

Расчетно-графическая работа по ТАУ

Методические рекомендации по выполнению

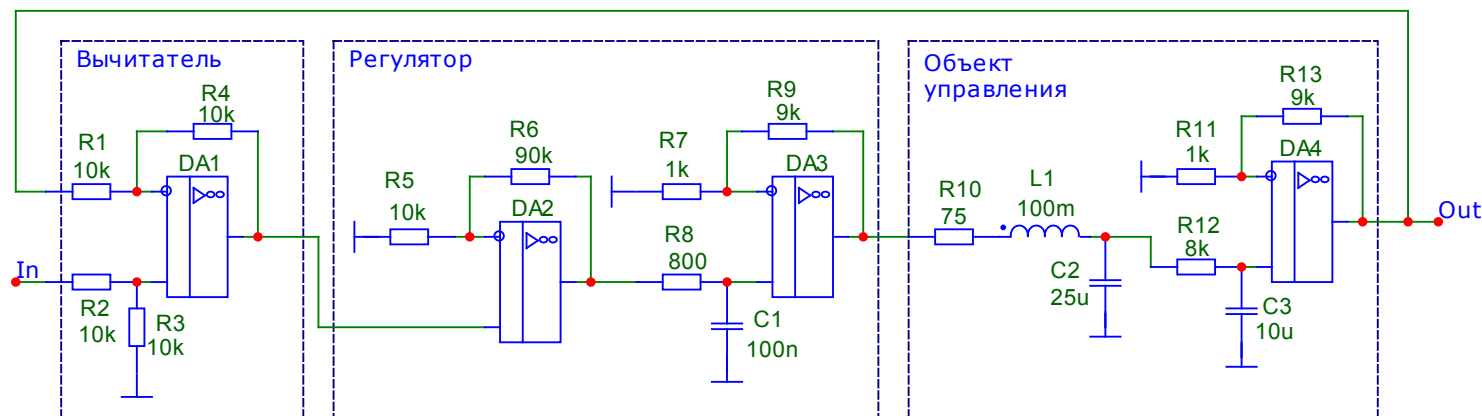
2021 г.

Задание на РГР	3
Порядок выполнения РГР	4
Порядок выполнения РГР	5
Структурная схема анализируемой САУ	6
Конечная цель работы	7
Функциональная схема САУ	8
Построение функциональной схемы САУ	9
Схемотехническая реализация разностного звена	10
Схемотехническая реализация пропорционального звена	11
Схемотехническая реализация интегрирующего звена	13
Пример деления принципиальной схемы на типовые звенья САУ	18
Пример построения функциональной схемы САУ	19
Определение точности системы по управляющему воздействию (ошибка по положению от управления)	20
Проверка правильности построения функциональной схемы САУ	21
Проверка построения асимптотических ЛАЧХ разомкнутой системы	32
Особенности построения асимптотической ЛАЧХ разомкнутой астатической системы	33
Анализ полученной асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы	41
Требования к <i>желаемой</i> ЛАЧХ разомкнутой системы ...	45
Диаграмма Солодовникова	46
Определение частоты среза ω_c	47
Общий вид <i>желаемой</i> ЛАЧХ статической системы	48
Общий вид <i>желаемой</i> ЛАЧХ астатической системы	49
Построение <i>желаемой</i> асимптотической ЛАЧХ на среднечастотном участке	50

Построение <i>желаемой</i> асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы	51
ЛАЧХ корректирующего звена	54
Построение асимптотической ЛАЧХ корректирующего звена	55
Определение параметров корректирующего звена	56
Проверка ЛАЧХ цепи коррекции	57
Скорректированная система	58
Проверка частотных характеристик скорректированной системы	59
Определение перерегулирования и времени регулирования	60
Переходная характеристика скорректированной системы	61
Проверка частотных характеристик скорректированной системы	64
Переходная характеристика скорректированной системы	65

Задание на РГР

Дана принципиальная схема замкнутой системы автоматического управления (САУ), необходимое время регулирования $t_{рег}$ и максимально возможная величина перерегулирования σ . Необходимо скорректировать систему для обеспечения устойчивости и получения заданных параметров регулирования $t_{рег}$ и σ .



Время регулирования $t_{рег} = 30$ мс, перерегулирование σ не более 25%

Порядок выполнения РГР

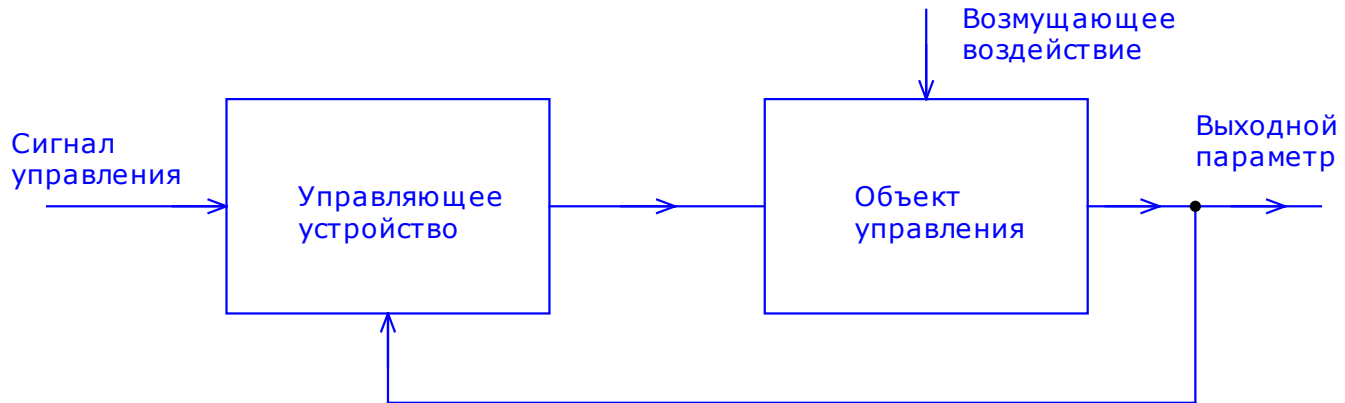
1. Провести анализ заданной принципиальной схемы, выявить структуру САУ.
2. Построить функциональную схему САУ, рассчитать параметры входящих в нее звеньев.
3. С использованием программы Micro-Cap получить ЛАЧХ исходной принципиальной схемы и полученной функциональной схемы для разомкнутой САУ. Сравнить полученные результаты
4. Аналитически вычислить точность по управляющему воздействию.
5. Построить асимптотическую ЛАЧХ разомкнутой системы.
6. Проверить САУ на устойчивость, оценить динамические свойства системы.
7. Провести моделирование функциональной схемы в программе Micro-Cap, проверить систему на устойчивость и оценить динамические свойства системы.
8. Построить желаемую асимптотическую ЛАЧХ системы.
9. Построить асимптотические ЛАЧХ корректирующих звеньев.
10. Выбрать тип корректирующих звеньев, обеспечивающих необходимую ЛАЧХ, рассчитать параметры корректирующих звеньев.
11. Провести моделирование корректирующих звеньев схемы в программе Micro-Cap, получить их ЛАЧХ и сравнить ее с полученной ранее асимптотической ЛАЧХ корректирующих звеньев (п. 9).

Порядок выполнения РГР

12. Добавить в функциональную схему САУ звенья коррекции с рассчитанными параметрами. Провести моделирование скорректированной функциональной схемы в программе Micro-Cap, оценить устойчивость замкнутой системы управления, вычислить запас по фазе и запас по амплитуде.
13. Провести временной анализ в программе Micro-Cap, убедиться в устойчивости системы управления, определить время регулирования, перерегулирование и точность по управляющему воздействию. Проверить выполнение требований технического задания, сделать выводы.
14. Оформить расчетно-пояснительную записку.

Структурная схема анализируемой САУ

В ходе выполнения РГР необходимо проанализировать характеристики замкнутой системы автоматического управления (системы с управлением по отклонению).

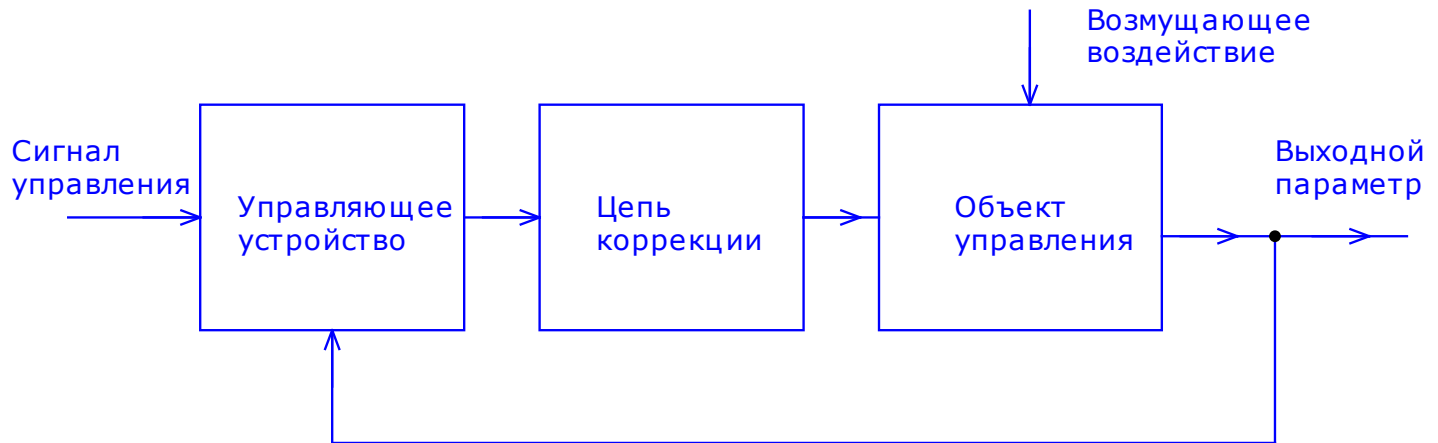


Сигналом управления является напряжение, подаваемое на вход схемы (вход In). Сигнал возмущения отсутствует. Выходным параметром является напряжение.

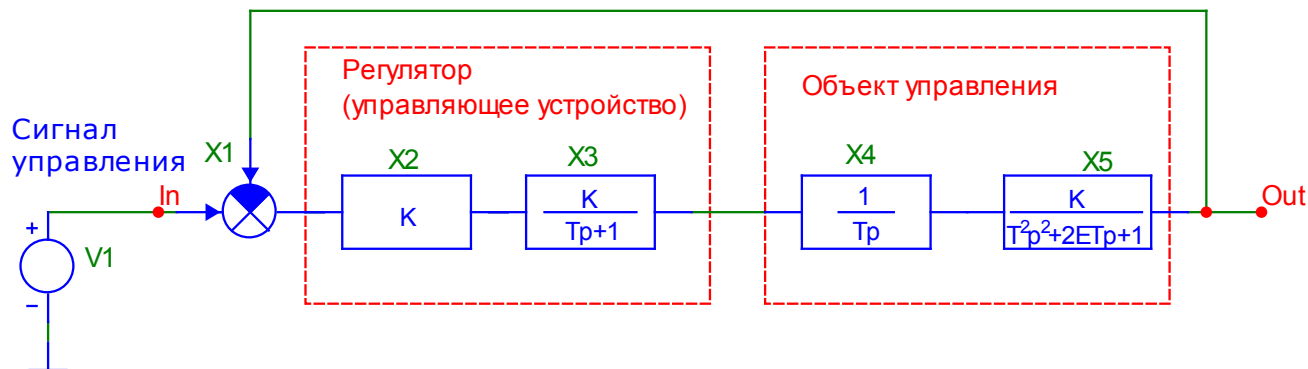
Рассматриваемая схема по своей сути является стабилизатором напряжения. Его задача обеспечивать стабильность выходного параметра (выходного напряжения) при воздействии на объект управления возмущающих воздействий. В идеале выходное напряжение должно с точностью повторять сигнал управления при любых изменениях сигнала управления и при любых возмущающих воздействиях. На практике всегда есть ошибка как по управляющему воздействию, так и по возмущающему воздействию.

Конечная цель работы

В ходе анализа САУ необходимо выяснить, работоспособна ли заданная система стабилизации (является ли она устойчивой), а также выяснить ее характеристики: точность по управляющему воздействию, точность по возмущающему воздействию, время регулирования и величину перерегулирования. Если эти характеристики не соответствуют требованиям технического задания, то систему необходимо скорректировать, введя в нее дополнительные звенья (цепи коррекции) с целью обеспечения устойчивости системы и получения заданных динамических характеристик.



Функциональная схема САУ

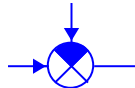

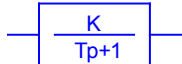
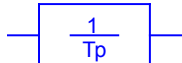



В состав управляющего устройства входит два типовых звена X2 и X3 (в разных вариантах заданий эти звенья разные). В состав объекта управления входят два типовых звена X5 и X6 (в разных вариантах заданий эти звенья разные).

В ходе выполнения РГР необходимо идентифицировать на принципиальной схеме перечисленные выше типовые звенья САУ, построить функциональную схему САУ и рассчитать параметры типовых звеньев САУ. Для пропорционального звена это коэффициент передачи k , для инерционного – коэффициент передачи k и постоянная времени T (читается «тау»), для интегрирующего – постоянная интегрирования T (или коэффициент передачи $k=1/T$), для колебательного – коэффициент передачи k , постоянная времени T и коэффициент демпфирования ξ (читается «кси»).

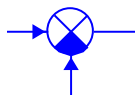
Построение функциональной схемы САУ

Заданная система автоматического управления может содержать пять разновидностей типовых звеньев САУ:

Вычитатель (разностное звено);	
Пропорциональное звено;	
Инерционное звено (апериодическое звено первого порядка);	
Интегрирующее звено;	
Колебательное звено	

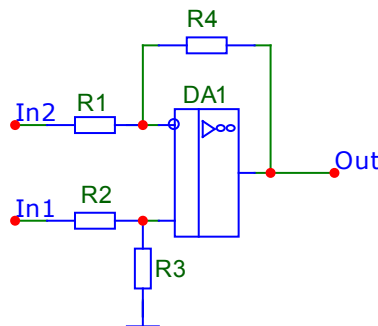
На принципиальной схеме необходимо найти схемотехническую реализацию этих звеньев, определить набор типовых звеньев, из которых состоит заданная САУ и построить функциональную схему САУ.

Схмотехническая реализация разностного звена



$$x_{\text{вых}}(t) = x_{\text{вх1}}(t) - x_{\text{вх2}}(t)$$

Одной из схмотехнических реализаций разностного звена (вычитателя) является **дифференциальный усилитель** на основе микросхемы операционного усилителя (ОУ).



Если $R1=R4$ и $R2=R3$, то $U_{\text{вых}} = U_{\text{in1}} - U_{\text{in2}}$, т.е. схема реализует функцию вычитателя напряжения.

Для того, чтобы входное сопротивление было достаточно большим и вычитатель не влиял на предыдущие звенья, сопротивления $R1$, $R2$, $R3$ и $R4$ выбирают, как правило, в диапазоне десятков–сотен кОм.

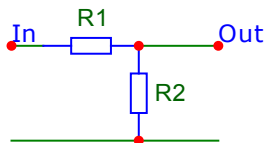
Схемотехническая реализация пропорционального звена



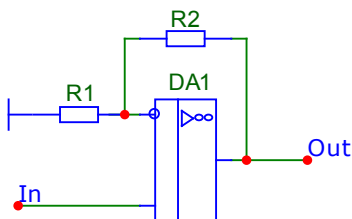
В **пропорциональном звене** выходной сигнал связан с входным коэффициентом пропорциональности k : $x_{\text{вых}}(t) = k \cdot x_{\text{вх}}(t)$

Передаточная функция в операторной форме: $W(p) = k$, где k – коэффициент передачи

Простейшая схемотехническая реализация — **резистивный делитель**:



$k = \frac{R2}{R2 + R2}$ Коэффициент передачи k резистивного делителя всегда меньше единицы ($k < 1$).

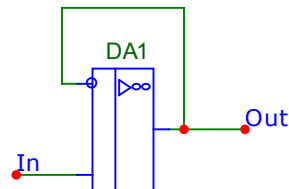
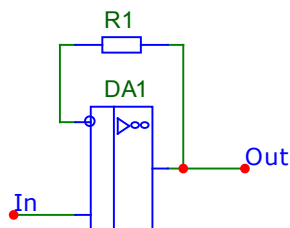


Схемотехническая реализация пропорционального звена с коэффициентом передачи $k \geq 1$ это **неинвертирующий усилитель**. Он может быть выполнен разными способами, например, на основе микросхемы операционного усилителя (ОУ). В этой схеме коэффициент передачи (коэффициент усиления):

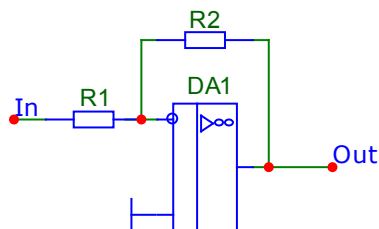
$$k = \frac{R2}{R1} + 1$$

Варианты усилителя на ОУ

Частный случай неинвертирующего усилителя – **усилитель с единичным коэффициентом усиления** ($k=1$):



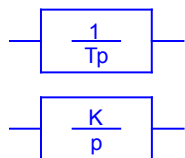
Инвертирующий усилитель на операционном усилителе (ОУ). В этой схеме коэффициент усиления k всегда отрицательный:



$$k = -\frac{R2}{R1}$$

Это значит, что инвертирующий усилитель в отличие от классического пропорционального звена **поворачивает фазу сигнала на 180 градусов** (поэтому он и называется инвертирующим).

Схемотехническая реализация интегрирующего звена



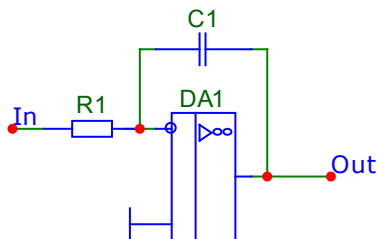
$$x_{\text{вых}}(t) = k \int_0^t x_{\text{вх}}(t) dt$$

В различных источниках используются две формы записи передаточной функции интегратора:

$$W(p) = \frac{1}{Tp}, \text{ где } T - \text{ постоянная времени интегрирования;}$$

$$W(p) = \frac{k}{p}, \text{ где } k - \text{ коэффициент передачи, } k = 1/T$$

Простейшей схемотехнической реализацией интегрирующего звена является схема на микросхеме операционного усилителя (ОУ) с конденсатором в цепи обратной связи.



Передаточная функция этой схемы:

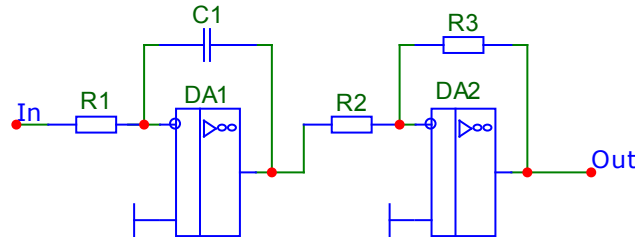
$$W(p) = -\frac{1}{Tp},$$

где $T = R1C1$ (постоянная времени интегрирования).

В отличие от классического интегрирующего звена эта схема реализует **инвертирующий интегратор** (параметр k имеет знак «минус»).

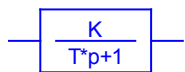
Схемотехническая реализация интегрирующего звена

Для получения **классического интегрирующего звена** необходимо после схемы инвертирующего интегратора поставить инвертирующий усилитель с единичным коэффициентом усиления.



В этой схеме при $R2=R3$, передаточная функция $W(p) = \frac{1}{Tp}$, где $T = R1 \cdot C1$.

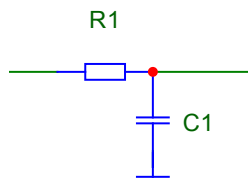
Схемотехническая реализация инерционного звена



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

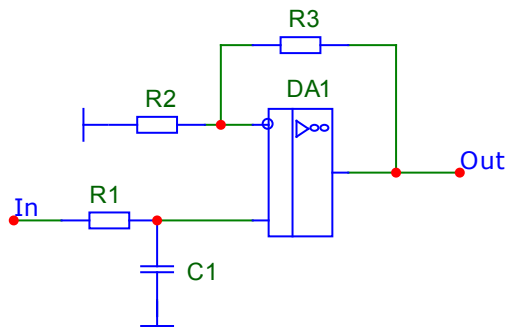
$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$

где k – коэффициент передачи звена,
 T (читается «тау») – постоянная времени звена.



Простейшее инерционное звено (апериодическое звено первого порядка) состоит из резистора и конденсатора.

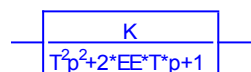
В электронике такую схему называют **интегрирующей RC-цепочкой**. Для такой реализации инерционного звена $k=1$, $T=R1C1$.



При последовательном включении нескольких таких цепей они начинают влиять друг на друга, и параметры инерционного звена начинают меняться (чего быть не должно). Для **исключения взаимного влияния** RC-цепей после каждой из них ставят усилитель (**буферный каскад**).

Для такой схемы $k = \frac{R3}{R2} + 1$, а $T = R1C1$.

Схемотехническая реализация инерционного звена второго порядка



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

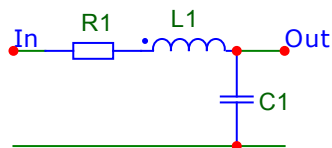
$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

где k – коэффициент передачи,
 T – постоянная времени («тау»),
 ξ – коэффициент демпфирования («кси»)

Частные случаи:

колебательное звено ($0 < \xi < 1$), **апериодическое звено второго порядка** ($\xi > 1$).

Схемотехническая реализация инерционного звена второго порядка – параллельный или последовательный колебательный **RLC-контур**. Пример последовательного контура:



Коэффициент передачи $k=1$

Постоянная времени: $T = \sqrt{L1C1}$

Коэффициент демпфирования:

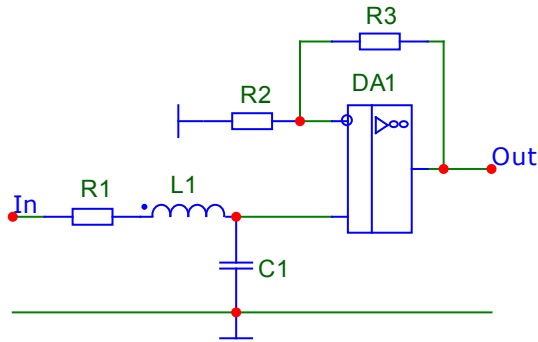
$\xi = \frac{R1}{2\rho}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L1}{C1}}$ – волновое сопротивление контура.

Частота собственных колебаний в контуре ω_0 (резонансная частота контура):

$$\omega_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{\sqrt{L1C1}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1C1}}$$

Схемотехническая реализация инерционного звена второго порядка

Для реализации классического инерционного звена второго порядка, в котором коэффициент передачи k может принимать произвольные значения, необходимо к RLC-цепи добавить неинвертирующий усилитель.



Коэффициент передачи: $k = \frac{R3}{R2} + 1$.

Постоянная времени: $T = \sqrt{L1C1}$.

Коэффициент демпфирования:

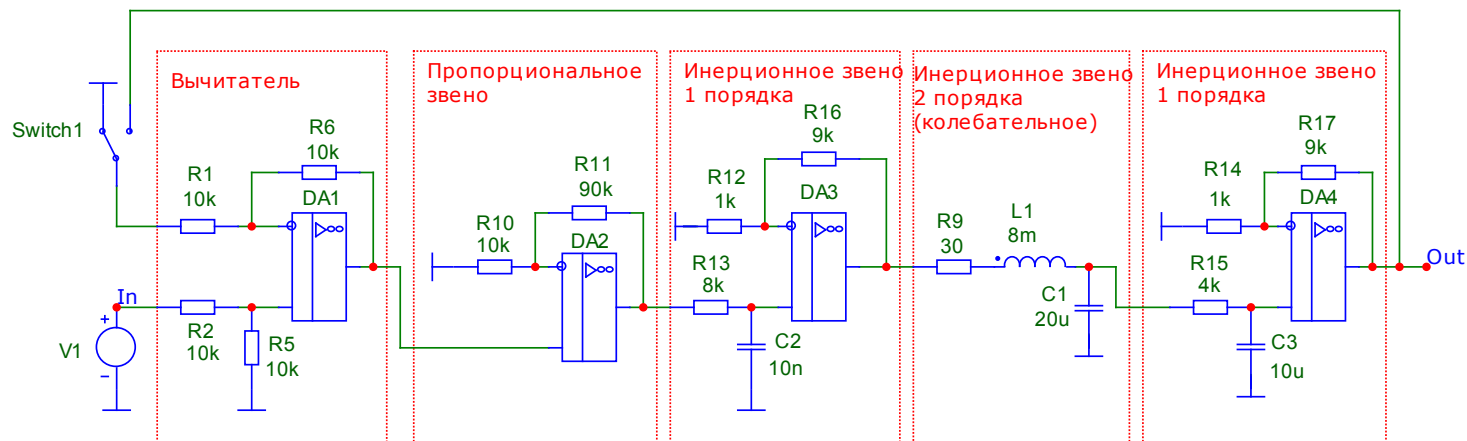
$\xi = \frac{R1}{2\rho}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L1}{C1}}$ – волновое сопротивление контура.

тура.

Частота собственных колебаний в контуре ω_0 (резонансная частота контура):

$$\omega_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{\sqrt{L1C1}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1C1}}$$

Пример деления принципиальной схемы на типовые звенья САУ



V_1 – источник управляющего воздействия. Он необходим для получения частотных и временных характеристик. Он должен формировать ступенчатый сигнал амплитудой 1 В (функцию Хевисайда).

Ключ *Switch1* (компонент *Animated SPDT Switch* из раздела *Animation*) позволяет замыкать и размыкать цепь обратной связи при снятии характеристик САУ. АЧХ и ФЧХ получают при разомкнутой цепи обратной связи, а переходную характеристику – при замкнутой.

Пример построения функциональной схемы САУ



Параметры звеньев:

Пропорциональное звено

Коэффициент передачи: $k=R11/R10+1=90\text{кОм}/10\text{кОм}+1=10$.

Инерционное звено 1 порядка

Коэффициент передачи: $k=R16/R12+1=9\text{кОм}/1\text{кОм}+1=10$;

Постоянная времени: $T=R13*C2=8\text{кОм}*10\text{нФ}=80\text{мкс}$.

Колебательное звено

Коэффициент передачи: $k=1$ (нет усилителя);

Постоянная времени: $T=\sqrt{L1*C1} = \sqrt{8\text{мГн}*20\text{мкФ}} = 0.4\text{мс}$.

Коэффициент демпфирования: $\xi=R9/(2*\sqrt{L1/C1})=30/(2*\sqrt{8\text{мГн}/20\text{мкФ}})=0,75$.

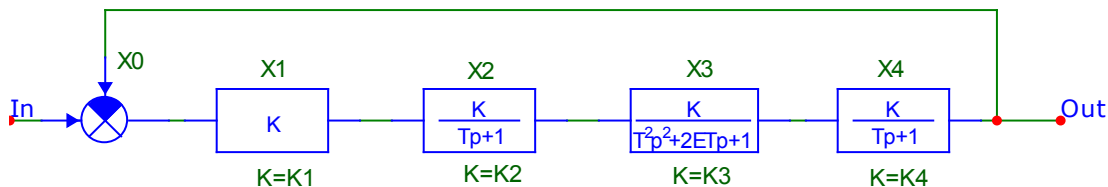
Инерционное звено 1 порядка

Коэффициент передачи: $k=R17/R14+1=9\text{кОм}/1\text{кОм}+1=10$;

Постоянная времени: $T=R15*C3=4\text{кОм}*10\text{мкФ}=40\text{мс}$.

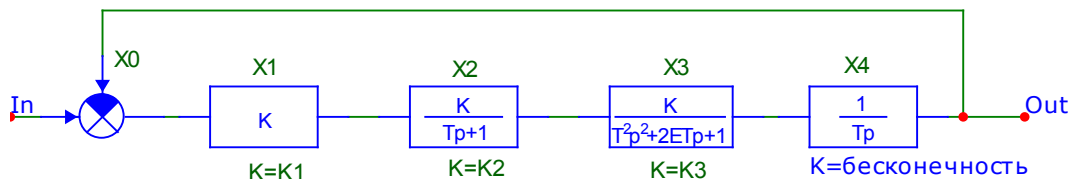
Определение точности системы по управляющему воздействию (ошибка по положению от управления)

Для статических систем



$$X_{уст\ упр} = \frac{1}{1 + k_{разомкн}} = \frac{1}{1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4} \quad (\text{малое, но конечное число})$$

Для астатических систем



$$X_{уст\ упр} = \frac{1}{1 + k_{разомкн}} = \frac{1}{1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4} = \frac{1}{1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \infty} = 0$$

Проверка правильности построения функциональной схемы САУ

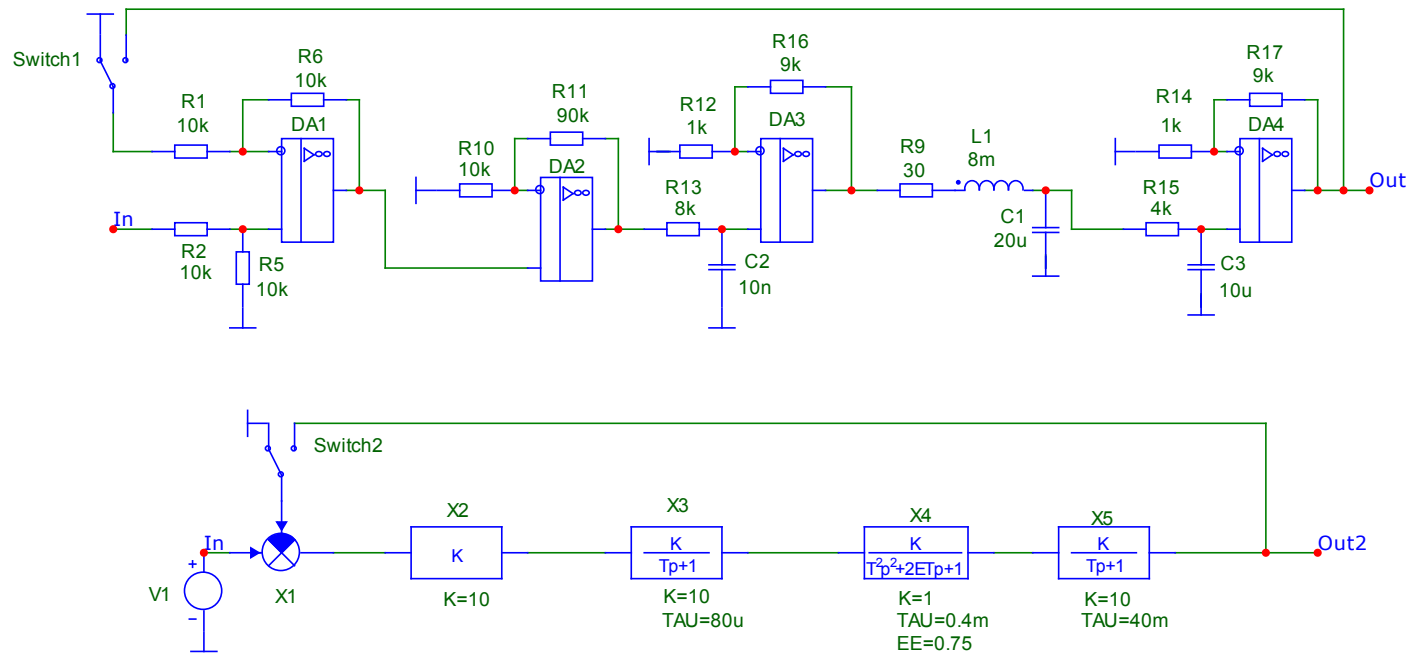
Для того, чтобы убедиться, что функциональная схема САУ построена правильно, необходимо **сравнить** АЧХ и ФЧХ **принципиальной** и **функциональной** схем. Строить АЧХ и ФЧХ необходимо для разомкнутой системы. Т.е. **перед построением АЧХ обратную связь нужно разомкнуть**. Это связано с тем, что критерий устойчивости Найквиста позволяет судить об **устойчивости замкнутой системы** на основе анализа **разомкнутой** системы. Этот критерий в применении к ЛАЧХ и ЛФЧХ системы как раз и используется в данной РГР.

Входы **In** обеих схем объединить и подать на объединенный вход единичный ступенчатый сигнал. Источник *Voltage Source*: начальное значение 0, амплитуда 1 В, задержка 100 нс, время фронта 100 нс, время среза 100 нс, длительность импульса 10 с, период 10 с.

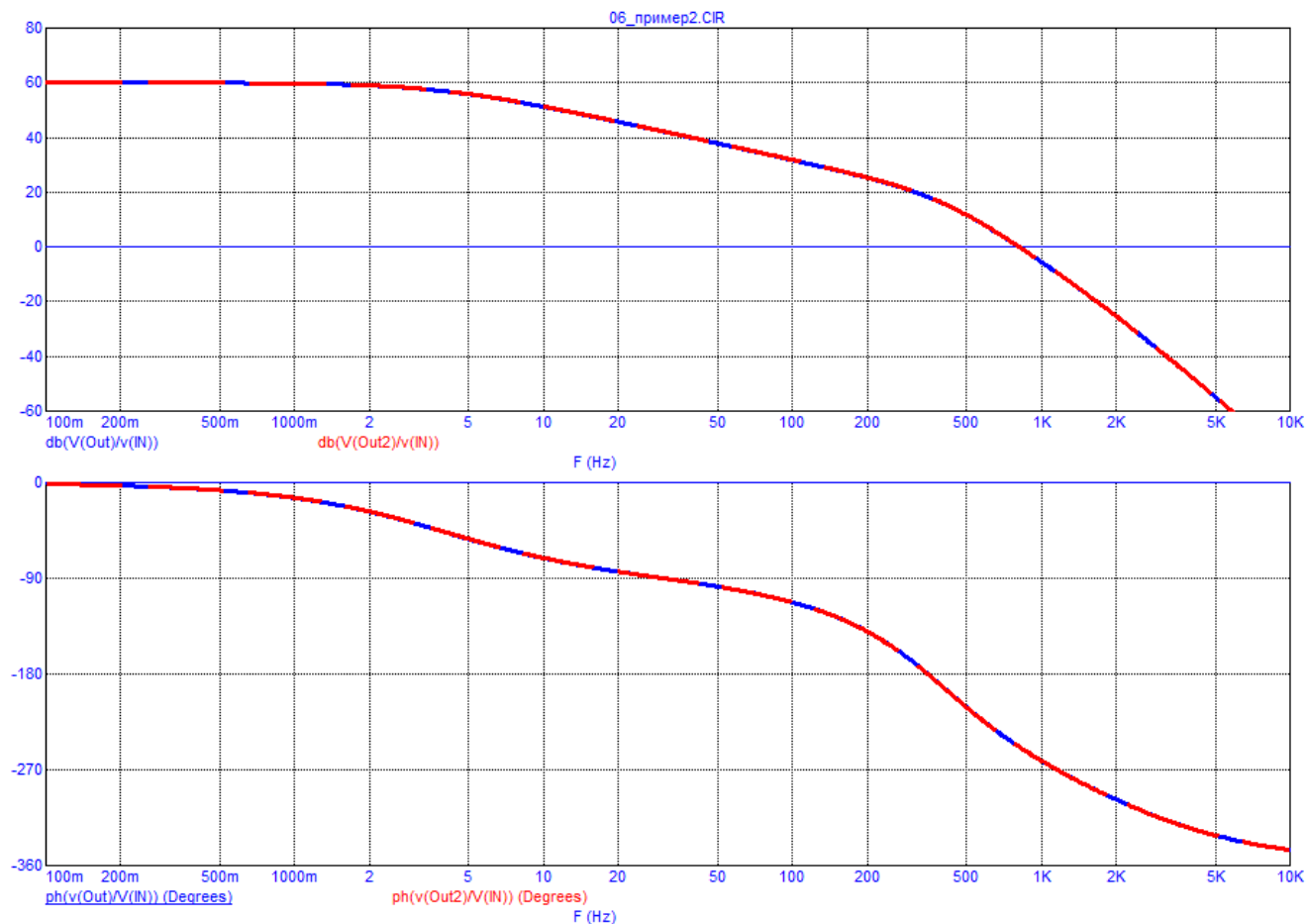
Запустить анализ АС и построить АЧХ и ФЧХ на выходах обеих схем (Out и Out1). Графики должны совпасть.

Установки анализа: шаг расчета логарифмический, диапазон частот 0.01Гц-100кГц, число расчетных точек 1000. График АЧХ в дБ, масштаб по оси Y от -60 до 100 дБ с шагом 20 дБ. Для ФЧХ масштаб по оси Y от 0° до -360° с шагом 90°.

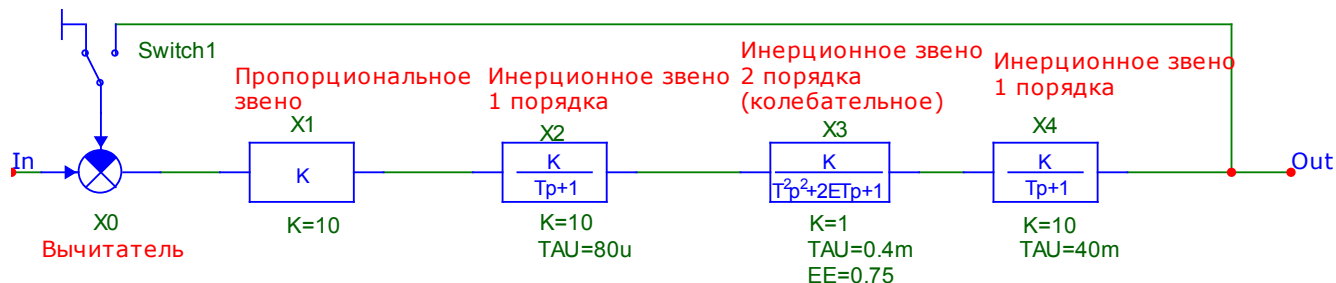
Схема проверки функциональной схемы САУ



Частотные характеристики принципиальной и функциональной схем



Построение асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы



1. Рассчитываем круговые частоты сопряжения (излома ЛАЧХ), используя известные значения постоянных времени звеньев.

ω_1 отсутствует (пропорциональное звено), $\omega_2=1/T_2=12500$, $\omega_3=1/T_3=2500$, $\omega_4=1/T_4=25$. Частоты сопряжения выстраивают в порядке возрастания: $\omega_4=25$, $\omega_3=2500$, $\omega_2=12500$.

2. Зная звенья, входящие в САУ и последовательность частот сопряжения можно предсказать ход асимптотической ЛАЧХ. Для статических систем (нет интегрирующего звена) на частотах ниже частоты сопряжения коэффициент усиления постоянен:

Первый участок $0 < \omega < \omega_4$ $[0, 25]$., $K_{дБ}=20 \cdot \lg(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4)=60\text{дБ}$ Наклон 0 дБ/дек.

Второй участок $\omega_4 < \omega < \omega_3$ $[25, 2500]$. Наклон -20 дБ/дек. , вносимый инерционным звеном X4.

Третий участок $\omega_3 < \omega < \omega_2$ $[2500, 12.5\text{k}]$. Наклон $-20-40=-60\text{ дБ/дек.}$, вносимый инерционным звеном X4 и инерционным звеном второго порядка X3.

Четвертый участок $\omega_2 < \omega$ $[12.5\text{k}, \infty]$. Наклон $-20-40-20=-80\text{ дБ/дек.}$, вносимый инерционным звеном X4, инерционным звеном второго порядка X3 и инерционным звеном X2.

Подготовка пустого поля графиков

В режиме анализа АС выводим пустое окно графиков для последующего построения асимптотических характеристик. Для этого задаем вывод графика нулевого значения.

AC Analysis Limits

Run Add Delete Expand... Stepping... Properties... Help...

Frequency Range Log 10k,0.01 Run Options Normal

Number of Points 1000 State Variables Zero

Temperature Linear 27

Maximum Change % 5

Noise Input NONE

Noise Output 2

☒ Operating Point


☐ Auto Scale Ranges

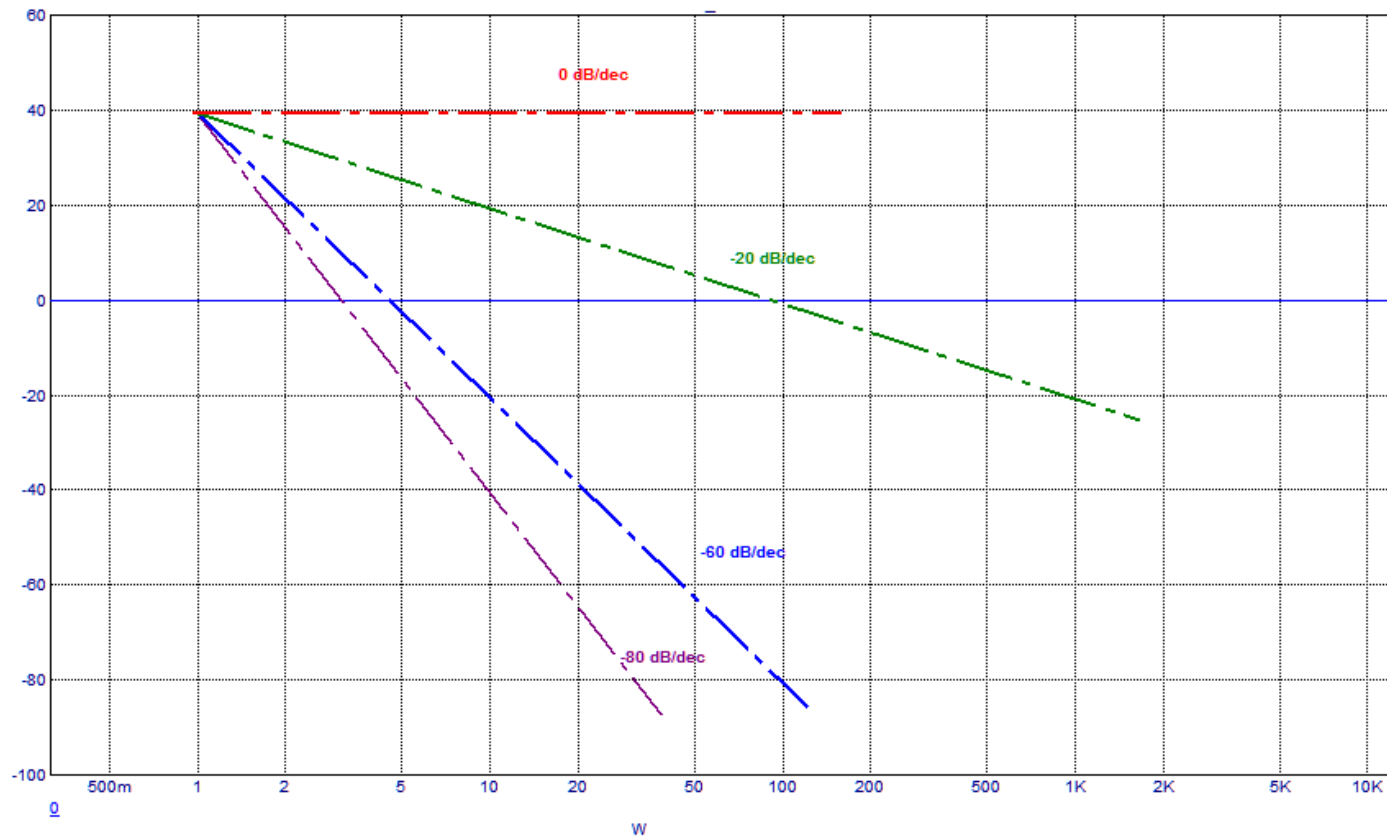
☐ Accumulate Plots

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range	>
1	1	$2\pi F$	0	$F_{MAX} \cdot 2\pi, F_{MIN} \cdot 2\pi$	60, -140, 20	


Масштабы по оси частот определяются частотами сопряжения: нижнее значение частоты $2\pi F$ должно быть примерно в 100 раз ниже нижней частоты сопряжения, верхнее значение частоты — примерно в 100 раз выше верхней частоты сопряжения.

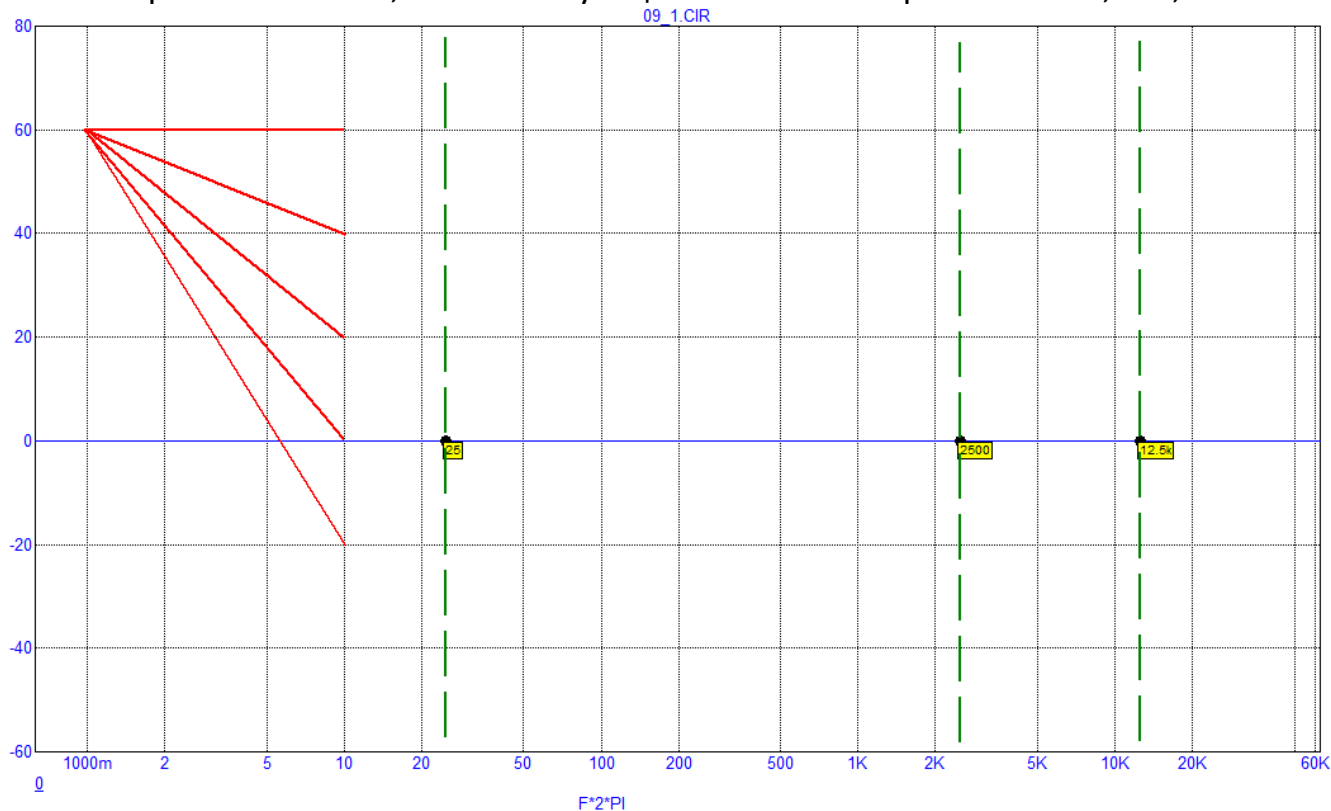
Подготовка прямых с заданными наклонами

3. В графическом окне с построенной в режиме АС ЛАЧХ строим 4 прямые с необходимыми наклонами, используя группу команду .



Построение линий частот сопряжения

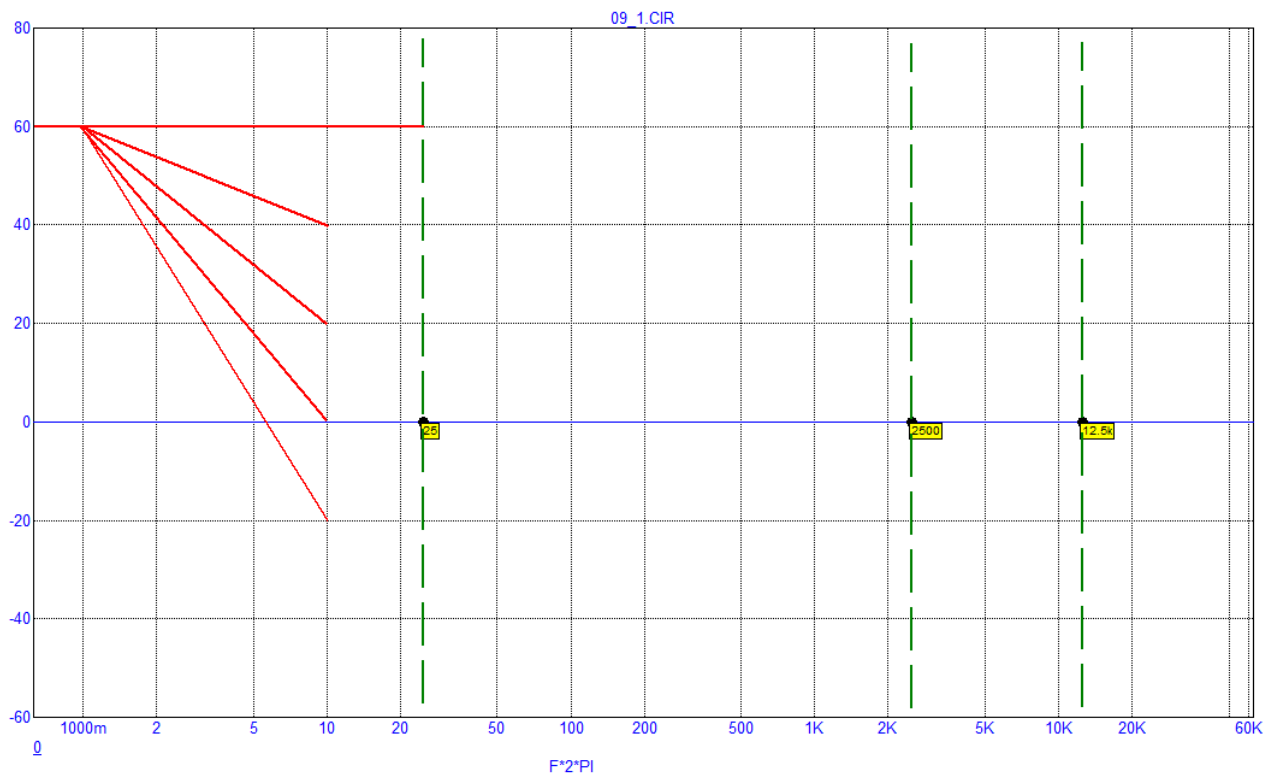
4. Устанавливаем логарифмическую подсетку 1-2-5  и рисуем вертикальные прямые линии через точки X оси, соответствующие частотам сопряжения W4, W3, W2.



Построение асимптотической ЛАЧХ первого участка

5. Передвигая пунктирные наклонные линии строим асимптотическую ЛАЧХ разомкнутой системы. Построение начинается с самого низкочастотного участка:

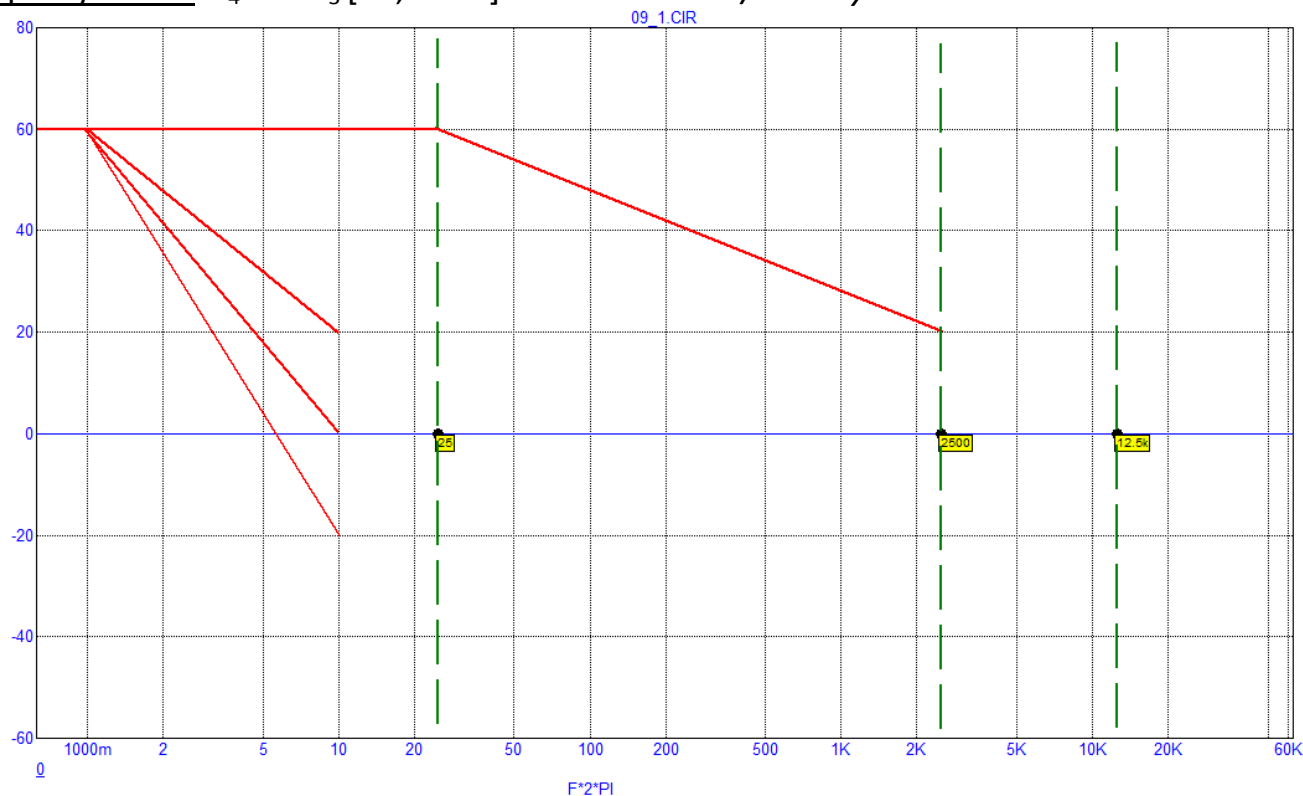
первый участок $0 < \omega < \omega_4$ $[0, 25]$. Наклон 0 дБ/декаду, значение $DB = 20 \cdot \lg(17.9) = 60$ дБ.



Построение асимптотической ЛАЧХ второго участка

6. Из точки пересечения асимптоты первого участка и нижней частоты сопряжения (ω_4) проводится асимптота второго участка.

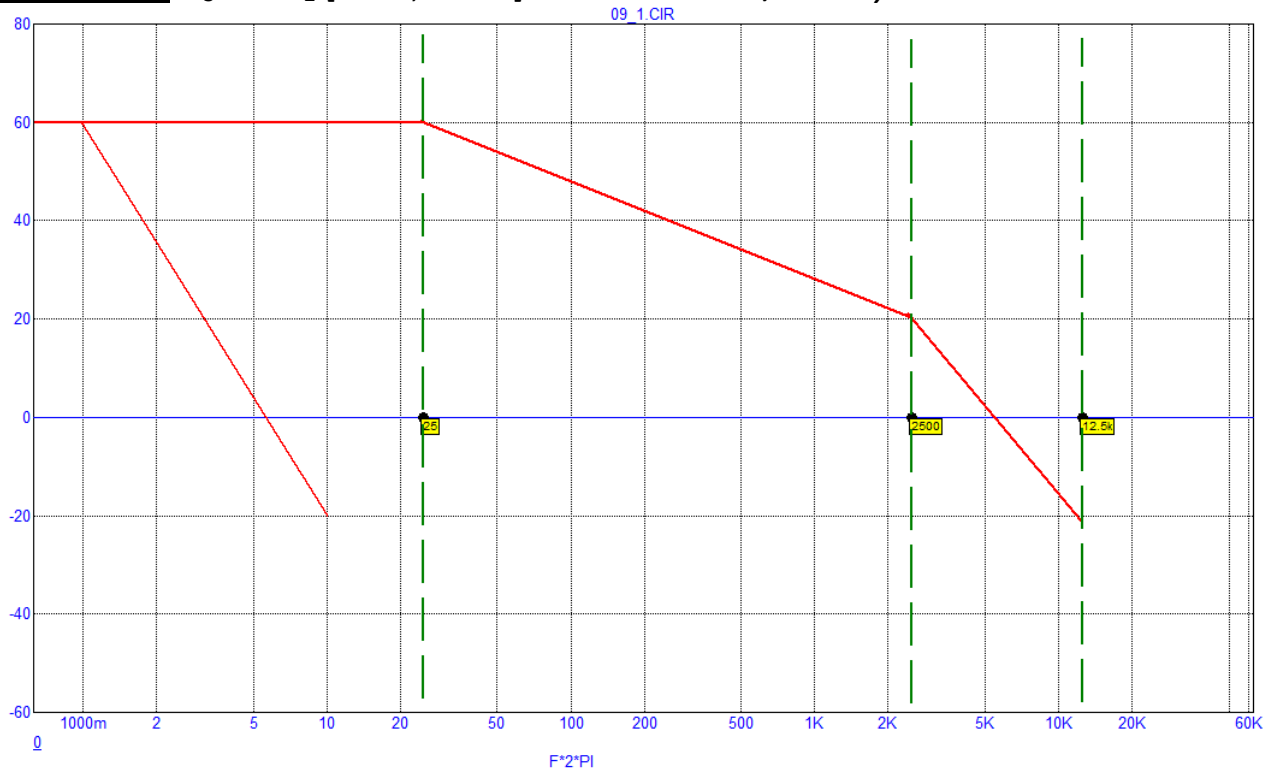
Второй участок $\omega_4 < \omega < \omega_3$ [25, 2500]. Наклон -20 дБ/декаду.



Построение асимптотической ЛАЧХ третьего участка

7. Из точки пересечения асимптоты второго участка и следующей частоты сопряжения (ω_3) проводится асимптота третьего участка.

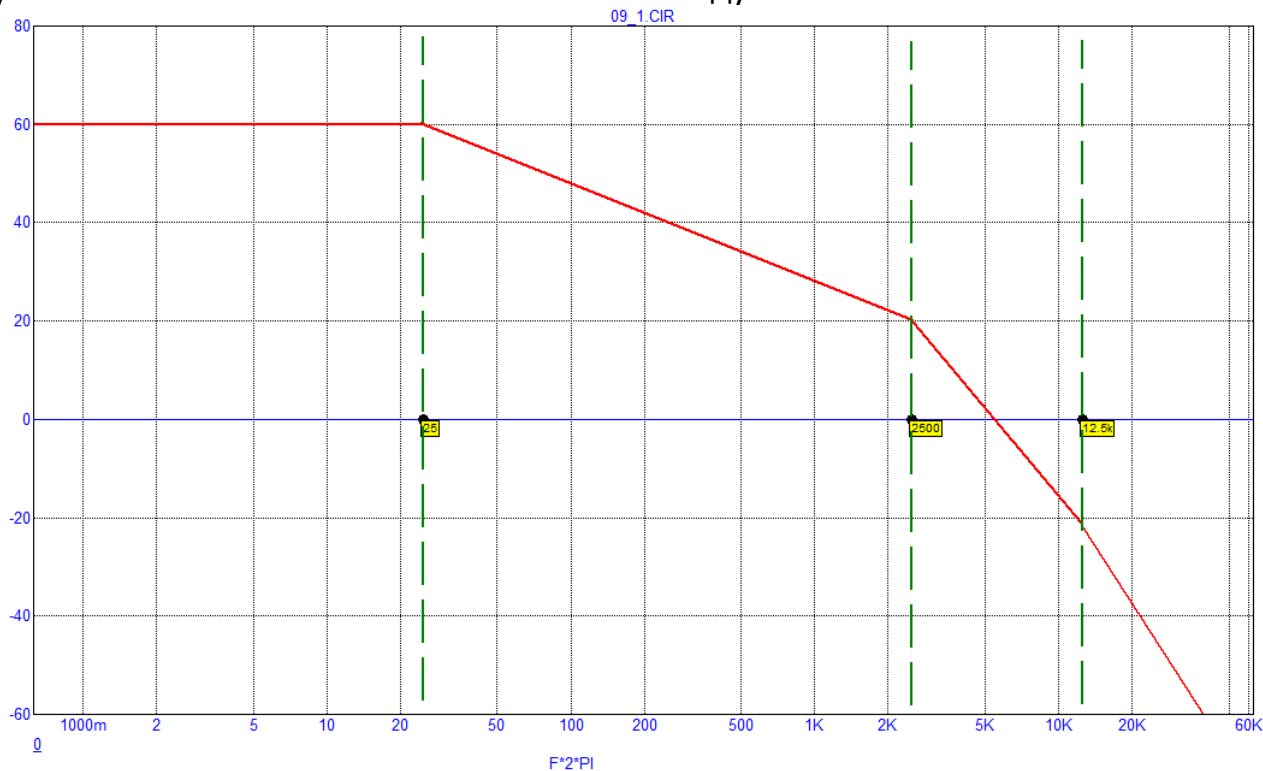
Третий участок $\omega_3 < \omega < \omega_2$ [2500, 12.5k]. Наклон -60 дБ/декаду.



8. Из точки пересечения асимптоты третьего участка и следующей частоты сопряжения (ω_2) проводится асимптота четвёртого участка.

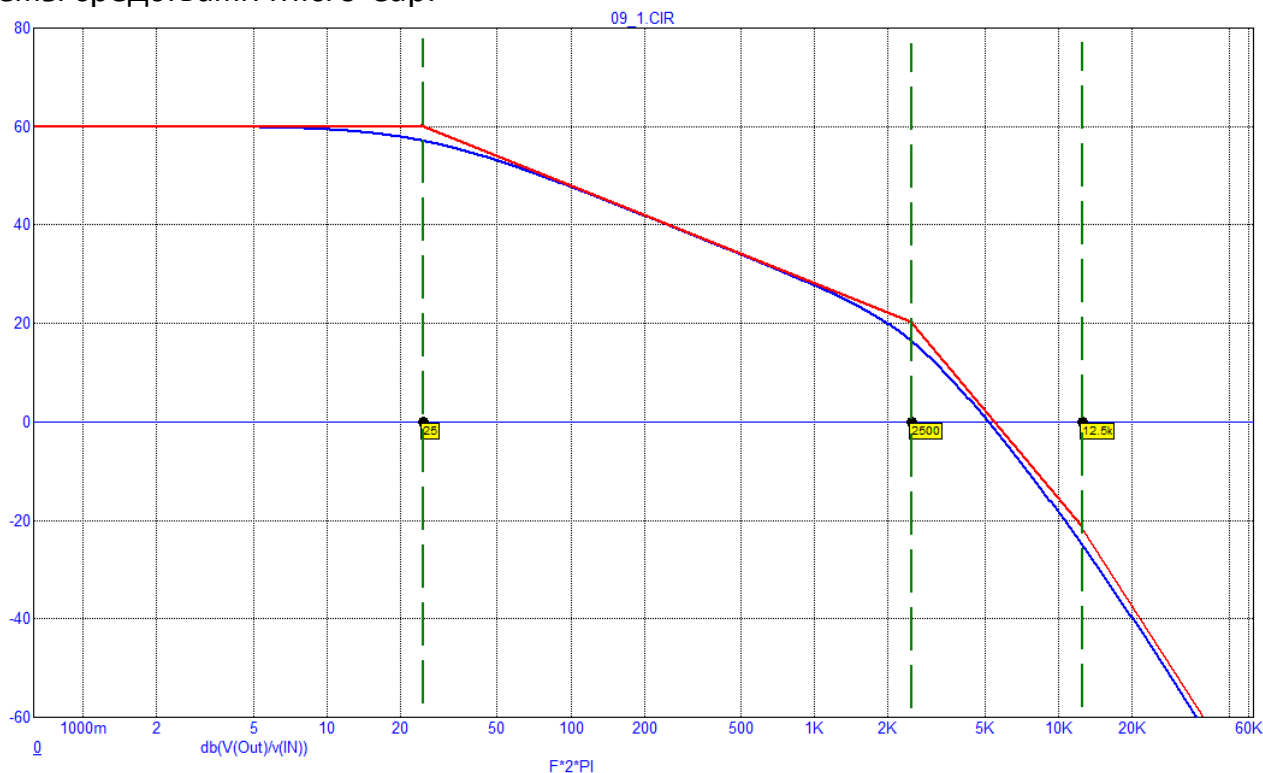
Четвертый участок $\omega_2 < \omega < \omega_4$ [12.5, ∞]. Наклон -80 дБ/декаду.

Получилась полная асимптотическая ЛАЧХ исследуемой САУ

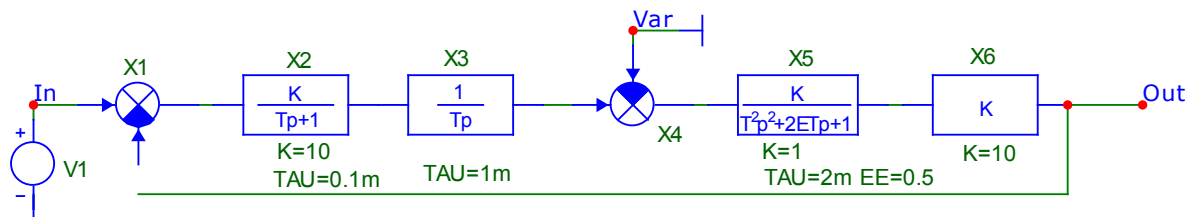


Проверка построения асимптотических ЛАЧХ разомкнутой системы

При правильном построении полученные прямые должны асимптотически сопрягаться с реальной ЛАЧХ. Для проверки правильности построения можно вывести на график ЛАЧХ системы средствами Micro-Cap.



Особенности построения асимптотической ЛАЧХ разомкнутой астатической системы



1. $\omega_1=1/T1=10\ 000$, $\omega_2=1/T2=1000$, $\omega_3=1/T3=500$, ω_4 отсутствует (пропорциональное звено).

Частоты сопряжения в порядке возрастания: $\omega_3=500$, $\omega_1=10\ 000$.

Частота пересечения ЛАЧХ интегрирующего звена с осью X: $\omega_2=1000$

2. Для астатических систем (с интегрирующим звеном) на частотах ниже нижней частоты сопряжения наклон ЛАЧХ -20дБ/дек.

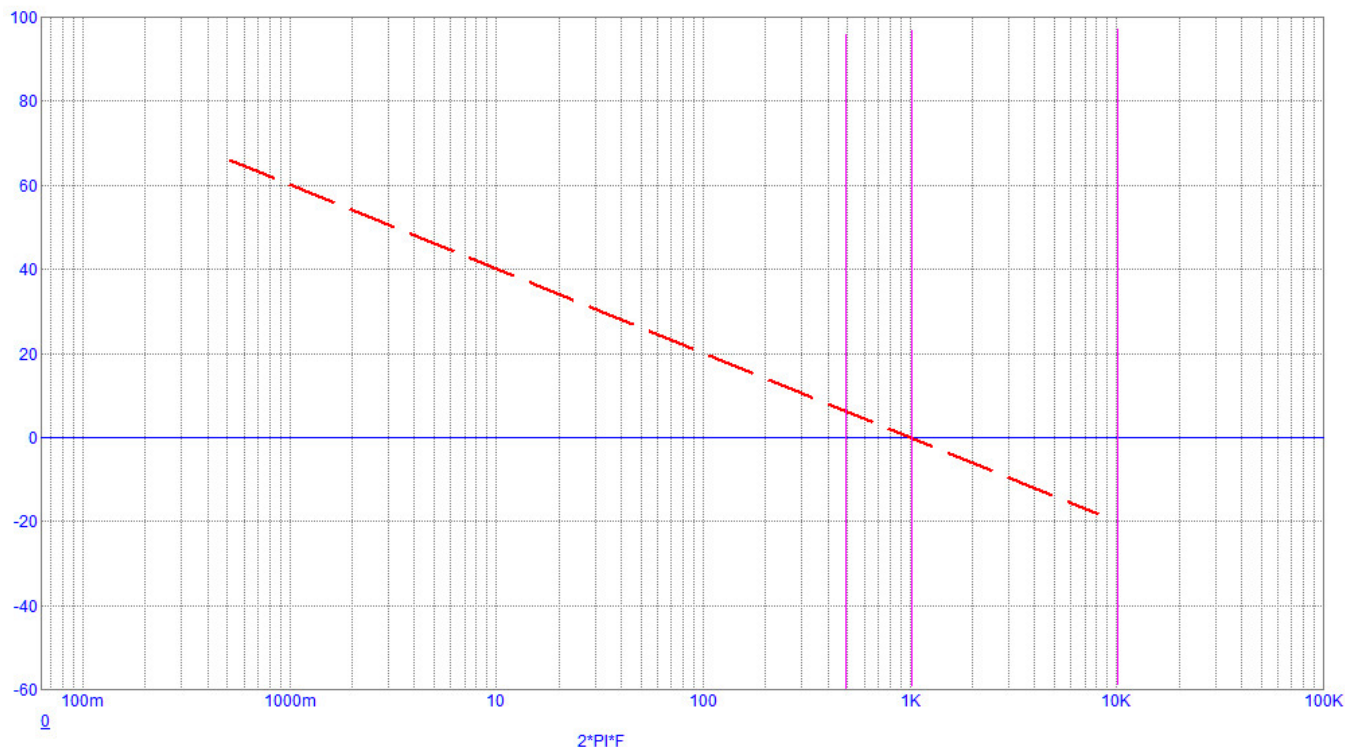
Первый участок $0 < \omega < \omega_4$ [0, 500]. Наклон -20 дБ/дек. На самой нижней частоте сопряжения $K_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg(k1 \cdot k3 \cdot k4) + K_{\text{дБ интегр}}$ Определить $K_{\text{дБ}}$ можно геометрическим способом (геометрическим сложением двух ЛАЧХ).

Второй участок $\omega_3 < \omega < \omega_1$ [500, 10 000]. Наклон $-20-40=-60\text{ дБ/дек.}$, вносимый интегрирующим звеном X3 и инерционным звеном второго порядка X5.

Третий участок $\omega > \omega_1$ [10 000, ∞]. Наклон $-20-40-20=-80\text{ дБ/дек.}$, вносимый интегрирующим звеном X3, инерционным звеном второго порядка X5 и инерционным звеном X2.

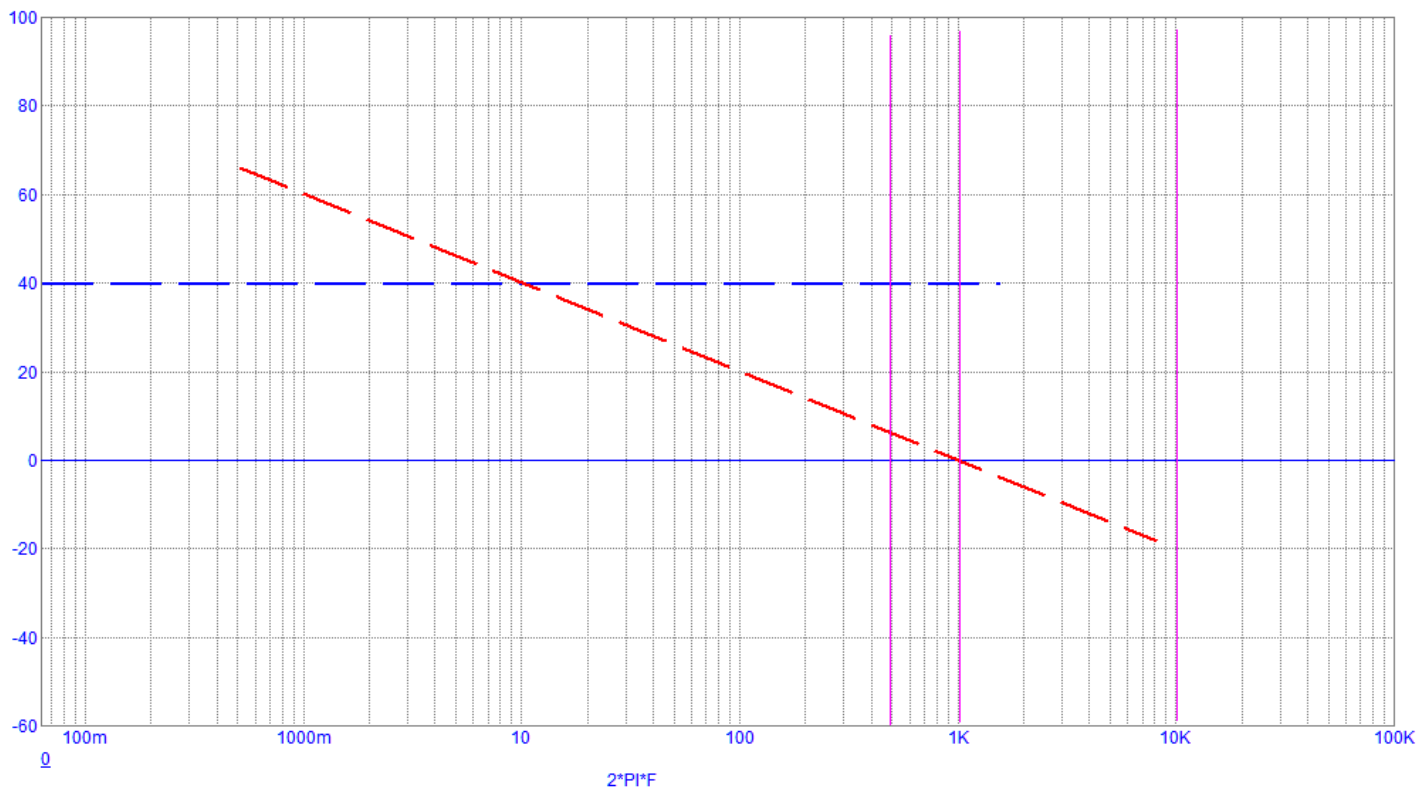
Особенности построения асимптотической ЛАЧХ разомкнутой астатической системы

Астатическая система на первом участке имеет наклон -20 дБ/дек. Коэффициент усиления на самой нижней частоте сопряжения определяется геометрическим способом. Сначала строится ЛАЧХ интегрирующего звена. Она имеет наклон -20дБ/дек и пересекает ось 0дБ в точке $\omega = 1/T = 1/0.001 = 1000$.



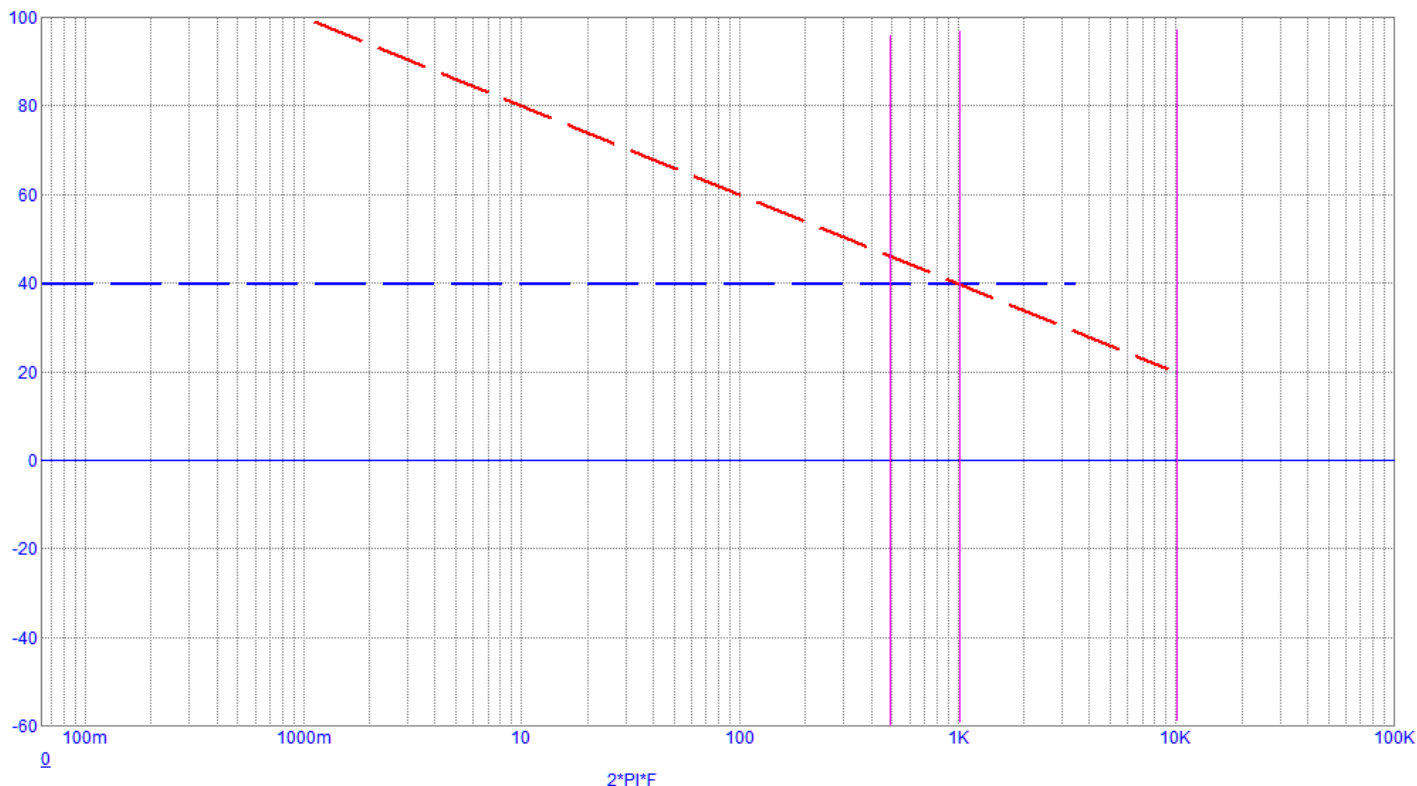
Построение ЛАЧХ астатической системы на первом участке

Строится вспомогательная ЛАЧХ системы, исключая интегрирующее звено, на участке ниже первой частоты сопряжения. Построение идет по правилам для статических систем: наклон 0 дБ/дек , коэффициент усиления $K_{дБ} = 20 \cdot \lg(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4) = 40 \text{ дБ}$.



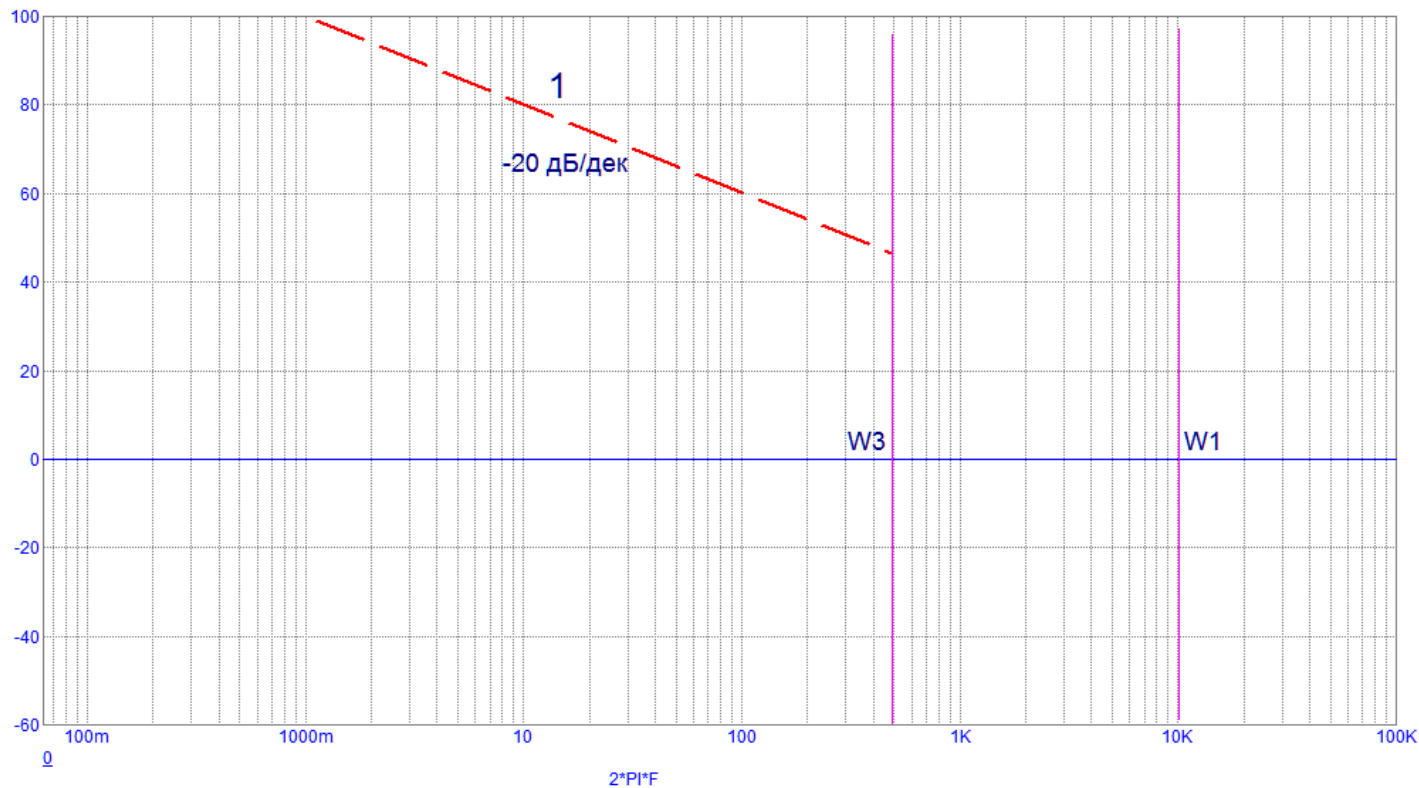
Построение ЛАЧХ астатической системы на первом участке

Перемещают ЛАЧХ интегрирующего звена вверх, чтобы графики пересеклись в точке, соответствующей частоте $\omega = 1/T = 1000$



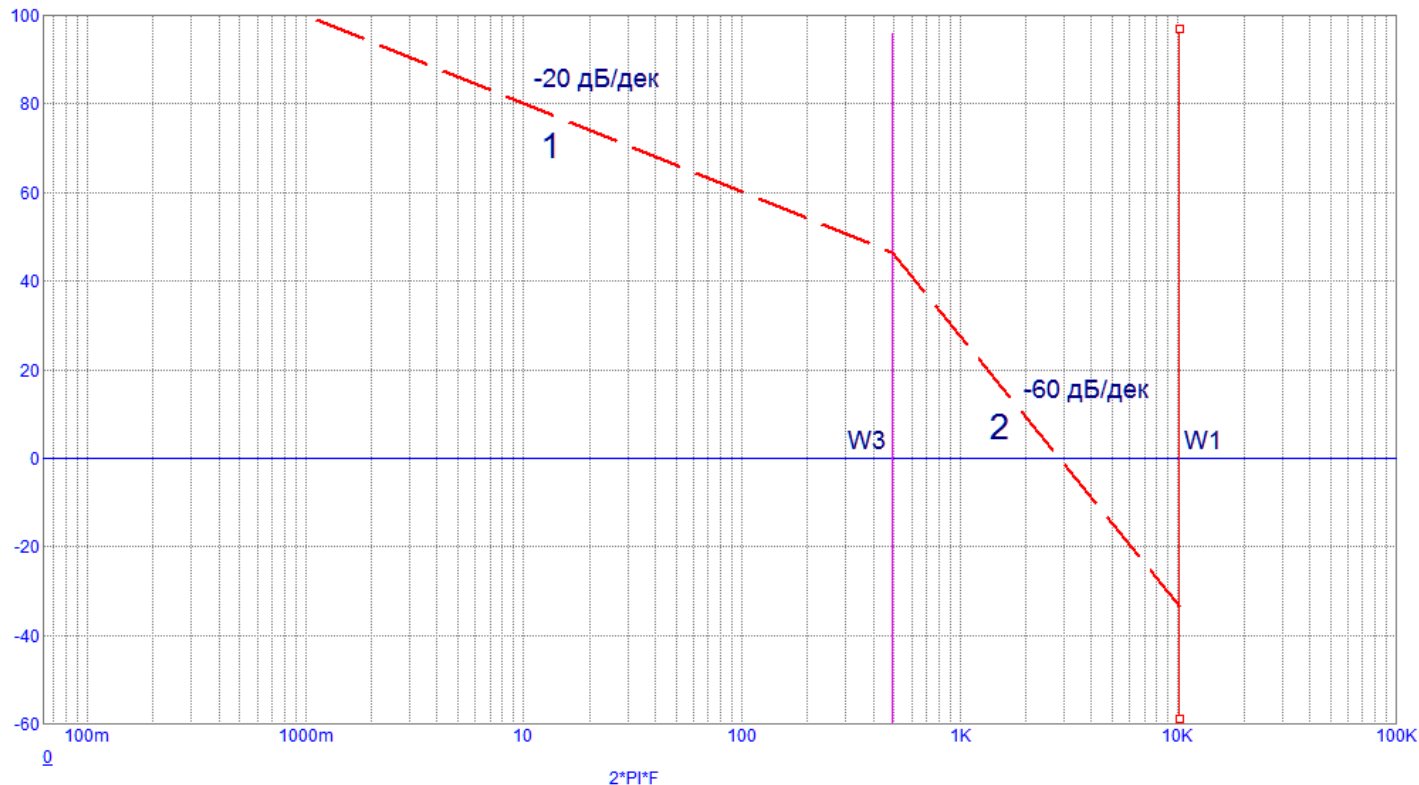
После этого вспомогательную ЛАЧХ системы без интегрирующего звена можно убирать.

Построение ЛАЧХ астатической системы на первом участке

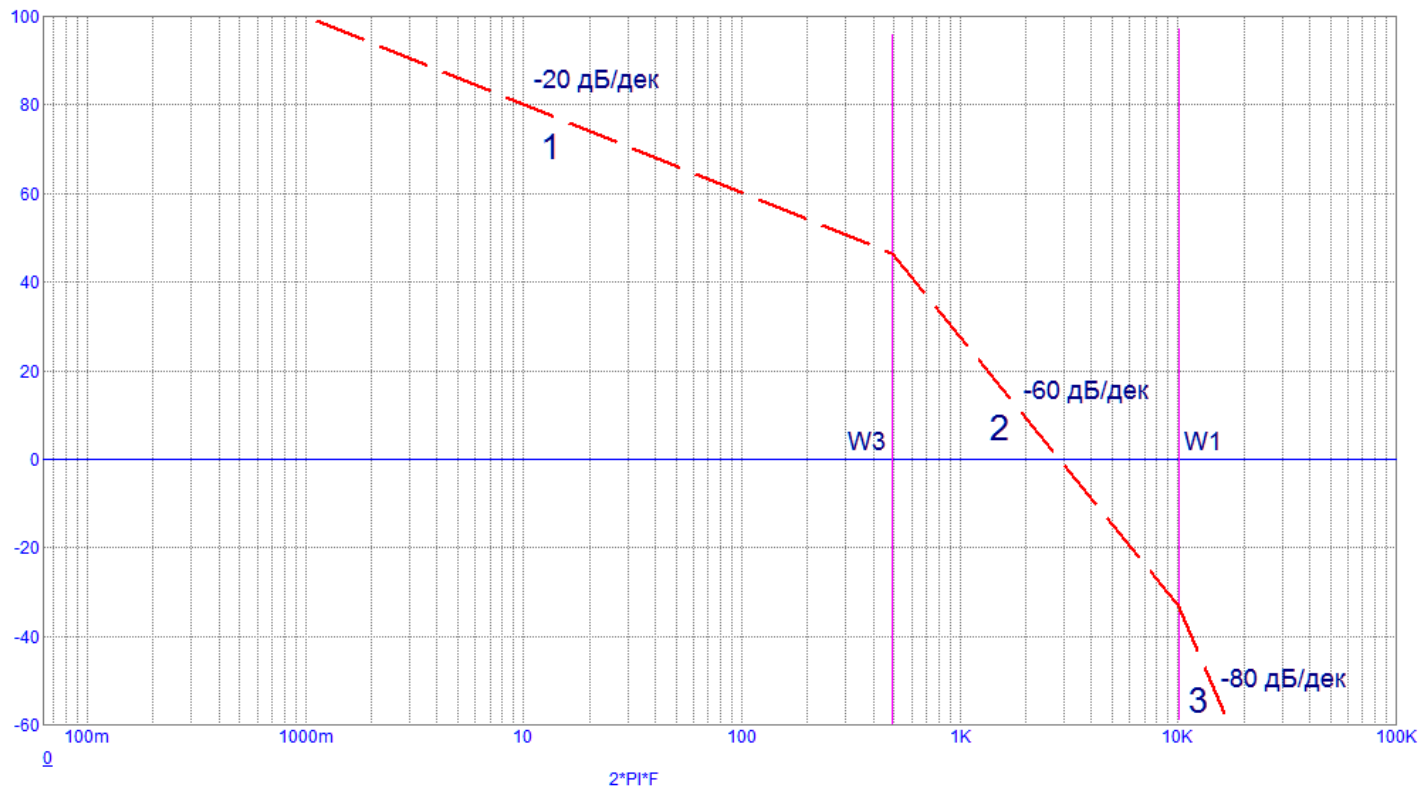


Построение ЛАЧХ астатической системы на втором участке

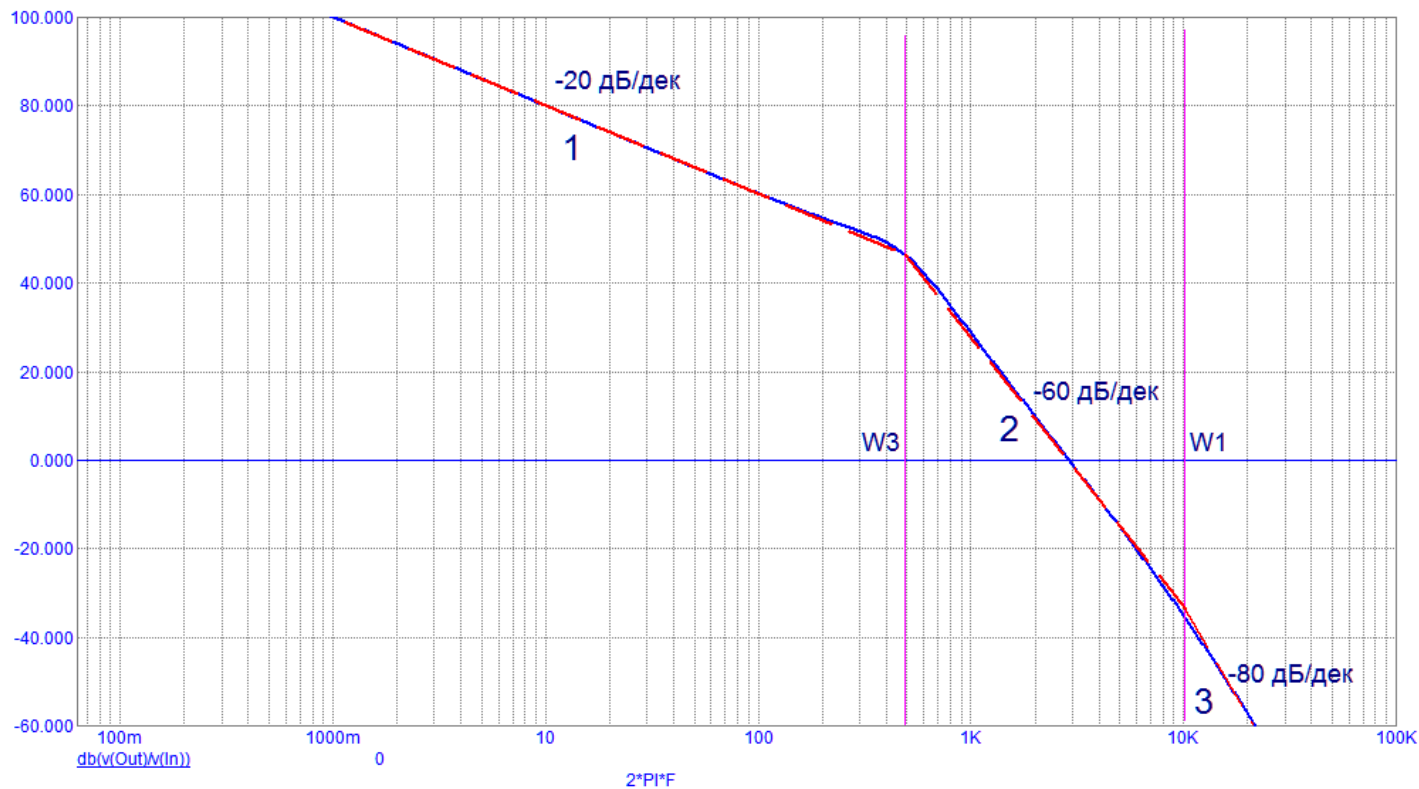
Дальше построение ведется также, как в статической системе – начиная с каждой следующей частоты сопряжения наклоны суммируются.



Построение ЛАЧХ астатической системы на третьем участке



Проверка полученной ЛАЧХ



Анализ полученной асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы

По полученной асимптотической ЛАЧХ определяется наклон в точке пересечения с осью 0 дБ.

У обоих рассмотренных выше систем он равен -60дБ/дек.

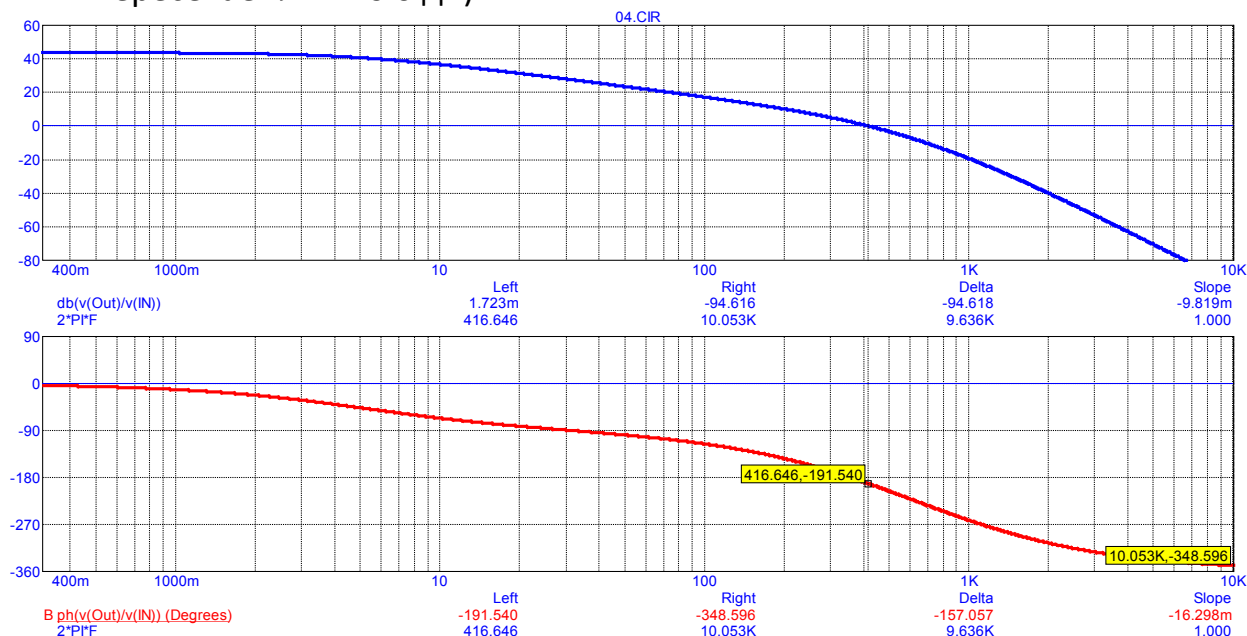
Для того, чтобы система была устойчивой и обладала хорошими динамическими свойствами, **наклон в точке пересечения** должен быть **-20 дБ/дек**, а **протяженность этого участка – не менее половины декады** в каждую сторону от точки пересечения.

Вывод: рассмотренные системы не удовлетворяет частотным критериям качества и их надо корректировать.

Этот вывод можно подтвердить, проведя моделирование в программе Micro-Cap частотных и временных характеристик нескорректированной системы.

Моделирование частотной характеристики. Определение запаса по фазе разомкнутой системы

1. Определить фазовый сдвиг φ_0 на частоте единичного усиления (на той частоте, при которой АЧХ пересекает линию 0 дБ):



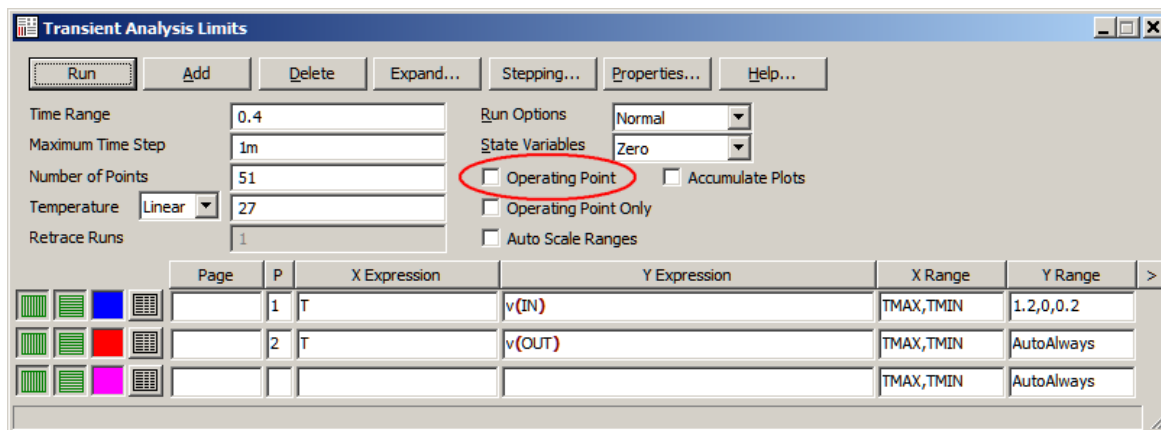
2. Вычислить запас по фазе PM (Phase Margin), можно используя курсорный режим.

$PM = \varphi_0 - (-180^\circ) = \varphi_0 + 180^\circ = -192 + 180^\circ = -12^\circ$ — запас по фазе отрицательный, следовательно замкнутая система будет неустойчива.

Проверка устойчивости замкнутой системы в режиме анализа переходных процессов TRANSIENT

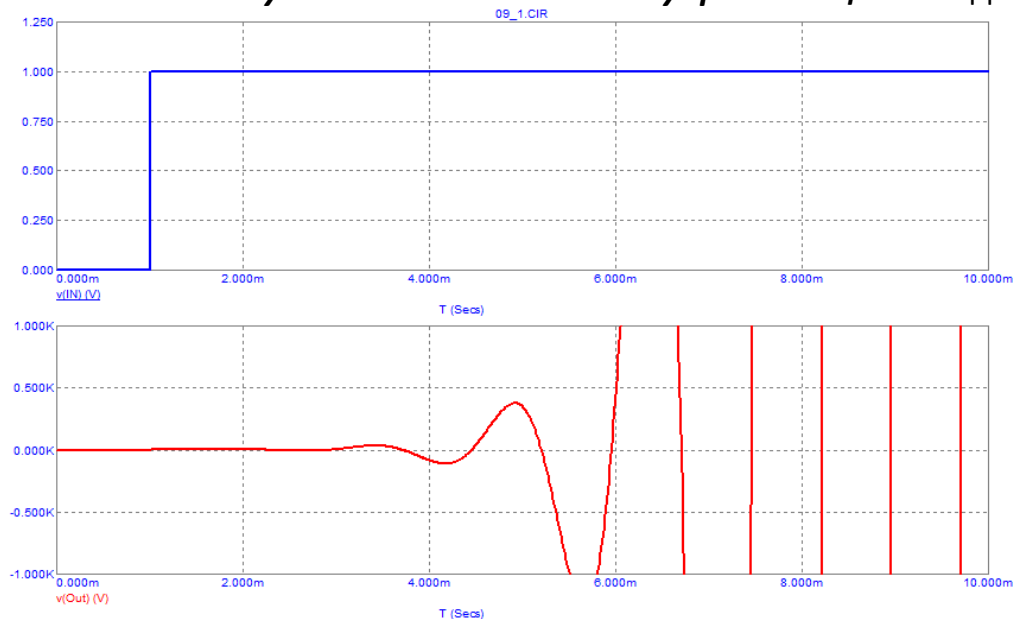
1. Проверка проводится в замкнутой системе при воздействии на схему управляющего воздействия в виде единичного скачка:

Для получения реакции на скачок флажок *Operating Point* следует снять:



Проверка устойчивости замкнутой системы в режиме анализа переходных процессов TRANSIENT

Реакция неустойчивой **замкнутой** системы на скачок **управляющего** воздействия:

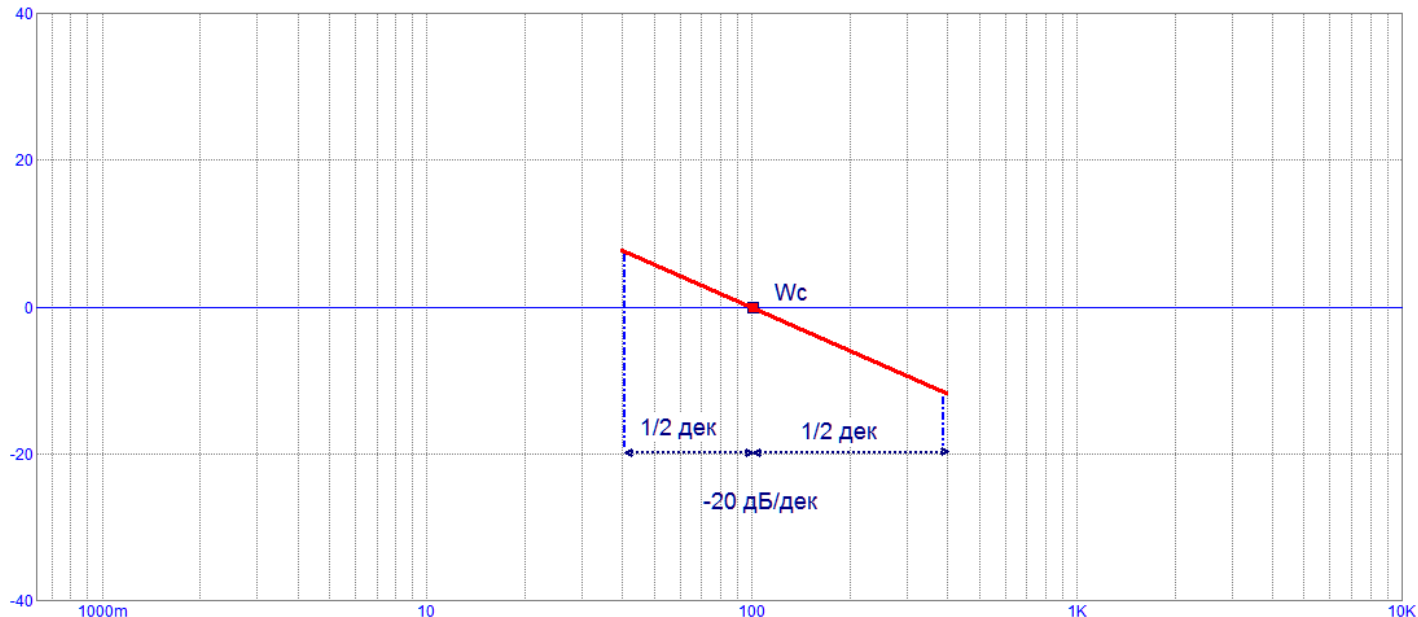


При скачке управляющего воздействия появляются колебания, амплитуда которых постоянно нарастает (теоретически до бесконечности) – система неустойчива.

Если бы запас по фазе был бы положительный и система была бы устойчивая, то нужно было проверять величину перерегулирования и время регулирования и сравнивать их с требованиями ТЗ.

Требования к желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы

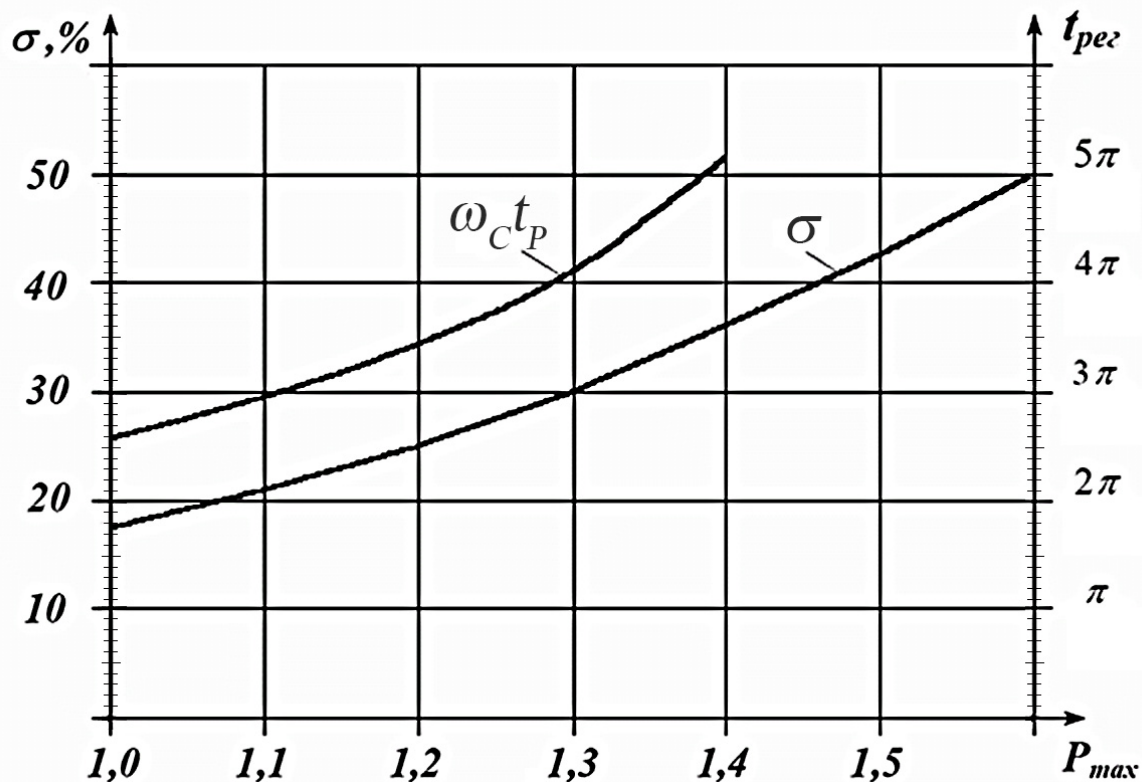
Главное требование к ЛАЧХ системы с хорошими динамическими характеристиками – ось 0 дБ должна пересекаться с наклоном -20 дБ/дек и протяженность этого участка должна быть не менее $\frac{1}{2}$ декады в каждую сторону от точки пересечения.



Частота среза W_c , на которой ЛАЧХ пересекает ось 0 дБ, определяет время регулирования в скорректированной системе. Эту частоту определяют по заданному времени регулирования t_p и заданной величине перерегулирования σ (%) при помощи диаграмм Солодовникова.

Диаграмма Солодовникова

Диаграммы Солодовникова устанавливают связь между величиной перерегулирования $\sigma\%$, временем переходного процесса t_p , максимальным значением вещественной части АФЧХ P_{\max} и частотой среза ω_c .



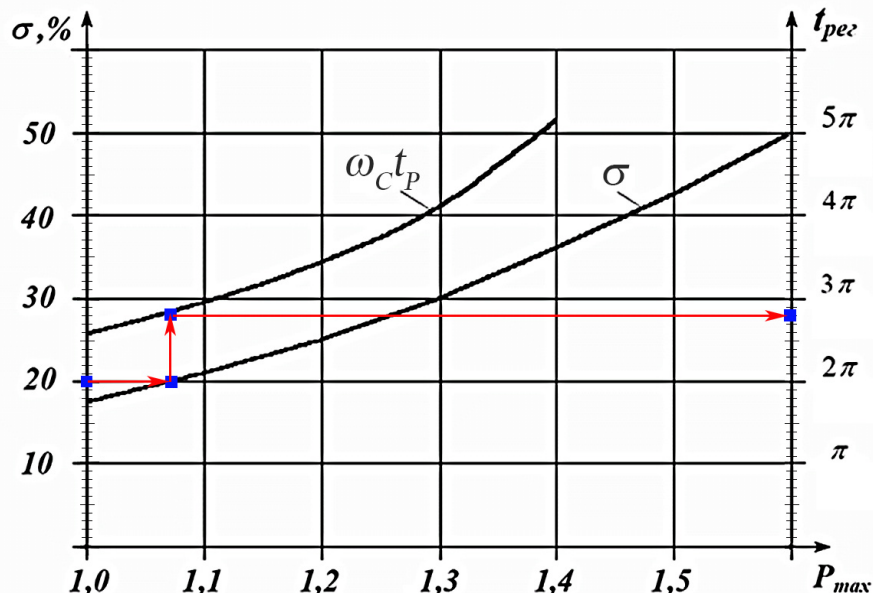
Определение частоты среза ω_c

1. По техническому заданию время регулирования $t_p=0.1$, перерегуливание $\sigma \leq 25\%$. Для определенности зададим перерегуливание $\sigma=20\%$.

Используя номограмму Солодовникова для $\sigma=20\%$, получаем значение $\omega_c t_p = 2.8\pi$

По этой величине рассчитываем частоту среза желаемой (скорректированной) ЛАЧХ разомкнутой системы:

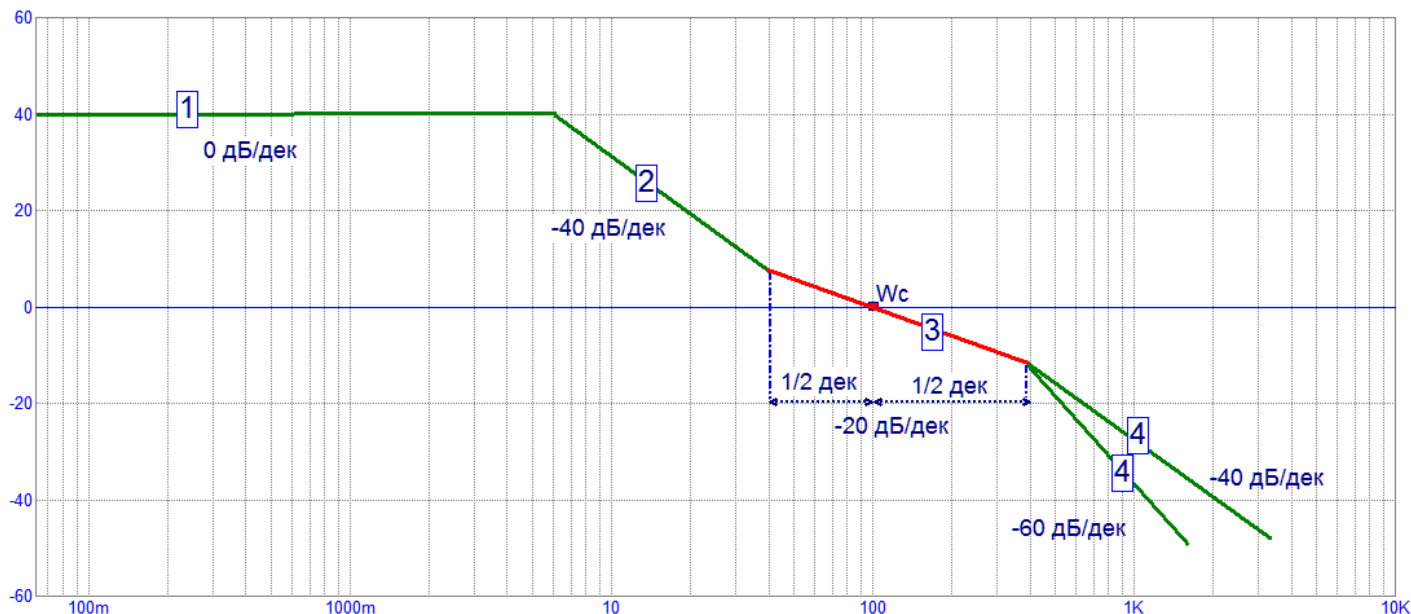
$$\omega_c = \frac{2,8\pi}{t_p} = \frac{2,8\pi}{0,1} = 88$$



Общий вид желаемой ЛАЧХ статической системы

ЛАЧХ статической системы с хорошими динамическими характеристиками:

- 1 – низкочастотный участок с наклоном 0 дБ/дек;
- 2 – участок сопряжения с наклоном -40 дБ/дек;
- 3 – среднечастотный участок с наклоном -20 дБ/дек (вблизи частоты среза W_c);
- 4 – высокочастотный участок с наклоном -40 дБ/дек или -60 дБ/дек.

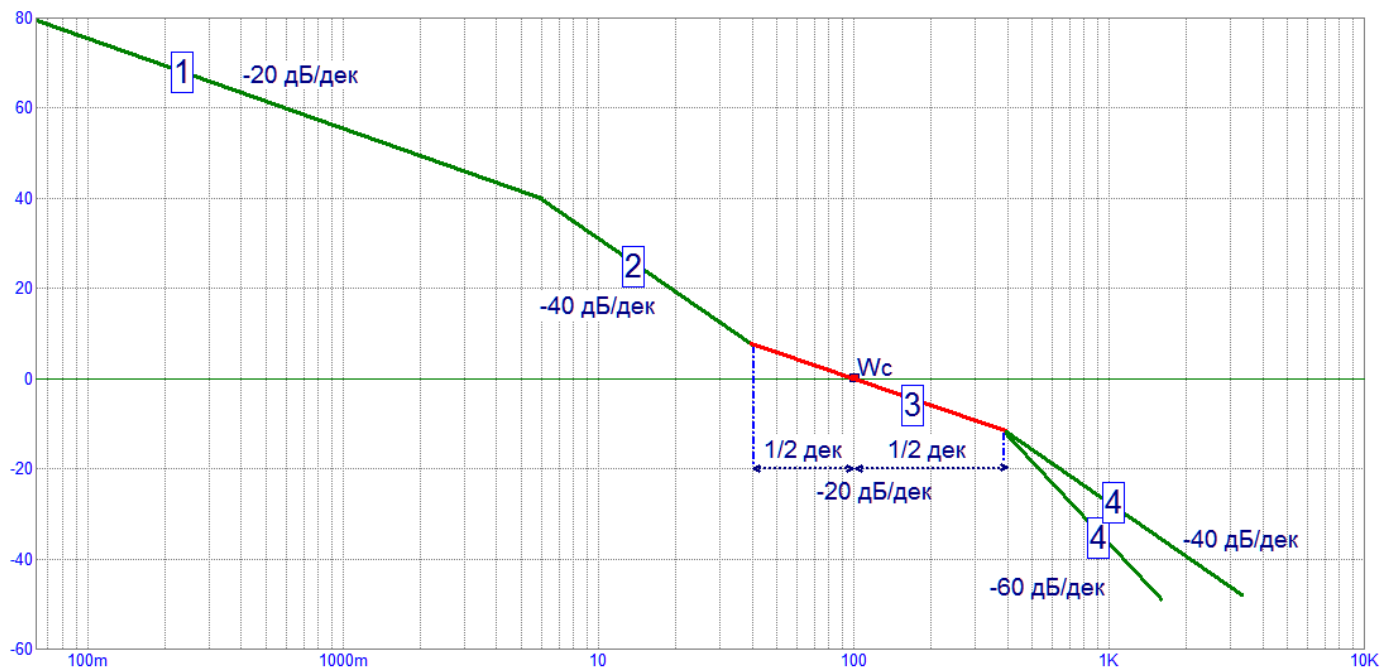


Задача коррекции – получить из исходной ЛАЧХ желаемую ЛАЧХ. Для этого в систему вводятся специальные корректирующие звенья.

Общий вид желаемой ЛАЧХ астатической системы

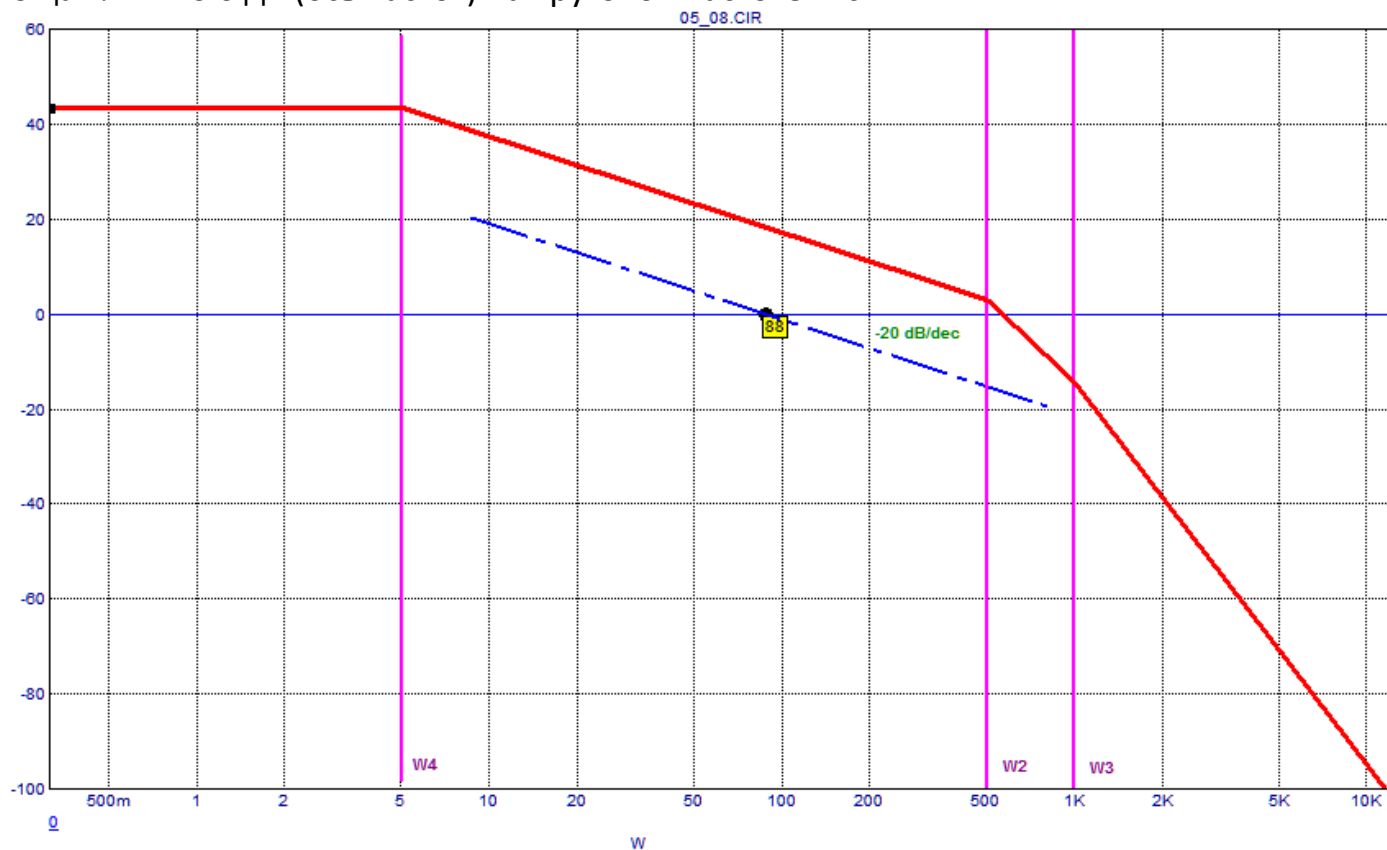
ЛАЧХ астатической системы с хорошими динамическими характеристиками:

- 1 – низкочастотный участок с наклоном -20 дБ/дек;
- 2 – участок сопряжения с наклоном -40 дБ/дек;
- 3 – среднечастотный участок с наклоном -20 дБ/дек (вблизи частоты среза W_c);
- 4 – высокочастотный участок с наклоном -40 дБ/дек или -60 дБ/дек.



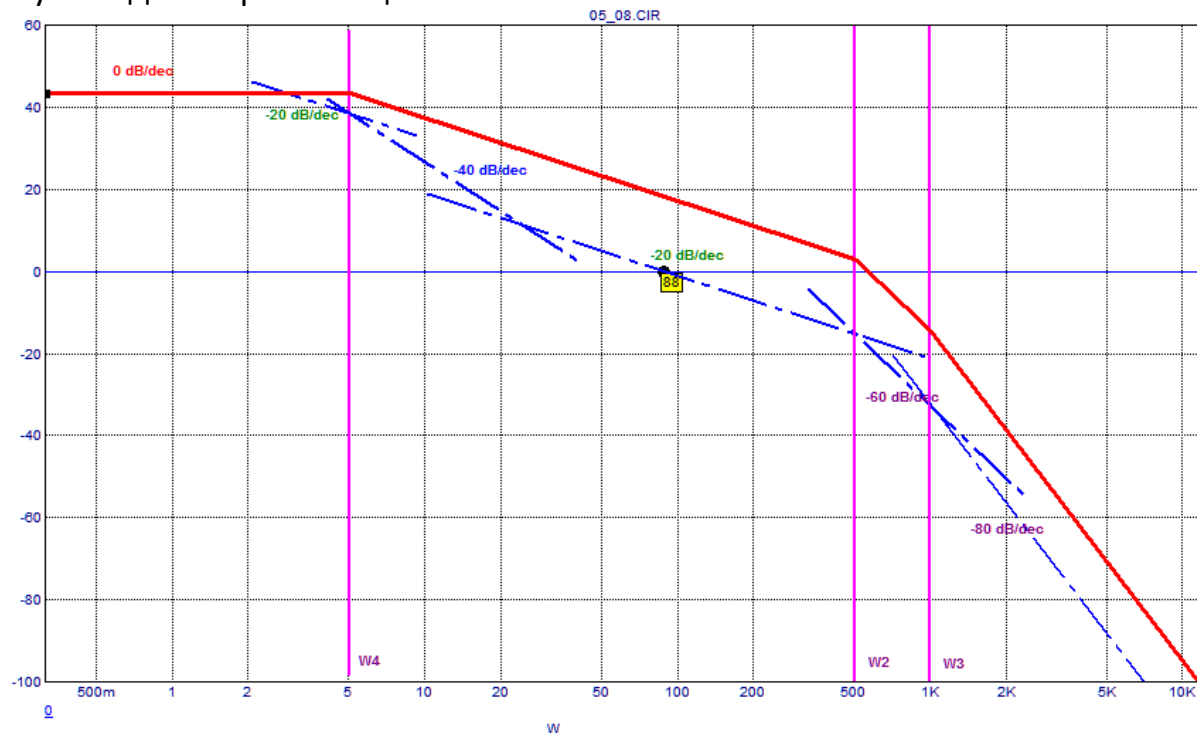
Построение *желаемой* асимптотической ЛАЧХ на среднечастотном участке

На графике ЛАЧХ рисуется асимптота желаемой ЛАЧХ с наклоном -20 дБ/дек, пересекающая линию 0 дБ (ось частот) на круговой частоте W_c .



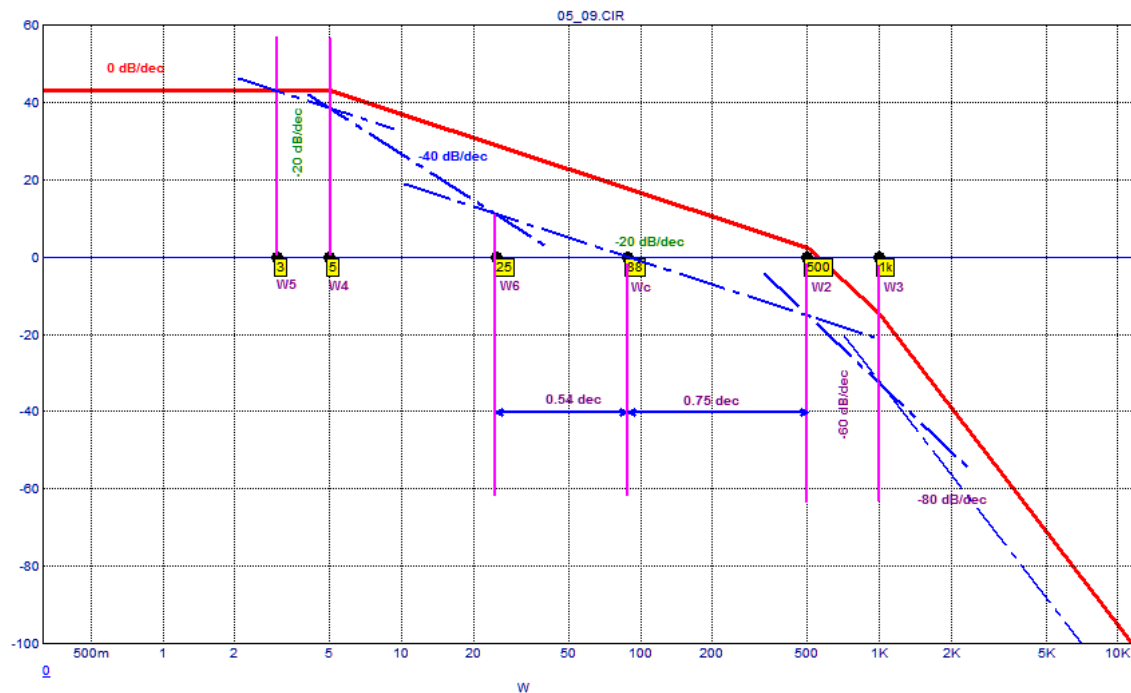
Построение *желаемой* асимптотической ЛАЧХ разомкнутой системы

На графике ЛАЧХ рисуется асимптотический участок (или участки) желаемой ЛАЧХ, сопрягающий низкочастотный участок 0 дБ/дек и среднечастотный -20 дБ/дек. Это можно сделать несколькими способами. Цель – минимизировать число звеньев коррекции, которые нужны для ее реализации.



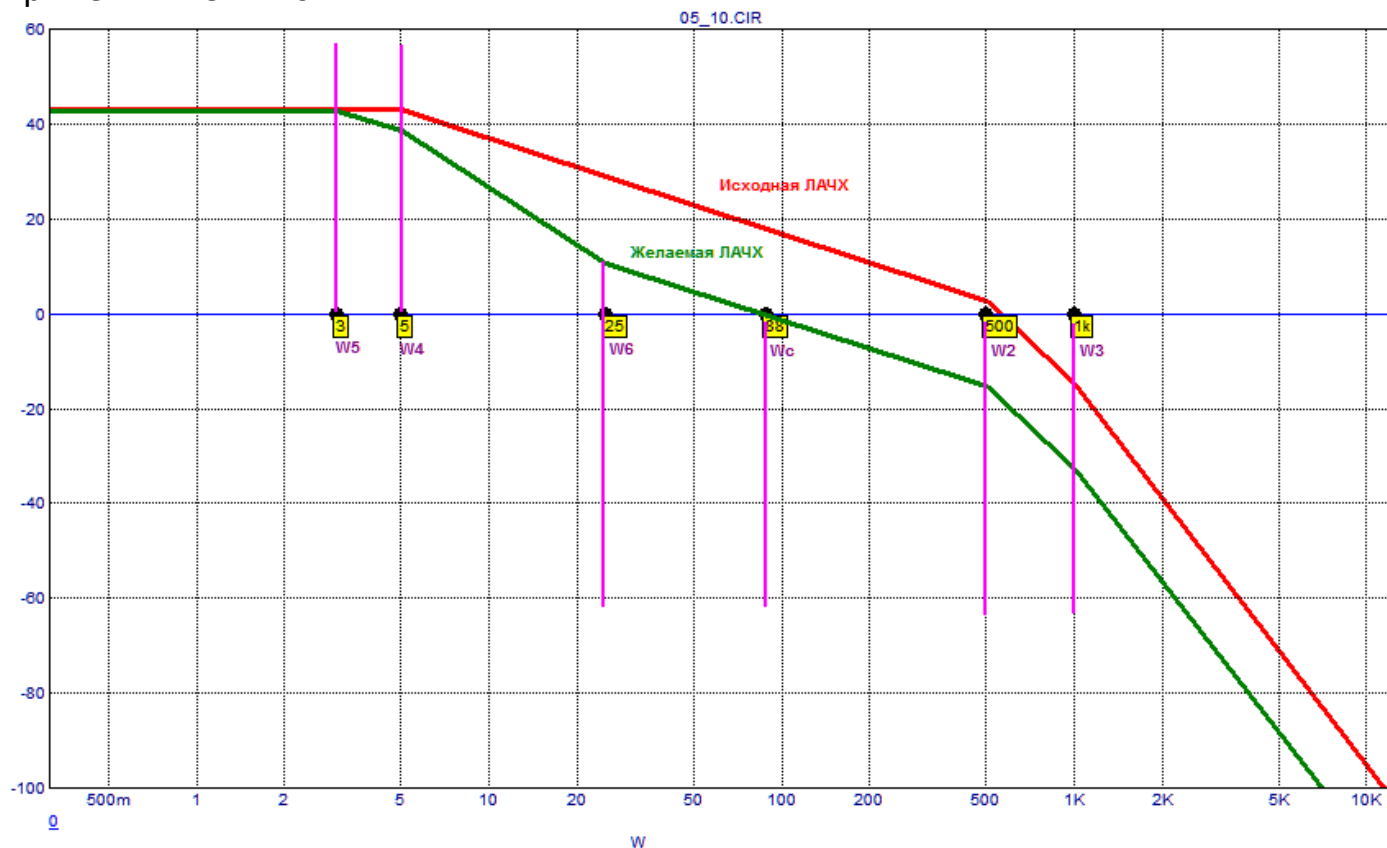
Проверка протяженности среднечастотного участка

Проверяется получившаяся протяженность участка -20 дБ/дек от частоты среза до следующей частоты сопряжения (излома ЛАЧХ). В рассматриваемом случае это отрезки $[w_6, w_c]$, $[w_c, w_2]$. Их протяженность должна быть не менее 0.5 дек (например, $\Delta F = \lg(W_c/W_6) = 0.54$ дек) т.е. частота на каждом отрезке должна меняться не менее чем в 4 раза.



Определение частот сопряжения, добавленных желаемой ЛАЧХ

Рисуется желаемая асимптотическая ЛАЧХ. Определяются дополнительные частоты сопряжения ω_5 и ω_6 .

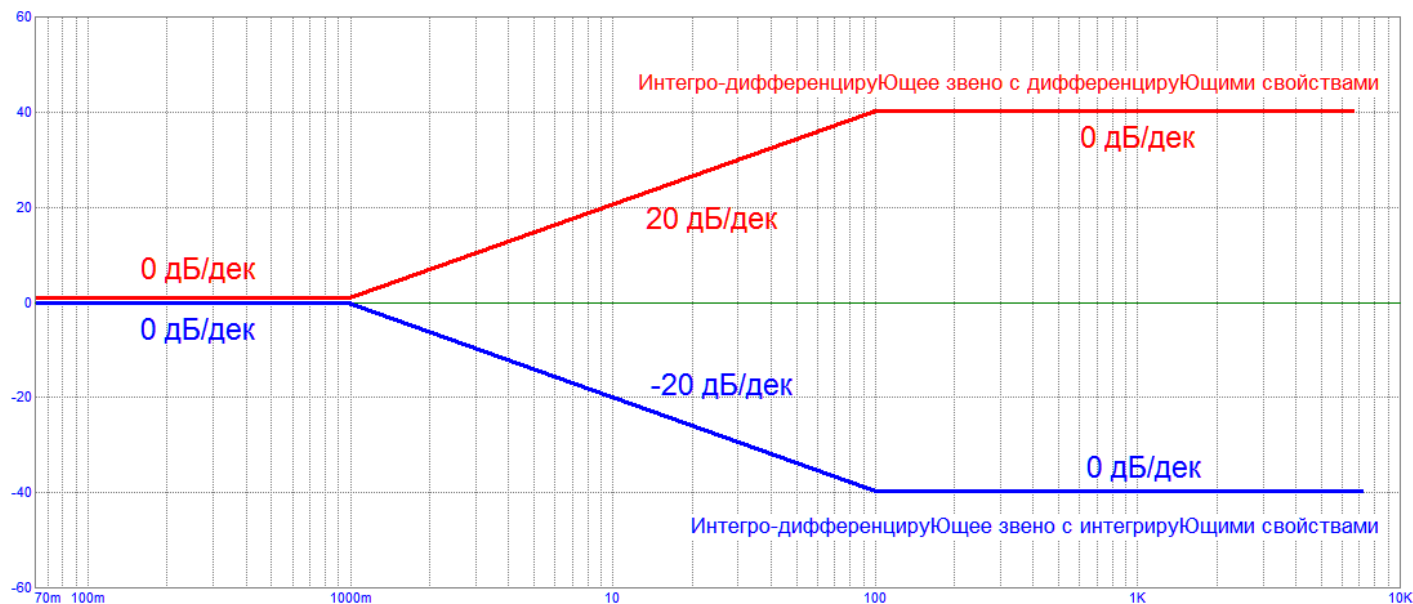


ЛАЧХ корректирующего звена

Для получения желаемой ЛАЧХ в систему нужно добавить корректирующие звенья. Для того, чтобы понять, какие звенья нужно вводить, нужно построить ЛАЧХ корректирующей цепи.

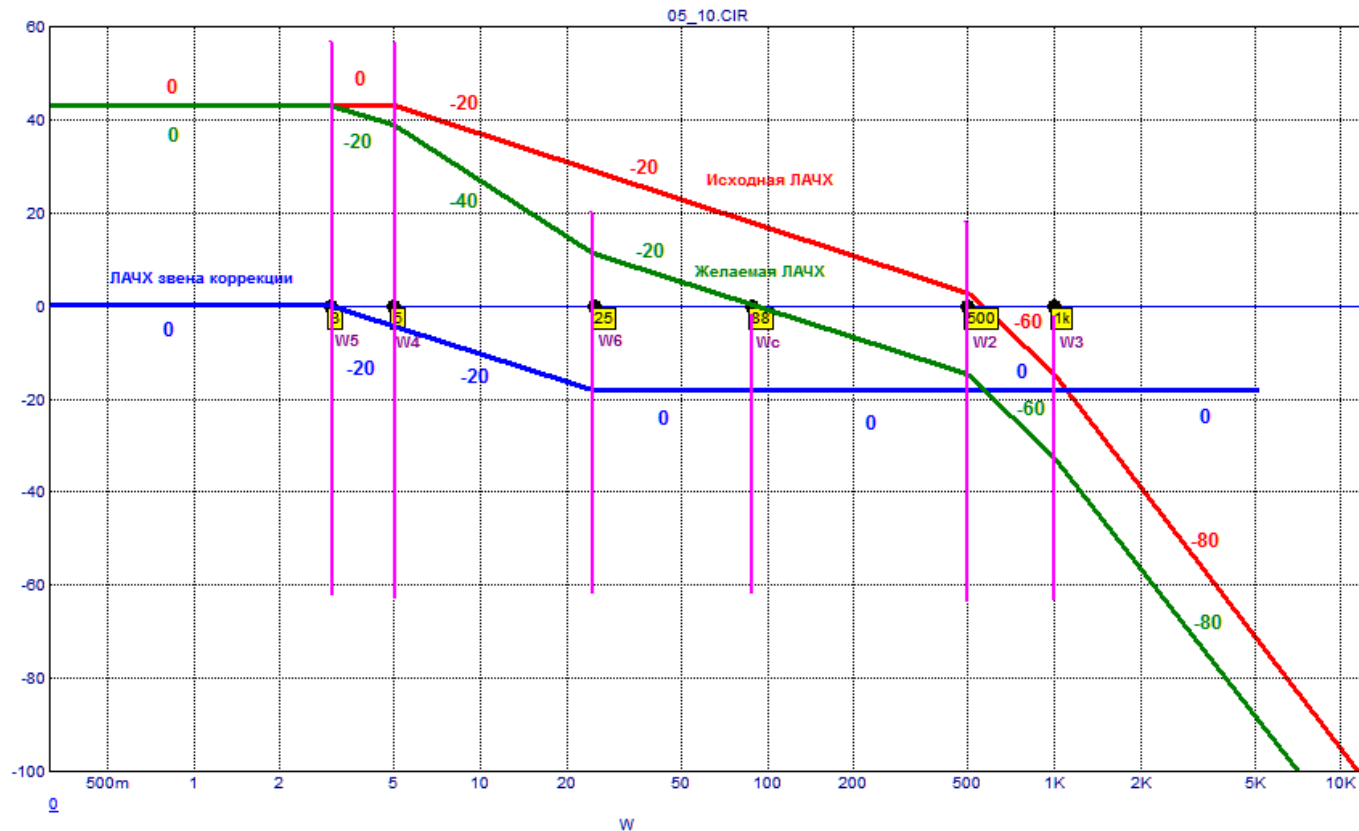
ЛАЧХ корректирующей цепи можно получить геометрическим вычитанием исходной ЛАЧХ из желаемой ЛАЧХ.

В качестве корректирующих цепей чаще всего используются интегро-дифференцирующие звенья (с интегрирующими и дифференцирующими свойствами).



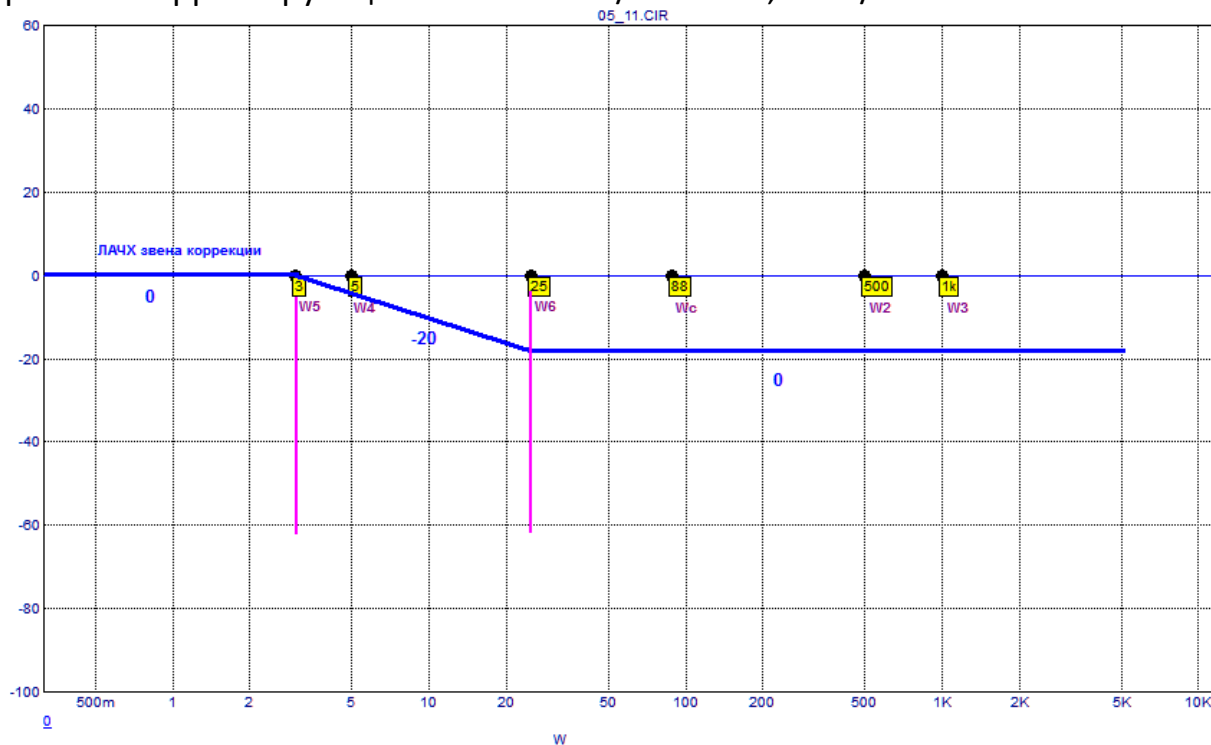
Построение асимптотической ЛАЧХ корректирующего звена

Асимптотическая ЛАЧХ корректирующего звена получается путем вычитания исходной асимптотической ЛАЧХ из желаемой асимптотической ЛАЧХ



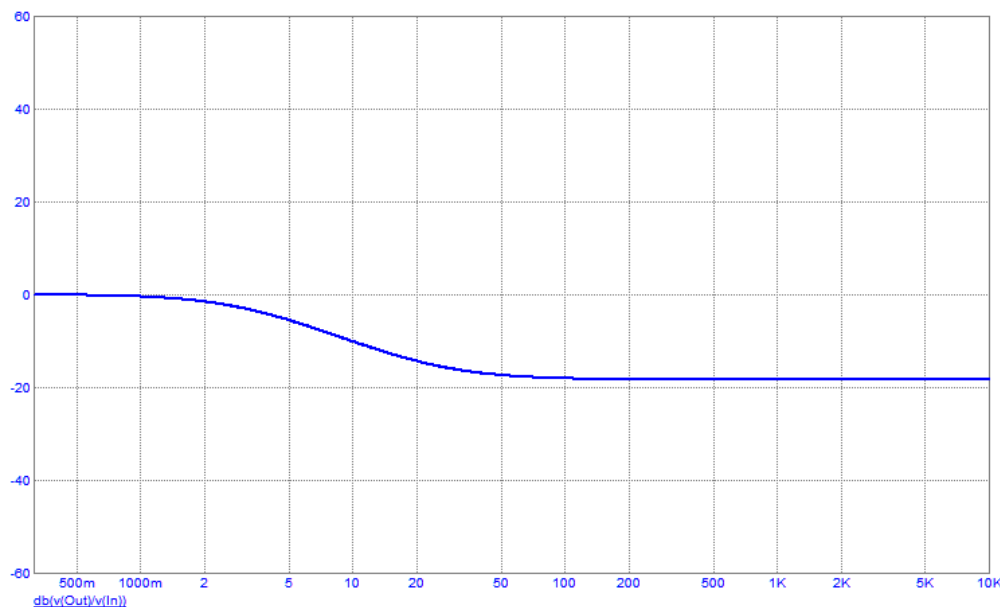
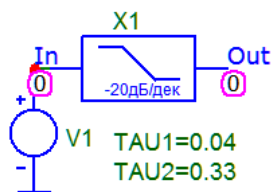
Определение параметров корректирующего звена

ЛАЧХ корректирующего звена необходимо представить в виде суммы ЛАЧХ типовых звеньев. В рассматриваемом случае это всего одно звено – интегро-дифференцирующее с интегрирующими свойствами. По частотам сопряжения $W5$ и $W6$ определяем постоянные времени корректирующего звена: $T1=1/W6=0.04$, $T2=1/W5=0.33$.



Проверка ЛАЧХ цепи коррекции

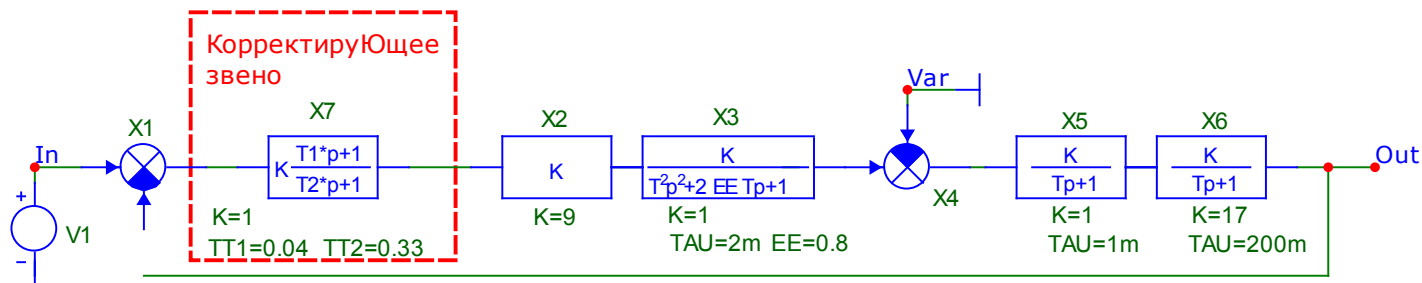
Для проверки выбора звеньев коррекции и правильности расчетов постоянных времени корректирующих звеньев необходимо построить его ЛАЧХ цепи коррекции.



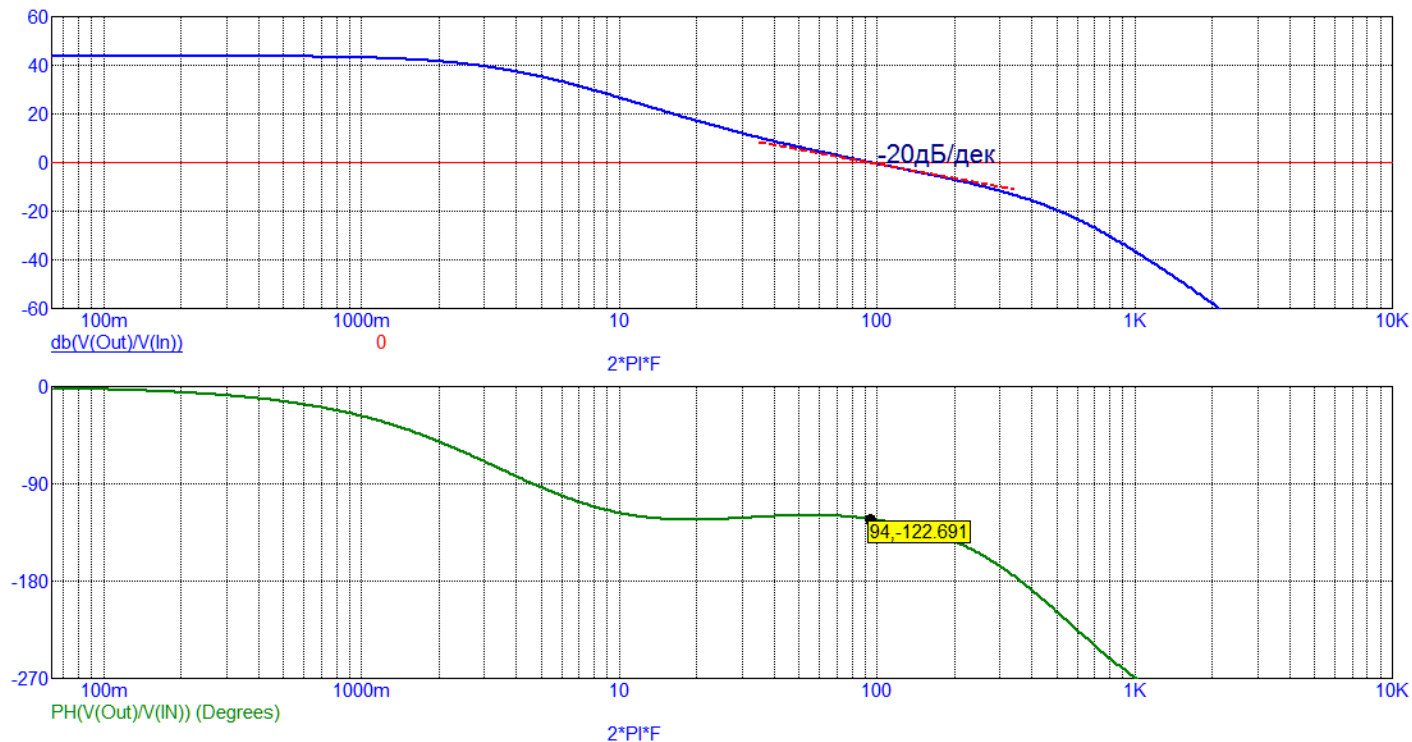
Полученная ЛАЧХ совпадает с полученной ранее асимптотической ЛАЧХ корректирующего звена, что говорит о правильности выбора звеньев и правильности расчета постоянных времени.

Скорректированная система

В состав регулятора САУ добавляется корректирующее интегро-дифференцирующее звено с рассчитанными постоянными времени. Получается скорректированная система.



Проверка частотных характеристик скорректированной системы



ЛАЧХ системы пересекает ось 0 дБ с наклоном 20 дБ/дек и протяженность этого участка не менее 0.5 декады в каждую сторону. Это критерий получения хороших динамических характеристик.

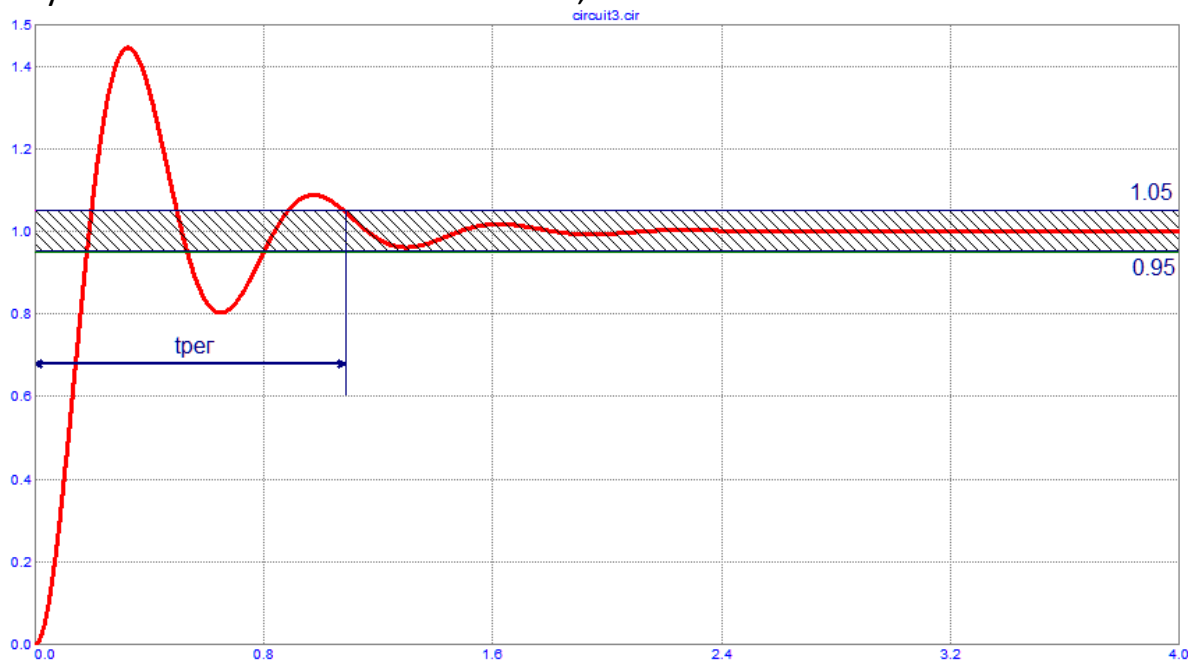
Запас по фазе у этой системы $PM = -122.7^\circ + 180^\circ = 57.3^\circ$. Такой запас по фазе также свидетельствует о хороших динамических свойствах полученной системы.

Определение перерегулирования и времени регулирования

Перерегулирование σ показывает, на сколько процентов в ходе переходного процесса превышает установившееся значение сигнала.

$$\sigma = (X_{\text{макс}} - X_{\text{уст}}) / X_{\text{уст}} * 100\%$$

Время регулирования $t_{\text{рег}}$ это время от начала подачи управляющего или возмущающего воздействия и до момента, когда выходной сигнал перестает выходить за пределы 0.95-1.05 от установившегося значения. Иными словами, когда выходной сигнал не отличается от установившегося значения более, чем на 5%.



Переходная характеристика скорректированной системы

Для построения переходной характеристики необходимо замкнуть обратную связь и выполнить анализ *Transient*

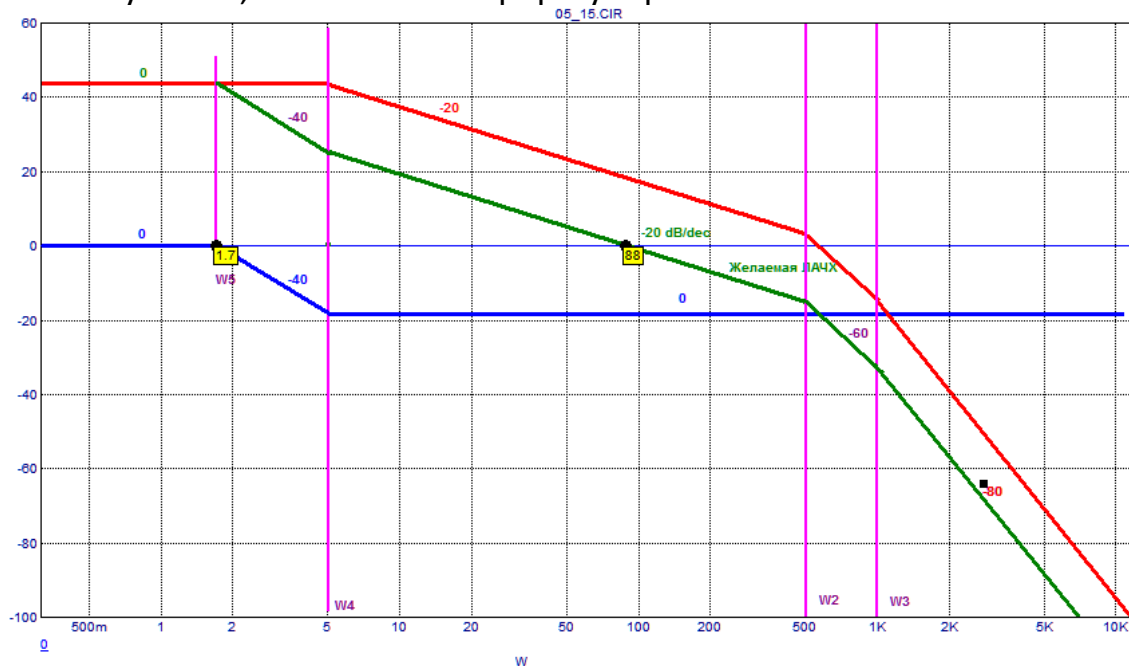


Перерегулирование $\sigma = \frac{1,142 - 1}{1} \cdot 100\% = 14\%$. Эта величина соответствует требованиям ТЗ ($\sigma < 25\%$).

Время регулирования $t_p = 0.066$ с. Эта величина соответствует требованиям ТЗ ($t_p < 0.1$ с)

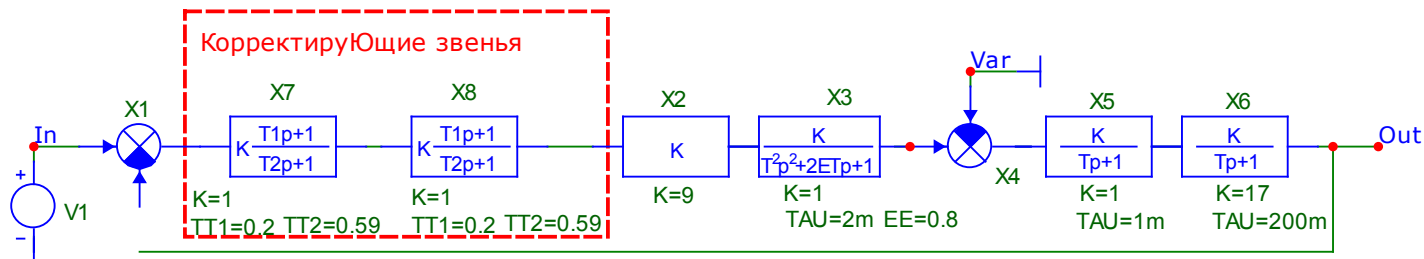
Вариант 2 желаемой ЛАЧХ

Приведенная выше желаемая ЛАЧХ **не является единственно возможной**. При ином ее построении понадобятся иные корректирующие звенья или звенья с иными параметрами. Пример: желаемая ЛАЧХ с протяженным участком -20 дБ/дек. Чем больше протяженность этого участка, тем меньше перерегулирование.



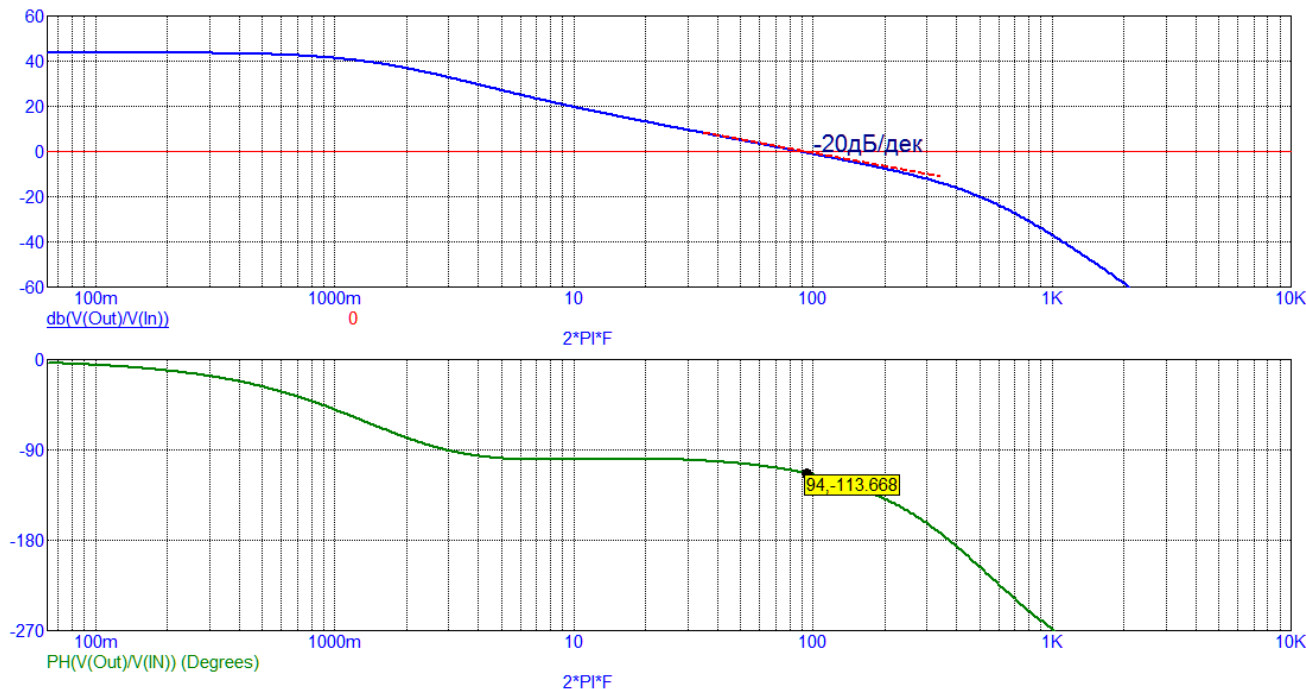
Корректирующая цепь состоит из двух интегро-дифференцирующих звеньев с постоянными времени: $T1=1/W4=0.2$, $T2=1/W5=0.59$

Система со вторым вариантом коррекции



Корректирующая цепь состоит из двух интегро-дифференцирующих звеньев с интегрирующими свойствами.

Проверка частотных характеристик скорректированной системы



ЛАЧХ системы пересекает ось 0 дБ с наклоном -20 дБ/дек и протяженность этого участка не менее 0.5 декады в каждую сторону. Это критерий получения хороших динамических характеристик.

Запас по фазе у этой системы $PM = -113.7^\circ + 180^\circ = 66.3^\circ$. Такой запас по фазе также свидетельствует о хороших динамических свойствах полученной системы (запас по фазе увеличился по сравнению с первым вариантом коррекции).

Переходная характеристика скорректированной системы

Для построения переходной характеристики необходимо замкнуть обратную связь и выполнить анализ *Transient*.



Перерегулирование $\sigma = \frac{1,015 - 1}{1} \cdot 100\% = 1,5\%$. Эта величина соответствует требованиям ТЗ ($\sigma < 25\%$).

Время регулирования $t_p = 0.020$ с. Эта величина соответствует требованиям ТЗ ($t_p < 0.1$ с)