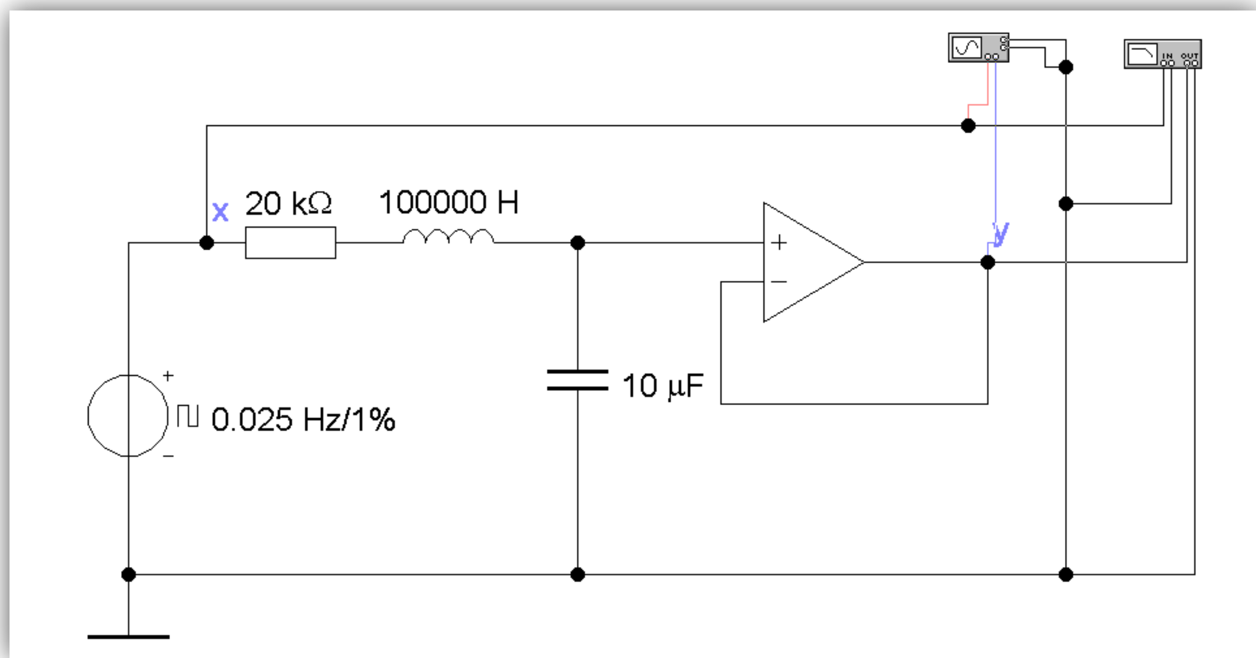


Рис 39.

Для формирования функции Дирака установим следующие параметры генератора:

- Частота – 0,025 Гц. Период импульсов должен быть больше времени установления, чтобы можно было увидеть реакцию на функцию Дирака. Время установления равно 3T/ξ=30с, период импульсов при выбранной частоте будет равен 40 с.
- Коэффициент заполнения - характеристика импульсных систем, определяющая отношение длительности импульса к периоду следования (повторения) импульсов. Установим 1% т.к. нам нужен максимально короткий импульс.
- Напряжение. Интеграл функции Дирака должен быть равен единице. Интеграл – площадь под графиком. Для обеспечения этого условия установим напряжение равное 2.5 В.

В промежутке между соседними импульсами на выходе схемы формируется *приближение к импульсной характеристике w(t)*, поскольку. реальную дельта-функцию получить невозможно - значение напряжения не может быть в один момент равно нулю и бесконечности.

Полученный график (Рис 40) совпадает с графиком, построенным с помощью Mathcad (Рис 9).

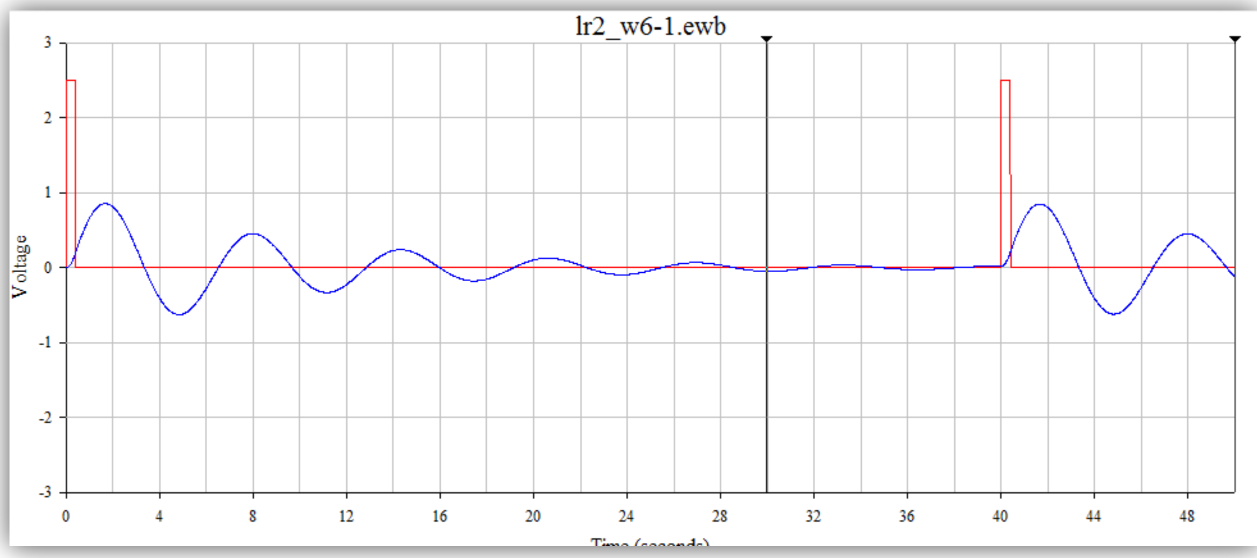


Рис 40.

Для формирования функции Хевисайда установим следующие параметры генератора:

- ❖ Частота – 0,1 Гц.
- ❖ Коэффициент заполнения - 100%. Поскольку значение функции при значении времени >0 должно быть равно единице.
- ❖ Напряжение – установим напряжение равное 1В.

Полученный график (Рис 41) совпадает с графиком, построенным с помощью Mathcad (Рис 13).

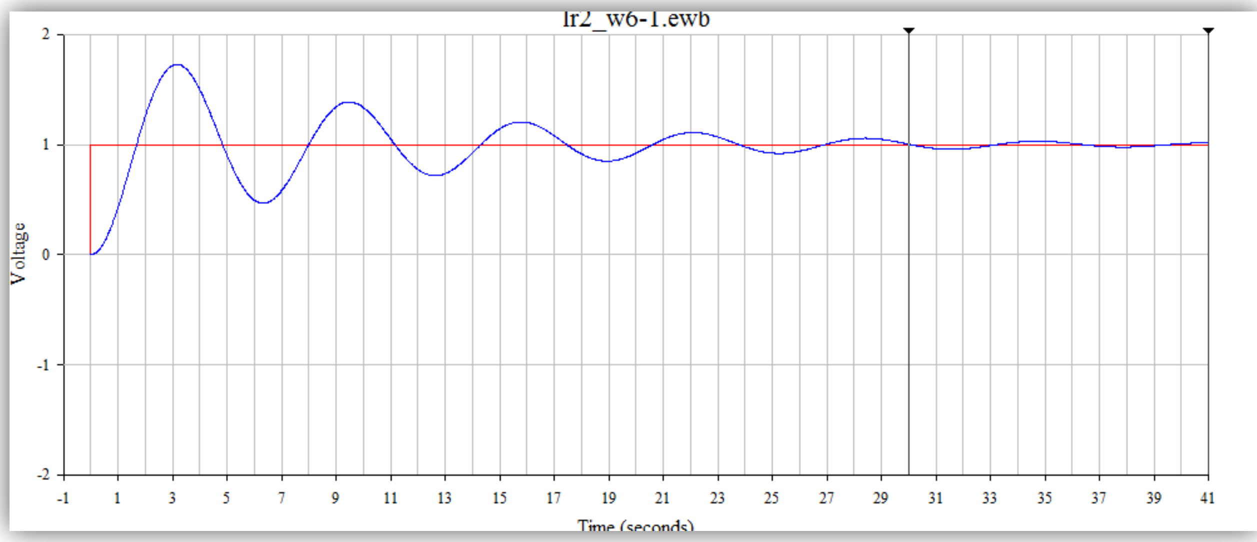


Рис 41.

Вертикальные движки на рис.40, 41 показывают время установления t_y=30с.