



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Учебное пособие

Методические указания
по выполнению курсовой работы
по единому комплексному заданию по блоку дисциплины

«Основы электротехники»

МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Методические указания
по выполнению курсовой работы
по единому комплексному заданию по блоку дисциплины

«Основы электротехники»

Москва
МГТУ имени Н.Э. Баумана

2012

УДК 681.3.06(075.8)
ББК 32.973-018
И201

Методические указания по выполнению курсовой работы по единому комплексному заданию по блоку дисциплины «Основы электротехники» / Коллектив авторов – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 31 с.: ил.

В методических указаниях рассмотрены основные этапы, их последовательность и содержание по выполнению курсовой работы по единому комплексному заданию по блоку дисциплины «Основы электротехники».

Ил. 39. Табл. 5. Библиогр. 7 назв.

УДК 681.3.06(075.8)

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ.....	8
2 АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИДЕАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА.	10
3 ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ СИГНАЛА ПРОСТЕЙШЕЙ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЙ РС-ЦЕПОЧКИ.....	11
4 ВЫБОР НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ В РС- ЦЕПОЧКЕ, СОГЛАСНО КРИТЕРИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ.....	14
5 РАСЧЕТ В ОБЩЕМ ВИДЕ АЧХ И ФЧХ СКОРРЕКТИРОВАННОГО ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ.....	21
6 ВЫЧИСЛЕНИЕ АЧХ и ФЧХ ЦЕПОЧКИ С УЧЕТОМ ВСЕХ ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	26
ВЫВОДЫ.....	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.	31

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – знакомство с методами исследования линейных частотно-избирательных цепей на примере расчета дифференцирующего устройства с заранее заданными свойствами.

Блок-схема рассматриваемого устройства представлена на рис.1. Здесь $u_1(t)$ - некоторый входной сигнал (сигнал управления), ДУ - дифференцирующее устройство, формирующее сигнал по производной $u_2(t) = m \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$, где $m = const$, Σ - сумматор, $u_3(t)$ - выходной сигнал, в котором соотношение составляющих $u_1(t)$ и $u_2(t)$ можно регулировать.

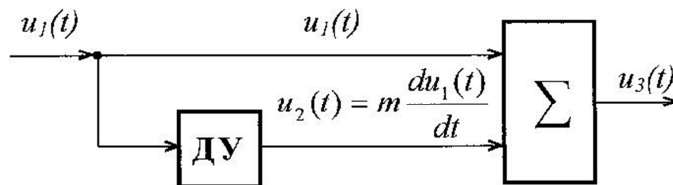


Рисунок 1 - Блок-схема устройства формирования управляющих сигналов

Входной сигнал $u_1(t)$ используется в качестве сигнала управления в некоторой системе автоматического регулирования. С целью достижения более высокого качества управления (например, для увеличения запаса устойчивости системы), кроме сигнала $u_1(t)$ должен использоваться также сигнал по производной $u_2(t)$, где m - постоянный масштабный коэффициент (как правило, $m \ll 1$). Сигнал управления и сигнал по производной суммируется на входе соответствующего суммирующего устройства [1].

Входной сигнал имеет вид:

$$u_1(t) = U_{(1)m} \cdot \sin(\omega t + \psi_{(1)}) + U_{(2)m} \cdot \sin(k\omega t + \psi_{(2)}) + U_{(q)m} \cdot \sin(q\omega t + \psi_{(q)}).$$

Две первые низкочастотные составляющие ($1 \ll k \ll q$) являются полезным сигналом управления, высокочастотная составляющая с частотой $q\omega$ - помеха. Такие высокочастотные составляющие характерны, например, для сигнала, полученного в результате демодуляции после передачи его по линии связи на несущей частоте. В этом случае полезный сигнал передается как огибающая сигнала на несущей частоте. На рис.2 огибающая показана пунктиром. Она может быть выделена в результате демодуляции, а высокочастотная составляющая подавлена, однако, как правило, не до конца (рис.3). При этом уровень помехи невелик и является для полезного сигнала допустимым [2].

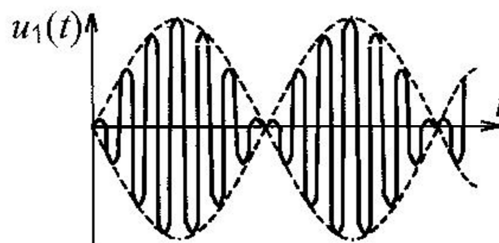


Рисунок 2 - Сигнал управления на несущей частоте

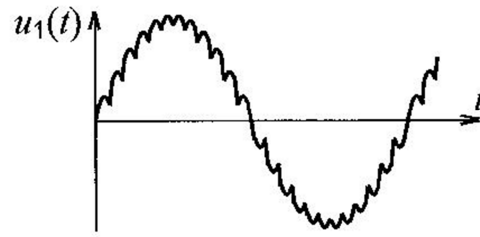


Рисунок 3 - Сигнал управления после демодуляции

Конечной целью данной курсовой работы является формирование сигнала по производной $u_2(t) = m \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$ с помощью некоторого дифференцирующего устройства с приемлемым качеством дифференцирования и уровнем высокочастотной помехи [3].

1 ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

1. Проанализировать, какими частотными характеристиками должно обладать идеальное дифференцирующее устройство, способное дифференцировать сигнал с неограниченным спектром частот. Установить, от чего зависит уровень выходного сигнала такого дифференцирующего устройства [4].

2. Проверить возможность применения для целей дифференцирования сигнала простейшей дифференцирующей r - c цепочки (рис.4)

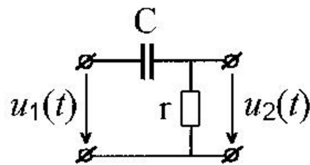


Рисунок 4 - Дифференцирующая r - c цепочка

Так как суммирование $u_1(t)$ и $m \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$ происходит на высокоомных входах сумматора, можно считать, что r - c цепочка используется в режиме холостого хода на ее выходе. Не задавая конкретных значений r и c , вывести в общем виде амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики рассматриваемой r - c цепочки, сравнить их с АЧХ и ФЧХ идеального дифференцирующего устройства и сделать вывод о принципиальной возможности проведения с ее помощью операции дифференцирования сигнала $u_1(t)$ в интересующем нас диапазоне частот от ω до $k\omega$.

3. В случае положительного результата по п.2 выбрать параметры r - c -цепочки, исходя из выбранных критериев качества работы устройства. Определить и построить АЧХ и ФЧХ устройства. С их помощью определить выходное напряжение $u_2(t)$ дифференцирующего устройства и построить график $u_2(t)$. Проанализировать полученный результат с точки зрения следующих критериев:

- а) достаточен ли уровень полезного сигнала для его дальнейшего использования в системе автоматического регулирования?
- б) достаточна ли точность дифференцирования?
- в) достаточно ли низок уровень высокочастотной помехи по сравнению с уровнем полезного выходного сигнала?

Если хотя бы с точки зрения одного из этих критериев работу дифференцирующего звена нельзя признать удовлетворительной, наметить меры по устранению обнаруженного недостатка. Выяснить при этом, не приведут ли намеченные меры к ухудшению качества по другим критериям. Оформить результаты анализа в виде предварительных выводов. Если достижение нужного качества при использовании заданной простейшей схемы дифференцирующего устройства затруднительно или невозможно, продумать и предложить улучшенный вариант (варианты) схемы, которая должна при этом оставаться пассивной. Улучшение должно состоять в том, что отмеченный недостаток в работе простейшей схемы должен устраняться, но не за счет ухудшения других необходимых качеств.

4. Вывести (в общем виде) выражения для АЧХ и ФЧХ новой, скорректированной схемы устройства. Произвести выбор тех параметров схемы, которые в данном случае могут быть признаны неизменяемыми. Если в схеме используется индуктивность, которая не может быть реализована в виде стандартного элемента, выпускаемого промышленностью, определить конструктивные параметры

катушки (число витков, сечение провода), обладающей приемлемым значением индуктивности, используя для этой цели кольцевой магнитопровод, выполненный из феррита с относительной магнитной проницаемостью μ_r , с размерами, указанными на рис.5. Активное сопротивление обмотки должно быть рассчитано и включено в схему замещения дифференцирующего устройства.

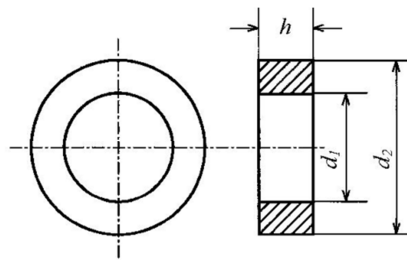


Рисунок 5 - Линейные размеры кольцевого магнитопровода

Определить алгоритм выбора изменяемого параметра (параметров) устройства, удовлетворяющего выбранным критериям качества (приемлемый уровень выходного сигнала при достаточной точности дифференцирования и низком уровне помех). Определить величину изменяемого параметра (параметров) схемы.

5. Построить графики АЧХ и ФЧХ дифференцирующего устройства с учетом выбранных величин ее параметров, определить с их помощью выходное напряжение $u_2(t) = m \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$. Проанализировать качество дифференцирования, построив и сравнив графики идеальной производной $u_2(t) = m \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$ (где $u_1(t)$) - полезный входной сигнал без учета помехи) и выходного сигнала $u_2(t)$, оценив степень их совпадения. Коэффициент m следует выбрать так, чтобы оба напряжения были соизмеримы по уровню.

Оформить этот анализ в виде окончательных выводов.

Исходные данные (9 вариант):

$$u_1(t) = \sin 400t + 0,5 \cdot \sin 800t + 0,025 \cdot \sin 120000t.$$

Таблица 1- Исходные данные

Вар.	d_1 , мм	d_2 , мм	h , мм	μ_r	$d_{пр}$, мм	$K_{(k)} / K_{(1)} \leq$	$\Delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{(k)} \leq$
9	11	17	3	3800	0,12	2,18	0,038

2 АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИДЕАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Идеальное дифференцирующее устройство – это устройство, способное осуществлять операцию дифференцирования в любом диапазоне частот входного сигнала, причём с абсолютной точностью. Технически идеальной считается операция, когда входное $u_1(t)$ и выходное $u_2(t)$ напряжения идеального дифференцирующего звена связаны соотношением:

$$u_2(t) = m \cdot \frac{du_1(t)}{dt},$$

где $m = \text{const}$ – некоторый произвольный коэффициент пропорциональности (обычно $m \ll 1$).

Вычислим в общем виде амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики идеального дифференцирующего устройства. Рассмотрим входной сигнал $u_1(t)$, как синусоидальную функцию в общем виде, и переведём её в комплексную форму:

$$u_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_1) \doteq U_{1m} \cdot e^{-j\psi_1}.$$

Теперь вычислим производную входного сигнала, домножив её на коэффициент пропорциональности m :

$$m \cdot \frac{du_1(t)}{dt} = m \cdot U_{1m} \cdot \sin\left(\omega t + \psi_1 + \frac{\pi}{2}\right) \doteq m \cdot \omega \cdot U_{1m} \cdot e^{-j(\psi_1 + \frac{\pi}{2})} = U_{2m} \cdot e^{-j\psi_2}$$

Таким образом, АЧХ идеального дифференцирующего устройства может быть получена, как отношение модулей амплитуд входного и выходного напряжений:

$$K(\omega) = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = \frac{m \cdot \omega \cdot U_{1m}}{U_{1m}} = m \cdot \omega;$$

ФЧХ равна разности начальных фаз напряжений:

$$\alpha(\omega) = \psi_2 - \psi_1 = \psi_1 + \frac{\pi}{2} - \psi_1 = \frac{\pi}{2}.$$

В общем виде, амплитудно- и фазо-частотные характеристики идеального дифференцирующего устройства могут быть представлены в виде графиков (рис. 6 и рис. 7):

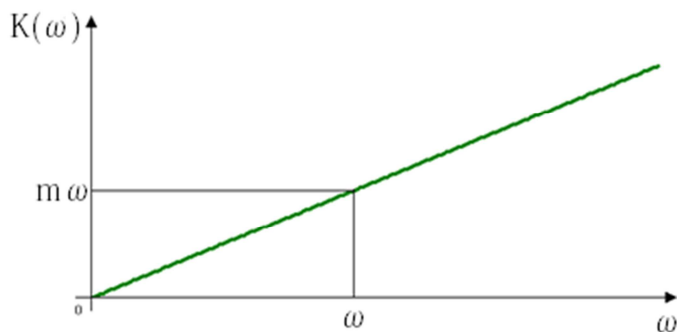


Рисунок 6 - АЧХ идеального дифференцирующего устройства



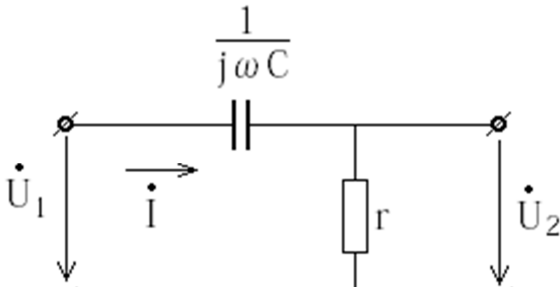
Рисунок 7 - ФЧХ идеального дифференцирующего устройства

Анализируя частотные характеристики идеального дифференцирующего устройства, можно сделать вывод о том, что амплитуда выходного сигнала прямо пропорциональна его частоте во всём диапазоне частот, что, вообще говоря, не является приемлемым, так как частота помехи на 3 порядка превосходит частоты полезного сигнала, и, следовательно, амплитуда помехи на выходе будет усилена в 1000 раз больше, чем амплитуда полезного сигнала. Что же касается фазо-частотной характеристики, то идеальное дифференцирующее устройство изменяет фазу входного сигнала на $\frac{\pi}{2}$ во всём диапазоне частот, что обеспечивает абсолютную точность дифференцирования на любой частоте, как и должно быть в идеальном устройстве.

3 ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ СИГНАЛА ПРОСТЕЙШЕЙ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЙ RC- ЦЕПочки

Так как суммирование $u_1(t)$ и $m \cdot \frac{du_1(t)}{dt}$ происходит на высокоомных входах сумматора, можно считать, что rc -цепочка используется в режиме холостого хода на её выходе. Выведем в общем виде амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики rc -цепочки.

Для этого запишем уравнения Кирхгофа для rc -цепочки в комплексной форме (рис. 8):



$$i \left(\frac{1}{j\omega C} + r \right) - \dot{U}_1 = 0$$

$$ir - \dot{U}_2 = 0$$

Рисунок 8 - К расчету дифференцирующей rc -цепочки комплексным методом

Комплексный коэффициент передачи напряжения может быть найден, как отношение комплексных амплитуд, либо как отношение действующих значений напряжений:

$$K(j\omega) = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{r}{\frac{1}{j\omega C} + r} = \frac{(r\omega C)^2}{1+(r\omega C)^2} + j \frac{r\omega C}{1+(r\omega C)^2} = K_1(\omega) + jK_2(\omega)$$

Составляющие $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$ называются соответственно действительной и мнимой частотными характеристиками.

Отсюда, АЧХ:

$$K(\omega) = \sqrt{K_1(\omega)^2 + K_2(\omega)^2} = \sqrt{\frac{(r\omega C)^4 + (r\omega C)^2}{(1+(r\omega C)^2)^2}} = \frac{rC}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2} + (rC)^2}} \quad (1)$$

ФЧХ:

$$\alpha(\omega) = \arctg\left(\frac{K_2(\omega)}{K_1(\omega)}\right) = \arctg\left(\frac{r\omega C (1+(r\omega C)^2)}{(1+(r\omega C)^2) (r\omega C)^2}\right) = \arctg\left(\frac{1}{r\omega C}\right) \quad (2)$$

В общем виде, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики дифференцирующей rc -цепочки могут быть представлены в виде графиков (рис.9 и рис. 10):

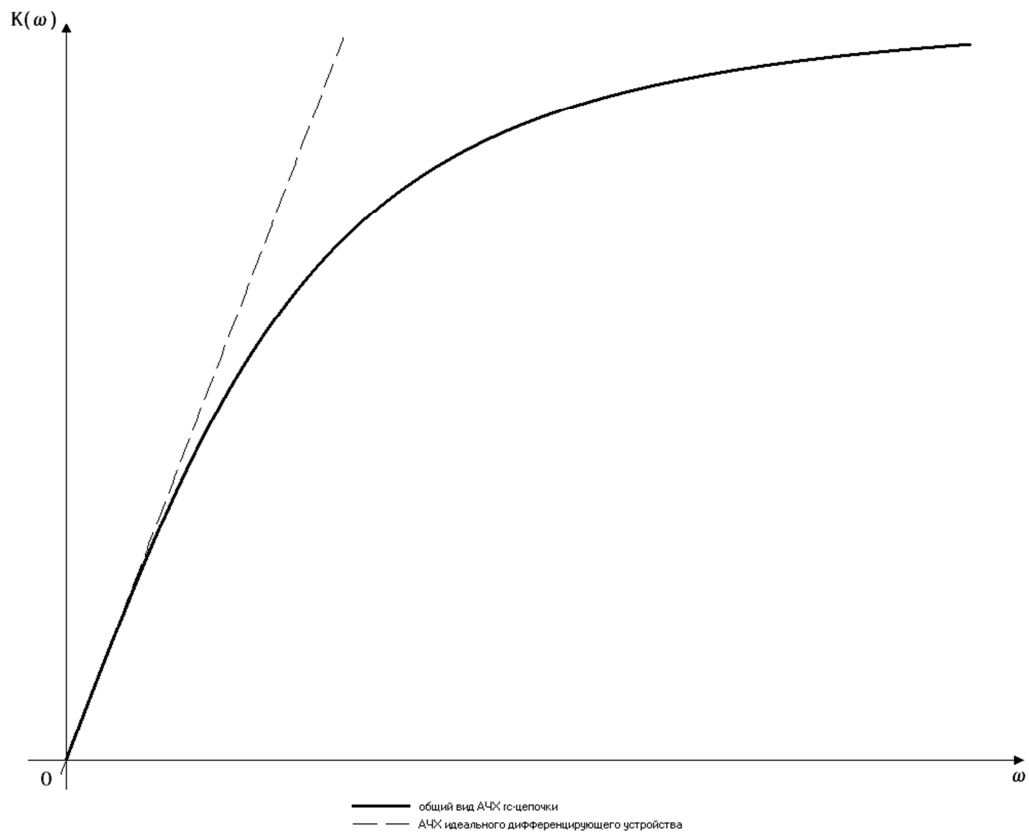


Рисунок 9 - Общий вид АЧХ дифференцирующей rc -цепочки в сравнении с АЧХ идеального дифференцирующего устройства

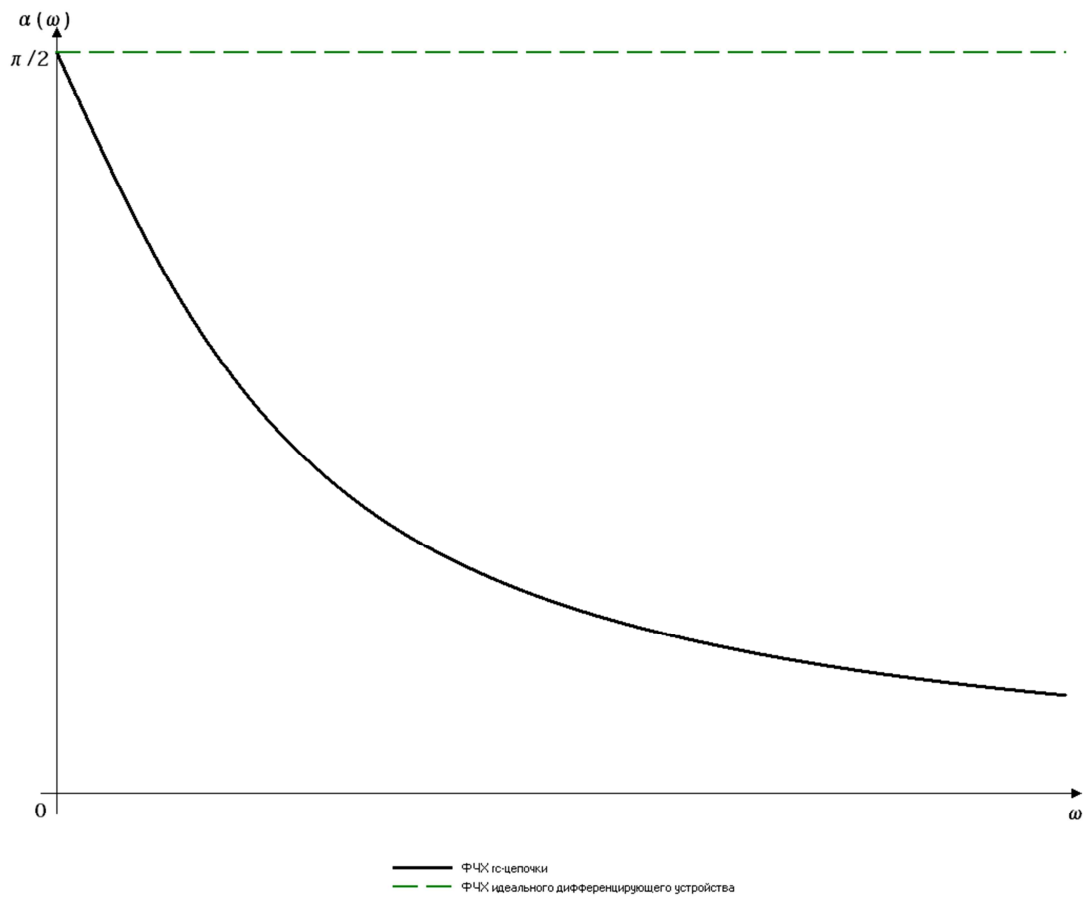


Рисунок 10 - Общий вид ФЧХ дифференцирующей rc -цепочки в сравнении с ФЧХ идеального дифференцирующего устройства

Анализируя амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики дифференцирующей rc -цепочки можно сделать следующие выводы:

1) В области низких частот АЧХ rc -цепочки практически линейна и совпадает по форме с низкочастотной областью АЧХ идеального дифференцирующего устройства. При такой форме АЧХ, после дифференцирования возможно сохранится соотношение между амплитудами полезного сигнала, что требуется в техническом задании.

2) В области высоких частот $K(\omega) \rightarrow 1$, т.е. амплитуда помехи не будет многократно увеличена, как в случае с идеальным дифференцирующим устройством. Возможно, что при определённых параметрах rc -цепочки будет обеспечена её достаточная помехозащищённость.

3) При некоторых значениях параметров rc -цепочки, её фазо-частотная характеристика будет оставаться в районе $\frac{\pi}{2}$ в течении достаточно длительного диапазона частот. Таким образом может быть достигнуто требование по точности дифференцирования из технического задания.

Таким образом, rc -цепочку возможно использовать в качестве дифференцирующего устройства, если удастся так подобрать её параметры, чтобы выполнялись все три критерия качества из технического задания.

4 ВЫБОР НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ В RC- ЦЕПОЧКЕ, СОГЛАСНО КРИТЕРИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

При анализе формул (1) и (2) можно заметить, что сопротивление резистора r и ёмкость конденсатора C входят в формулы АЧХ и ФЧХ только в виде произведения $\tau=r \cdot C$. Это произведение является постоянной времени для rc -цепочки. Известно, что приемлемая точность дифференцирования обеспечивается в том случае, когда постоянная времени цепи хотя бы на два порядка меньше наименьшего интервала времени, в пределах которого функция $u_I(t)$ изменяется с наибольшей скоростью. В данном случае достаточно, чтобы τ была на два порядка меньше половины периода высшей гармоники полезного сигнала, т.е. $\tau = r \cdot C = \frac{T_{(2)}}{200}$. Период высшей гармоники полезного сигнала определяется, как $T_{(2)} = \frac{2\pi}{\omega_{(2)}} = \frac{2\pi}{800}$. Тогда

$$\tau = r \cdot C = \frac{T_{(2)}}{200} = \frac{2\pi}{800 \cdot 200} = \frac{\pi}{80000} \approx 3,927 \cdot 10^{-5}(\text{с}).$$

Выберем ёмкость $C = 1\text{мкФ}$, тогда сопротивление $r = 39,27 \approx 40$ (Ом).

С учётом выбранных r и C окончательно получаем $\tau = 4 \cdot 10^{-5}(\text{с})$. Для этой постоянной времени построим амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики.

$$\text{По формуле (1): } K(\omega) = \frac{rC}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2} + (rC)^2}} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2} + 16 \cdot 10^{-10}}}.$$

Графики представлены на рис. 11 и рис. 12.

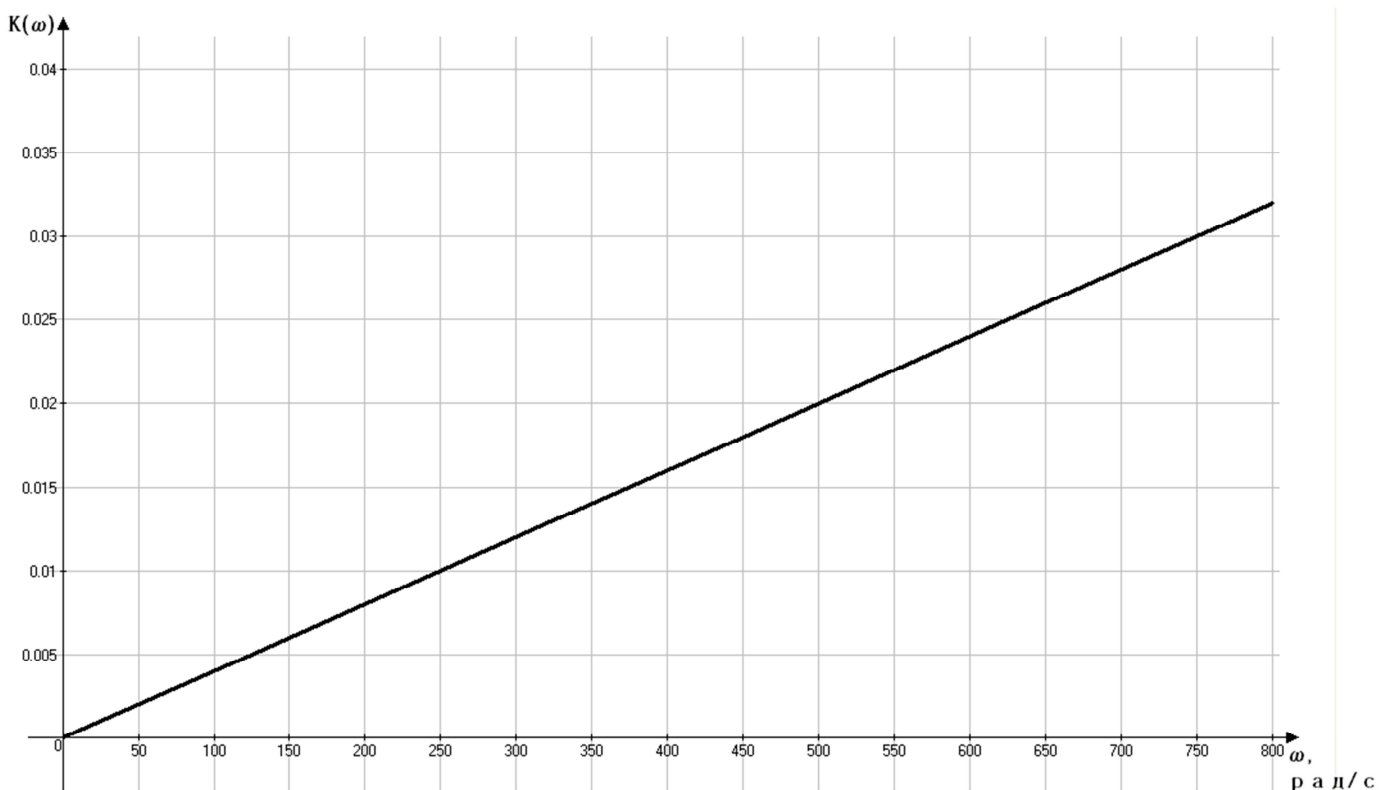


Рисунок 11 - АЧХ rc -цепочки в диапазоне частот полезного сигнала

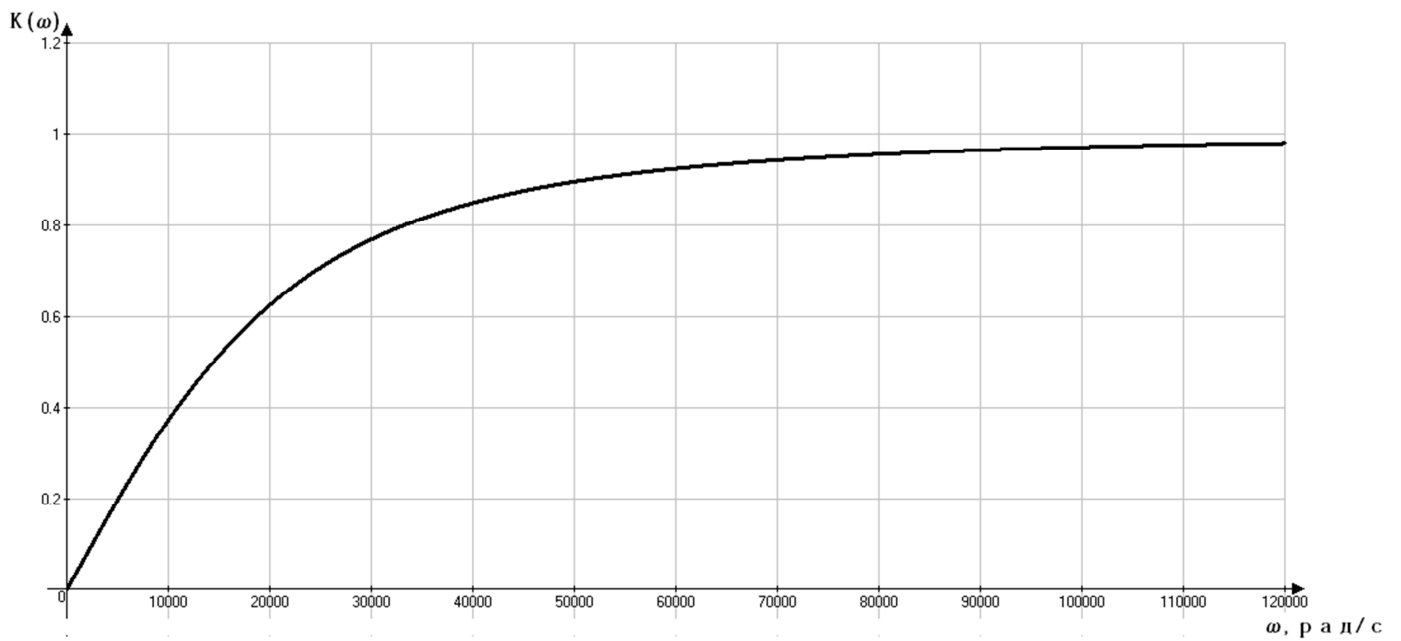


Рисунок 12 - АЧХ rc -цепочки до частоты помехи

По формуле (2): $\alpha(\omega) = \text{arctg} \left(\frac{1}{r\omega C} \right) = \text{arctg} \left(\frac{1}{\omega \cdot 4 \cdot 10^{-5}} \right)$.

Графики представлены на рис. 13 и рис. 14.

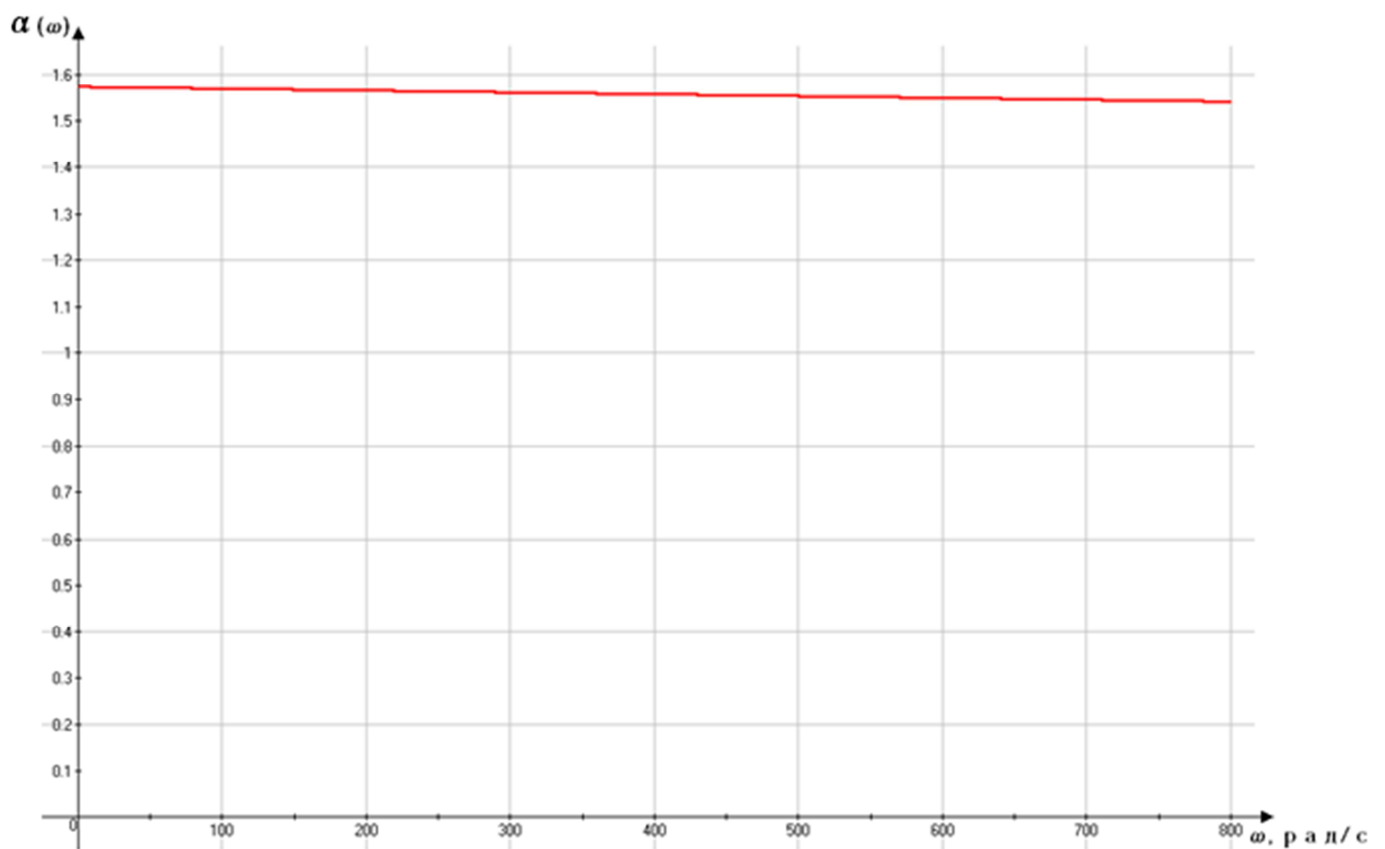


Рисунок 13 - ФЧХ rc -цепочки в диапазоне частот полезного сигнала

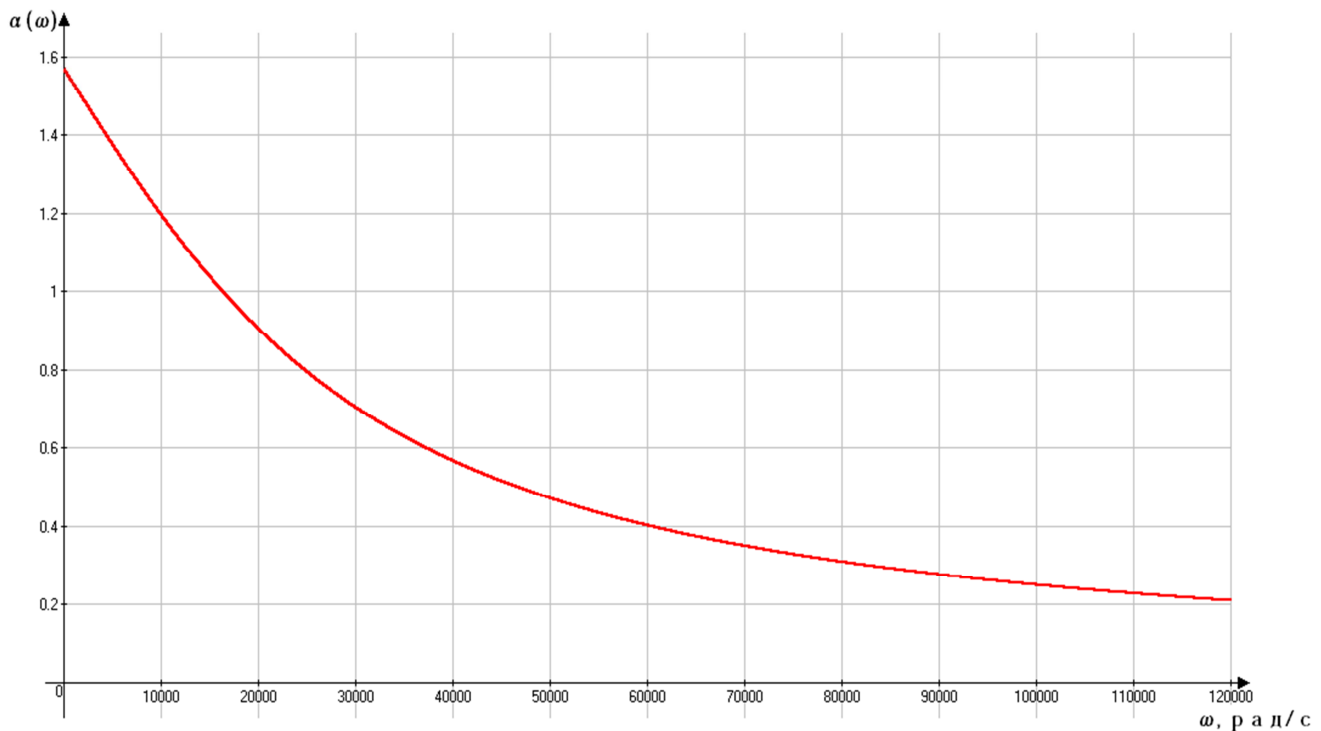


Рисунок 14 - ФЧХ rc -цепочки до частоты помехи

Теперь проанализируем полученные результаты с точки зрения критериев технического задания:

1) Уровень полезного сигнала

Согласно техническому заданию, в качестве минимально-необходимого можно принять сигнал $u_2(t)$, у которого амплитуда первой гармоники не меньше 1мВ. Вычислим амплитуду первой гармоники выходного сигнала:

$$U_{2(1)m} = K(\omega_1) \cdot U_{1(1)m} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{\frac{1}{400^2} + 16 \cdot 10^{-10}}} \cdot 1 = 0,016(\text{В});$$

Здесь $\omega_1=400$ рад/с – циклическая частота первой гармоники, $U_{1(1)m} = 1$ В – амплитуда первой гармоники.

Таким образом, rc -цепочка удовлетворяет первому критерию, так как амплитуда первой гармоники на выходе $U_{2(1)m} = 0,016 \text{ В} > 0,001 \text{ В}$.

2) Точность дифференцирования

Для качественного определения точности дифференцирования, построим графики реального выходного сигнала и идеальной математической производной входного сигнала. Для лучшего сопоставления графиков домножим идеальную производную на масштабный коэффициент m так, чтобы идеальный и реальный выходные сигналы совпадали по амплитуде.

Следует также учесть, что на гармонику с частотой $\omega_n=q \cdot \omega$ (т.е. на сигнал помехи) критерий точности дифференцирования не распространяется. Поэтому на данном этапе помехой можно пренебречь.

Тогда формула для идеальной производной:

$$u_2(t) = \frac{du_1(t)}{dt} = 400 \cdot \sin\left(400t + \frac{\pi}{2}\right) + 0,5 \cdot 800 \sin\left(800t + \frac{\pi}{2}\right);$$

С учётом всего сказанного, построим графики реальной и идеальной производных входного сигнала (рис. 15).

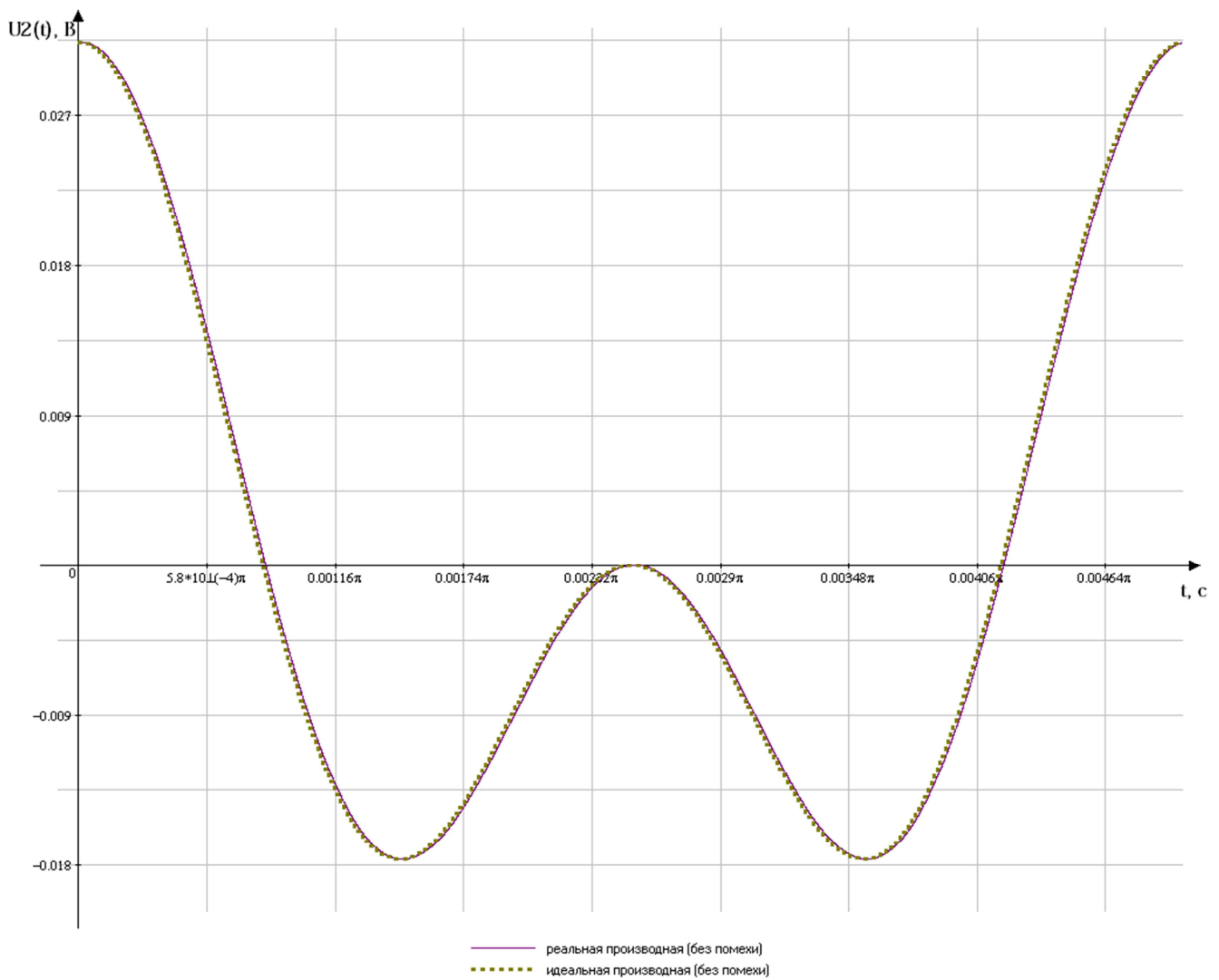


Рисунок 15 - График идеального и полученного rc -цепочкой выходных сигналов. Масштабный коэффициент $m=3,925 \cdot 10^{-5}$

В качестве количественных критериев точности дифференцирования можно использовать неравенства, приведённые в техническом задании:

$$K_{(2)}/K_{(1)} \leq 2,18 \quad (3) \quad \text{и} \quad \Delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{(2)} \leq 0,038 \quad (4).$$

Эти неравенства являются требованиями по совпадению АЧХ и ФЧХ идеального дифференцирующего устройства и rc -цепочки.

Неравенство (3) определяет линейность АЧХ в диапазоне частот полезного сигнала. Так как график АЧХ идеального дифференцирующего устройства всегда будет выше, чем у rc -цепочки, т.е. к неравенству (3) можно приблизиться только «снизу», то его следует изменить на следующее неравенство:

$$K_{(2)}/K_{(1)} \geq 2 - 0,18 = 1,82 \quad (5).$$

Подставим в формулу (1) для АЧХ rc -цепочки значения $\omega_1 = 400$ рад/с и $\omega_2 = 800$ рад/с. Получим:

$$K_{(1)} = K(\omega_1) = \frac{rc}{\sqrt{\frac{1}{\omega_1^2} + (rc)^2}} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{\frac{1}{400^2} + 16 \cdot 10^{-10}}} = 0,016;$$

$$K_{(2)} = K(\omega_2) = \frac{rc}{\sqrt{\frac{1}{\omega_2^2} + (rc)^2}} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{\frac{1}{800^2} + 16 \cdot 10^{-10}}} = 0,032;$$

Тогда $K_{(2)}/K_{(1)} = 2 \geq 1,82$.

Таким образом, rc -цепочка удовлетворяет критерию линейности своей АЧХ в диапазоне частот полезного сигнала.

Идеальная ФЧХ в диапазоне частот полезного сигнала представляет собой горизонтальную прямую на уровне $\frac{\pi}{2}$. ФЧХ rc -цепочки отклоняется от этого уровня, причём величина этого отклонения заведомо больше на частоте ω_2 . Неравенство (4) задаёт допустимую величину этого отклонения.

Вычислим по формуле (2) значение ФЧХ rc -цепочки на частоте ω_2 :

$$\alpha(\omega_2) = \text{arctg}\left(\frac{1}{800 \cdot 4 \cdot 10^{-5}}\right) = 1,539.$$

Подставив это значение в неравенство (4), получим:

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{(2)} = 0,0318 \leq 0,038.$$

Таким образом, rc -цепочка удовлетворяет предъявляемым ей требованиям по точности дифференцирования входного сигнала.

3) Помехоустойчивость rc -цепочки

Для того чтобы получить качественное представление об уровне помехи на выходе из rc -цепочки, построим график реального выходного сигнала $u_2(t)$, как уже было сделано в критерии 2, но на этот раз не будем пренебрегать высокочастотной помехой (рис. 16).

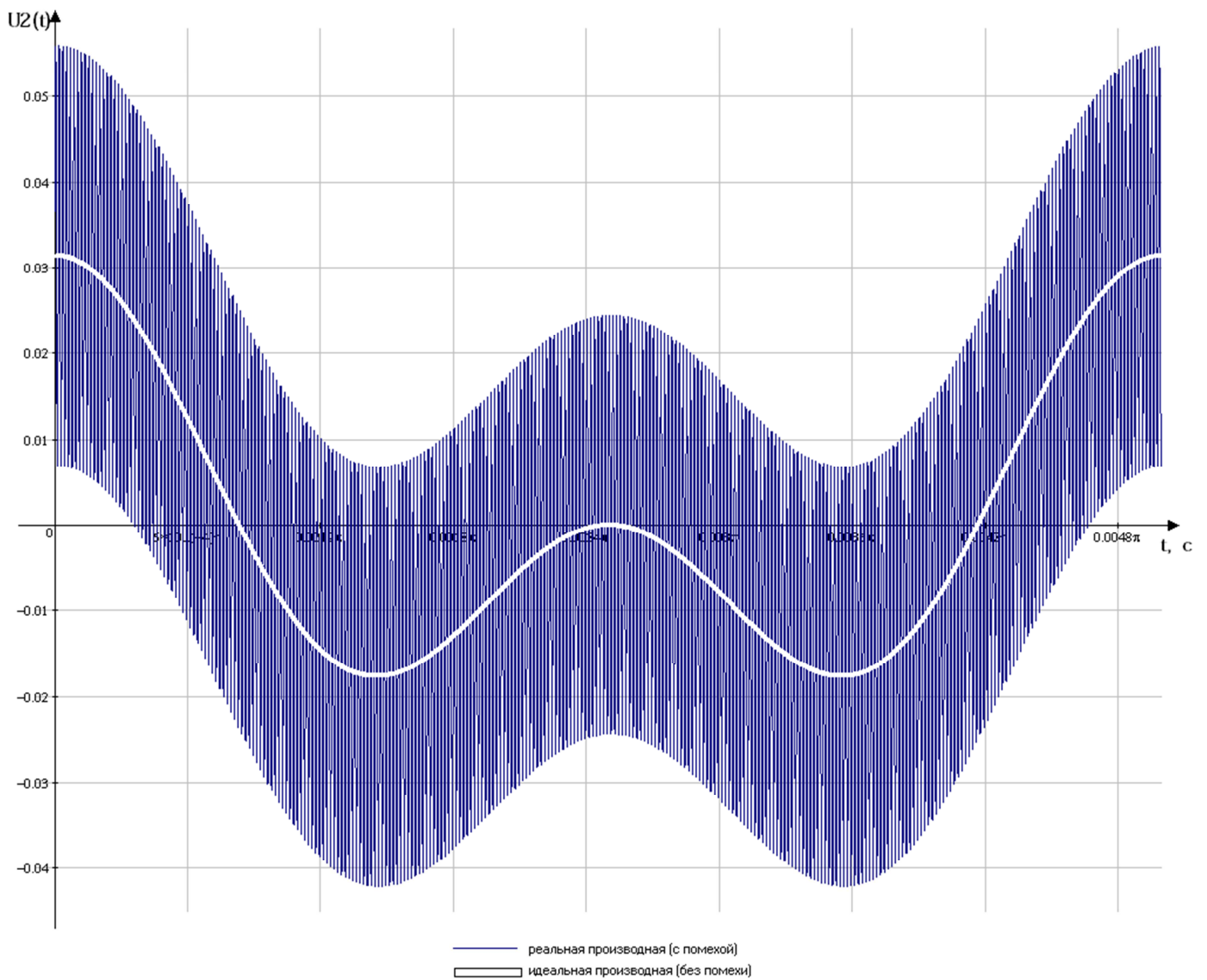


Рисунок 16 - График выходного сигнала, полученного rc -цепочкой, с учётом высокочастотной помехи

Для количественного определения допустимого уровня помехи в составе выходного сигнала, вычислим отношение амплитуды помехи к амплитуде первой гармоники полезного сигнала для входного сигнала $u_1(t)$:

$$\frac{U_{1(n)m}}{U_{1(1)m}} = \frac{0,025}{1} = 0,025 .$$

Приблизительно таким же (или ещё меньше) должно быть отношение амплитуд помехи и первой гармоники полезного сигнала в выходном сигнале $u_2(t)$, т.е. должно выполняться соотношение:

$$\frac{U_{1(n)m}}{U_{1(1)m}} \geq \frac{U_{2(n)m}}{U_{2(1)m}} \quad (6);$$

Вычислим отношение амплитуд помехи и первой гармоники полезного сигнала в выходном сигнале $u_2(t)$:

$$\frac{U_{2(n)m}}{U_{2(1)m}} = \frac{K(\omega_n) \cdot U_{1(n)m}}{K(\omega_1) \cdot U_{1(1)m}} = \frac{\frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{\frac{1}{120000^2 + 16 \cdot 10^{-10}}}} \cdot 0,025}{\frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{\frac{1}{400^2 + 16 \cdot 10^{-10}}}} \cdot 1} = 1,530$$

В результате соотношение (6) не выполняется, т.е. уровень помехи в составе выходного сигнала значительно превышает допустимый (это же можно увидеть и по графику рис.16).

Анализируя результат всех трёх критериев, можно сделать вывод о том, что дифференцирующая rc -цепочка с постоянной времени $\tau = 4 \cdot 10^{-5}$ (с) обеспечивает достаточный уровень полезного сигнала на выходе и приемлемую точность дифференцирования. Однако, уровень помехи в составе выходного сигнала такой цепочки недопустимо высок, что не позволяет использовать её в устройстве формирования управляющих сигналов.

Разумеется, помеху можно было бы без особого труда подавить на выходе с помощью частотного фильтра. Но в этом случае необходимо учесть влияние (вполне возможно, неблагоприятное) фильтра на качество дифференцирования полезного сигнала, так как АЧХ и ФЧХ совместно работающих дифференцирующего устройства и фильтра, скорее всего, окажутся существенно хуже АЧХ и ФЧХ отдельно рассчитанной r - c цепочки.

Гораздо более удачным был бы вариант электрической цепи, которая обладала бы дифференцирующими свойствами в области частот полезных составляющих входного сигнала и одновременно свойством подавления высокочастотной помехи. Таким дополнительным свойством обладала бы цепь, в которую включена катушка индуктивности, т.е. выполненная по схеме (рис. 17):

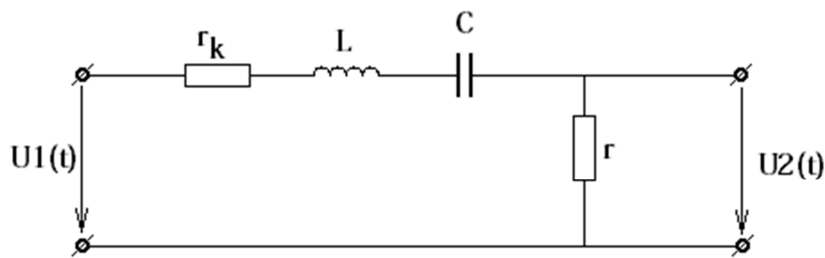
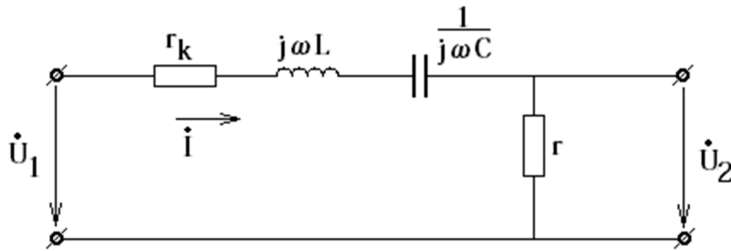


Рисунок 17 - Простейшая дифференцирующая r - L - c цепочка

Здесь L - индуктивность катушки, r_k - ее активное сопротивление, r и c - активное сопротивление и емкость, величины которых могут остаться такими же, как и в r - c цепочке, рассмотренной ранее. Индуктивное сопротивление $x_L = \omega L$ особенно велико на частоте помехи и способно существенно ограничить составляющую тока этой частоты, а следовательно, и выходное напряжение сигнала помехи, что и является ожидаемым полезным эффектом. Однако наличие дополнительных параметров L , r_k изменяет вид АЧХ и ФЧХ и в области частот полезного сигнала, причем пока не ясно, в сторону их улучшения или ухудшения. Поэтому необходимо исследовать (аналитически, в общем виде) АЧХ и ФЧХ предложенной r - L - c цепи. Если имеется некоторый диапазон частот, в пределах которого АЧХ и ФЧХ одновременно отвечают условиям дифференцирования полезной составляющей входного сигнала, значит, дальнейшие операции имеют смысл. Если такого диапазона нет, цепь в принципе не обладает нужными свойствами.

5 РАСЧЕТ В ОБЩЕМ ВИДЕ АЧХ И ФЧХ СКОРРЕКТИРОВАННОГО ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ

Составим уравнения Кирхгофа для r - L - c -цепочки в комплексной форме (рис. 18):



$$i \left(\frac{1}{j\omega C} + \omega L + r + r_k \right) - \dot{U}_1 = 0$$

$$i r - \dot{U}_2 = 0$$

Рисунок 18 - К расчету дифференцирующей rc -цепочки комплексным методом

Комплексный коэффициент передачи напряжения может быть найден, как отношение комплексных амплитуд, либо как отношение действующих значений напряжений: $K(j\omega) = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} =$

$$\frac{r}{\frac{1}{j\omega C} + \omega L + r + r_k} = \frac{\omega^2 C^2 r (r + r_k)}{\omega^2 C^2 (r + r_k)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} - j \frac{\omega r c (\omega^2 LC - 1)}{\omega^2 C^2 (r + r_k)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} = K_1(\omega) + jK_2(\omega)$$

Отсюда, АЧХ:

$$K(\omega) = \sqrt{K_1(\omega)^2 + K_2(\omega)^2} = \sqrt{\frac{(\omega^2 C^2 r (r + r_k))^2 + (\omega r c (\omega^2 LC - 1))^2}{(\omega^2 C^2 (r + r_k)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2)^2}} = \frac{rC}{\sqrt{C^2 (r + r_k)^2 + (\omega LC - \frac{1}{\omega})^2}} \quad (7)$$

ФЧХ:

$$\alpha(\omega) = \arctg\left(\frac{K_2(\omega)}{K_1(\omega)}\right) = \arctg\left(\frac{\omega r c (\omega^2 LC - 1)}{\omega^2 C^2 (r + r_k)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} \cdot \frac{\omega^2 C^2 (r + r_k)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}{\omega^2 C^2 r (r + r_k)}\right) =$$

$$\arctg\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C (r + r_k)}\right) = \arctg\left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{r + r_k}\right) \quad (8)$$

В общем виде, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики дифференцирующей r - L - c -цепочки могут быть представлены в виде графиков (рис.18 и рис. 19):

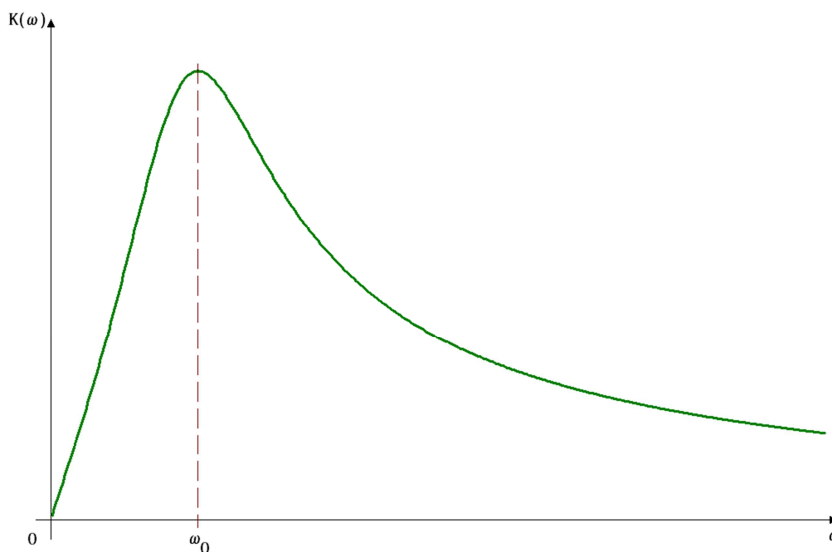


Рисунок 18 - Общий вид АЧХ дифференцирующей r - L - c -цепочки, ω_0 – резонансная частота

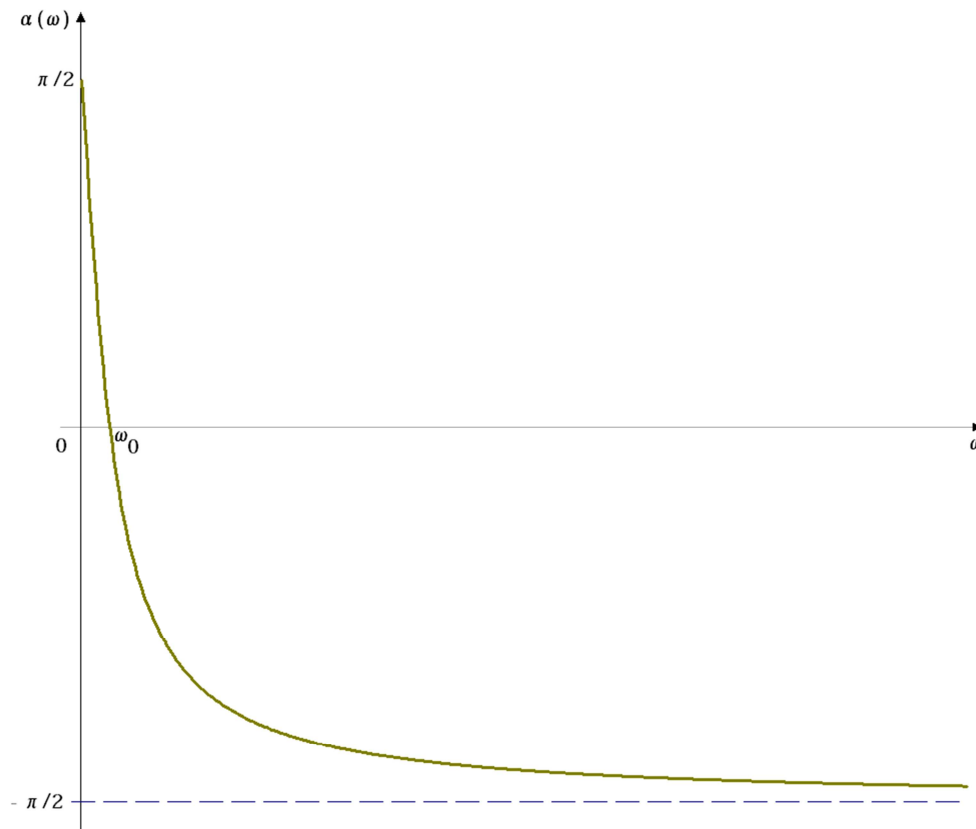


Рисунок 19 - Общий вид ФЧХ дифференцирующей r - L - c -цепочки, ω_0 – резонансная частота

Известно, что r - L - c цепочка является резонансной, с резонансной частотой ω_0 , определяемой по формуле: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Поэтому, необходимо выбрать значение резонансной частоты ω_0 таким образом, чтобы обеспечить выполнение всех трёх критериев технического задания. Разумеется, значение резонансной частоты ω_0 не может находиться внутри или на границе диапазона частот составляющих полезного сигнала (хотя бы потому, что значение ФЧХ при $\omega = \omega_0$ равно нулю, а должно быть, в идеале, равным $\pi/2$). С другой стороны, резонансная частота не должна совпадать или быть близкой к частоте помехи (хотя бы потому, что условие $\omega = \omega_0$ соответствует максимуму тока в цепи и, следовательно, максимуму напряжения на выходе, а задача состоит как раз в обратном - в необходимости максимально уменьшить это напряжение). Следовательно, положение резонансной частоты на оси частот определяется неравенством $\omega_2 < \omega_0 < \omega_n$, где ω_2 - частота высшей гармоники полезного входного сигнала, ω_n - частота помехи. Поскольку ω_n приблизительно на два порядка больше ω_2 , диапазон возможного положения ω_0 на оси частот достаточно широк, и это позволяет надеяться, что при каком-то значении индуктивности L цепь сможет соответствовать всем указанным выше критериям качества, хотя это и не гарантировано.

Теперь рассчитаем параметры r - L - c цепочки согласно требованиям технического задания. Как уже было отмечено ранее, параметры r и C можно оставить теми же, что были использованы при расчете rc -цепочки. Активное сопротивление катушки r_k зависит от числа её витков, которое в свою очередь определяет индуктивность катушки L . Сама же индуктивность может быть вычислена, если будет известна резонансная частота ω_0 r - L - c цепочки.

Проведём анализ формул для расчёта АЧХ и ФЧХ r - L - c цепочки с точки зрения критериев, описанных в техническом задании. Целью анализа будет установление интервала частот $\Delta\omega$, в котором может находиться резонансная частота ω_0 , и при этом будут выполняться все три критерия

качества. При анализе можно пренебречь активным сопротивлением катушки r_k , т.к. $r_k \ll r$. Поэтому можно считать, что оно не оказывает существенного влияния на характер АЧХ и ФЧХ.

С учётом сказанного, перепишем формулы (7) и (8), подставив в них зависимости:

$$LC = \frac{1}{\omega_0^2} \quad \text{и} \quad \tau = rC \approx C(r + r_k) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ (с)}.$$

Получим:

$$K(\omega) = \frac{rC}{\sqrt{C^2(r+r_k)^2 + (\omega LC - \frac{1}{\omega})^2}} = \frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + (\frac{\omega}{\omega_0^2} - \frac{1}{\omega})^2}} \quad (9)$$

$$\alpha(\omega) = \arctg\left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C(r+r_k)}\right) = \arctg\left(\frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{\omega \tau}\right) \quad (10)$$

Как видно из рис.18, с увеличением резонансной частоты ω_0 улучшается линейность характеристики $K(\omega)$ в диапазоне низких частот (т.е. растёт точность дифференцирования полезного сигнала), одновременно уменьшается величина коэффициента $K(\omega)$ в этом диапазоне частот (падает уровень выходного сигнала) и увеличиваются значения $K(\omega)$ в области высоких частот (растёт уровень сигнала помехи). Таким образом, с точки зрения первого критерия резонансная частота должна быть как можно больше, с точки зрения второго критерия — как можно меньше (но условие $\omega_0 = \omega_2$ совершенно недопустимо), с точки зрения третьего критерия - тоже как можно меньше. Что касается ФЧХ (рис.19), то она становится все более приемлемой при увеличении ω_0 , т.е. требования к ней целиком совпадают с требованиями к АЧХ с точки зрения первого критерия, а для остальных двух - безразличны.

При расчете интервала частот $\Delta\omega$, можно принять следующие обозначения:

ω_{01} - минимально-необходимое значение резонансной частоты ω_0 , обеспечивающее соответствие первому критерию качества,

ω_{02} - максимально возможное значение ω_0 , обеспечивающее выполнение требований второго критерия;

ω_{03} - максимально возможное значение ω_0 , обеспечивающее выполнение требований третьего критерия.

1) Расчёт резонансной частоты ω_0 с точки зрения критерия минимального уровня полезного сигнала на выходе.

Составим неравенство, исходя из условия, что минимально-необходимым можно принять сигнал $u_2(t)$, у которого амплитуда первой гармоники не меньше 1мВ:

$$U_{2(1)m} = K(\omega_1) \cdot U_{1(1)m} \geq 0,001 \quad (11).$$

Подставив выражение для $K(\omega)$ из формулы (9), составим и решим неравенство:

$$\frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + (\frac{\omega_1}{\omega_{01}^2} - \frac{1}{\omega_1})^2}} \geq 0,001, \text{ где } \tau = rC \approx C(r + r_k) = 4 \cdot 10^{-5}, \omega_1 = 400 \text{ рад/с}.$$

Решая это неравенство относительно ω_{01} , получим:

$$\omega_{01} \geq 107,60 \text{ рад/с} \quad (12).$$

2) Расчёт резонансной частоты ω_0 с точки зрения критерия точности дифференцирования выходного сигнала.

В качестве опорных неравенств, воспользуемся неравенствами (3) и (4), которые приведены в техническом задании:

$$K_{(2)}/K_{(1)} \leq 2,18 \quad (3) \quad \text{и} \quad \Delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{(2)} \leq 0,038 \quad (4)$$

Подставим из формулы (9) в неравенство (3) значения $K_{(1)}=K(\omega_1)$ и $K_{(2)}=K(\omega_2)$, получим:

$$\frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + (\frac{\omega_2}{\omega_{02}} - \frac{1}{\omega_2})^2}} \cdot \frac{\sqrt{\tau^2 + (\frac{\omega_1}{\omega_{02}} - \frac{1}{\omega_1})^2}}{\tau} \leq 2,18.$$

Здесь $\tau = rC \approx C(r + r_k) = 4 \cdot 10^{-5}$, $\omega_1 = 400$ рад/с, $\omega_2 = 800$ рад/с.

Решая это неравенство относительно ω_{02} , получим:

$$\omega_{02} \geq 130,91 \text{ рад/с} \quad (13).$$

Подставим из формулы (9) в неравенство (3) значение $\alpha_{(2)} = \alpha(\omega_2)$, получим:

$$\frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_{02}^2}}{\omega_2 \tau}\right) \leq 0,038.$$

Решая это неравенство относительно ω_{02} , получим:

$$\omega_{02} \geq 2010,71 \text{ рад/с} \quad (14)$$

3) Расчёт резонансной частоты ω_0 с точки зрения критерия помехозащищённости r-L-с цепочки.

Для расчёта помехозащищённости, воспользуемся условием неравенства (6):

$$\frac{U_{1(\Pi)m}}{U_{1(1)m}} \geq \frac{U_{2(\Pi)m}}{U_{2(1)m}} \quad (6)$$

Здесь $U_{2(\Pi)m} = K(\omega_{\Pi}) \cdot U_{1(\Pi)m}$ и $U_{2(1)m} = K(\omega_1) \cdot U_{1(1)m}$. Подставим эти значения в неравенство (6), используя формулу (10). Получим:

$$\frac{0,025}{1} \geq \frac{\frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + (\frac{\omega_{\Pi}}{\omega_{03}} - \frac{1}{\omega_{\Pi}})^2}} \cdot 0,025}{\frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + (\frac{\omega_1}{\omega_{03}} - \frac{1}{\omega_1})^2}} \cdot 1};$$

Здесь $\tau = rC \approx C(r + r_k) = 4 \cdot 10^{-5}$, $\omega_{\Pi} = 120000$ рад/с.

Решая это неравенство относительно ω_{03} , получим:

$$\omega_{03} \leq 6928,22 \text{ рад/с} \quad (15)$$

Итак, наложив ограничения на резонансную частоту ω_0 с точки зрения всех трёх критериев, можно составить систему из неравенств (12)-(15):

$$\begin{cases} \omega_0 \geq 107,60 \\ \omega_0 \geq 130,91 \\ \omega_0 \geq 2010,71 \\ \omega_0 \leq 6928,22 \end{cases} \Leftrightarrow 2010,71 \leq \omega_0 \leq 6928,22$$

Отсюда, искомым интервал частот $\Delta\omega = (2010,71 \dots 6928,22)$ (рад/с).

Так как в техническом задании не оговорено никаких дополнительных требований к резонансной частоте, то можно выбрать любое значение ω_0 из интервала $\Delta\omega$. Выберем $\omega_0 = 5000$ рад/с.

С учетом выбранной резонансной частоты и ранее выбранной ёмкости $C = 1\text{мкФ}$, вычислим индуктивность катушки L :

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{1}{5000^2 \cdot 10^{-6}} = 0,04 \text{ (Гн)}.$$

Рассчитаем число витков катушки с сердечником в виде концевой магнитопровода, выполненного из феррита (рис. 5) с магнитной проницаемостью μ_r . Пренебрегаем всеми видами потерь. Напряженность поля на одинаковом расстоянии r от оси симметрии такого магнитопровода одинакова и равна

$$H = \frac{iW}{2\pi r} = \frac{B}{\mu_r \mu_0}.$$

Здесь i – сила тока в катушке, W – число витков, B – магнитная индукция, $\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Магнитный поток в сердечнике равен:

$$\Phi = h \int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_2}{2}} B dr = \frac{iWh\mu_r\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1};$$

Следовательно, индуктивность катушки без учёта индуктивности рассеяния

$$L = \frac{W\Phi}{i} = W^2 h \frac{\mu_r\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (16).$$

Отсюда, число витков $W = \sqrt{\frac{2\pi L}{\mu_r\mu_0 h \ln \frac{d_2}{d_1}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 0,04}{3800 \cdot \mu_0 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \ln \frac{17}{11}}} \approx 201$.

С учётом $W=201$, найдём индуктивность такой катушки по формуле (16):

$$L = 201^2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \frac{3800 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14} \ln \frac{17}{11} = 0,040 \text{ (Гн)}$$

Теперь рассчитаем активное сопротивление катушки r_k :

$$r_k = \frac{\rho_{Cu} l}{S_{пр}} \quad (17)$$

Здесь $\rho_{Cu} = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное сопротивление меди, $l = W \cdot 2 \left(\frac{d_2 - d_1}{2} + h \right)$ – полная длина провода в катушке, $S_{пр} = \frac{\pi d_{пр}^2}{4}$ – площадь поперечного сечения проводника. Таким образом,

$$r_k = \frac{2\rho_{Cu} W (d_2 - d_1 + h)}{\frac{\pi d_{пр}^2}{4}} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 200 \cdot \left(\frac{17-11}{2} + 3 \right) \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,12 \cdot 10^{-3})^2} = 3,71 \text{ (Ом)}.$$

Добротность контура $Q = \frac{\sqrt{L}}{r+r_k} = \frac{\sqrt{0,040}}{\sqrt{10^{-6}}} = \frac{0,2}{0,040371} = 4,576$.

6 ВЫЧИСЛЕНИЕ АЧХ и ФЧХ ЦЕПОЧКИ С УЧЕТОМ ВСЕХ ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Выпишем все рассчитанные параметры r-L-с цепочки:

Сопrotивление резистора $r = 40$ Ом;

Ёмкость конденсатора $C = 1$ мкФ;

Индуктивность катушки $L = 0,04$ Гн;

Число витков катушки $W=201$;

Активное сопротивление катушки $r_k = 5,57$ Ом;

$$\text{По формуле (7): } K(\omega) = \frac{rC}{\sqrt{C^2(r+r_k)^2 + (\omega LC - \frac{1}{\omega})^2}} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{1,91 \cdot 10^{-9} + (\omega \cdot 4 \cdot 10^{-8} - \frac{1}{\omega})^2}}$$

$$\text{По формуле (8): } \alpha(\omega) = \text{arctg} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{r+r_k} \right) = \text{arctg} \left(\frac{\frac{10^6}{\omega} - \omega \cdot 0,04}{43,71} \right)$$

Построим графики амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики r-L-с цепочки (рис.20-24):

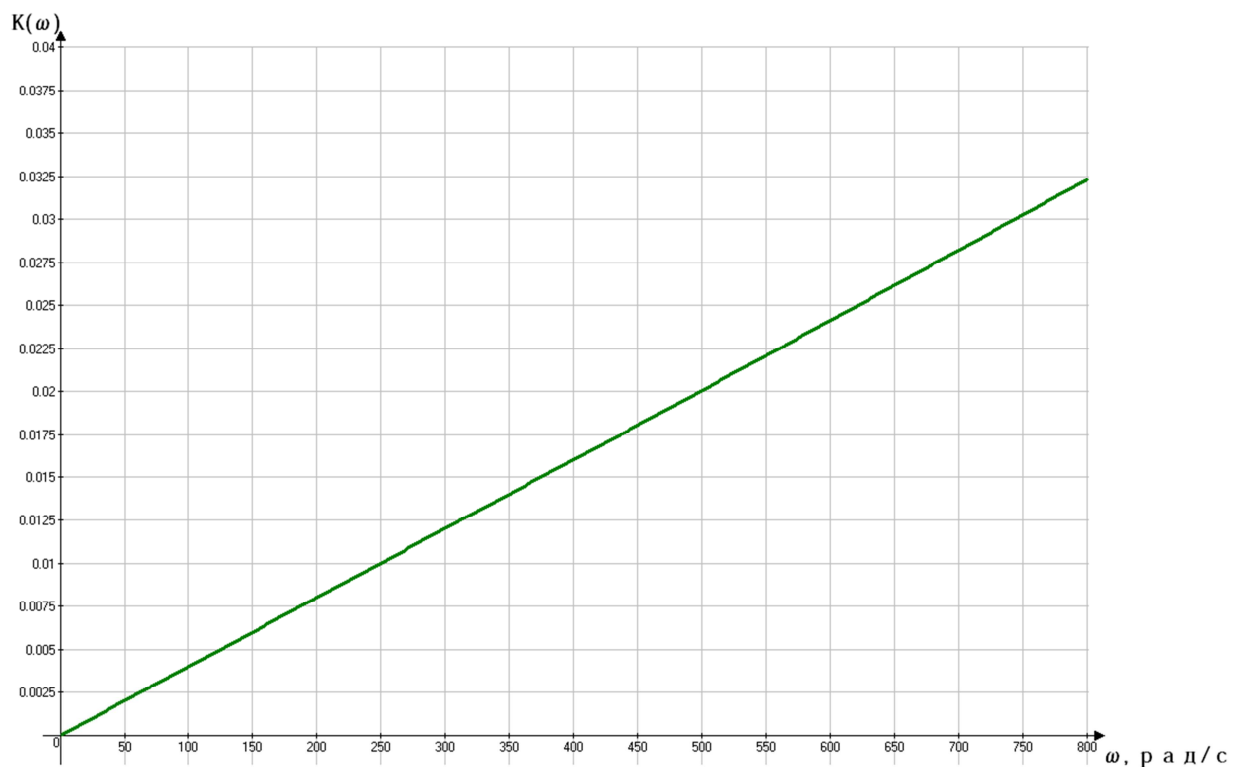


Рисунок 20 - АЧХ r-L-с цепочки в диапазоне частот полезного сигнала

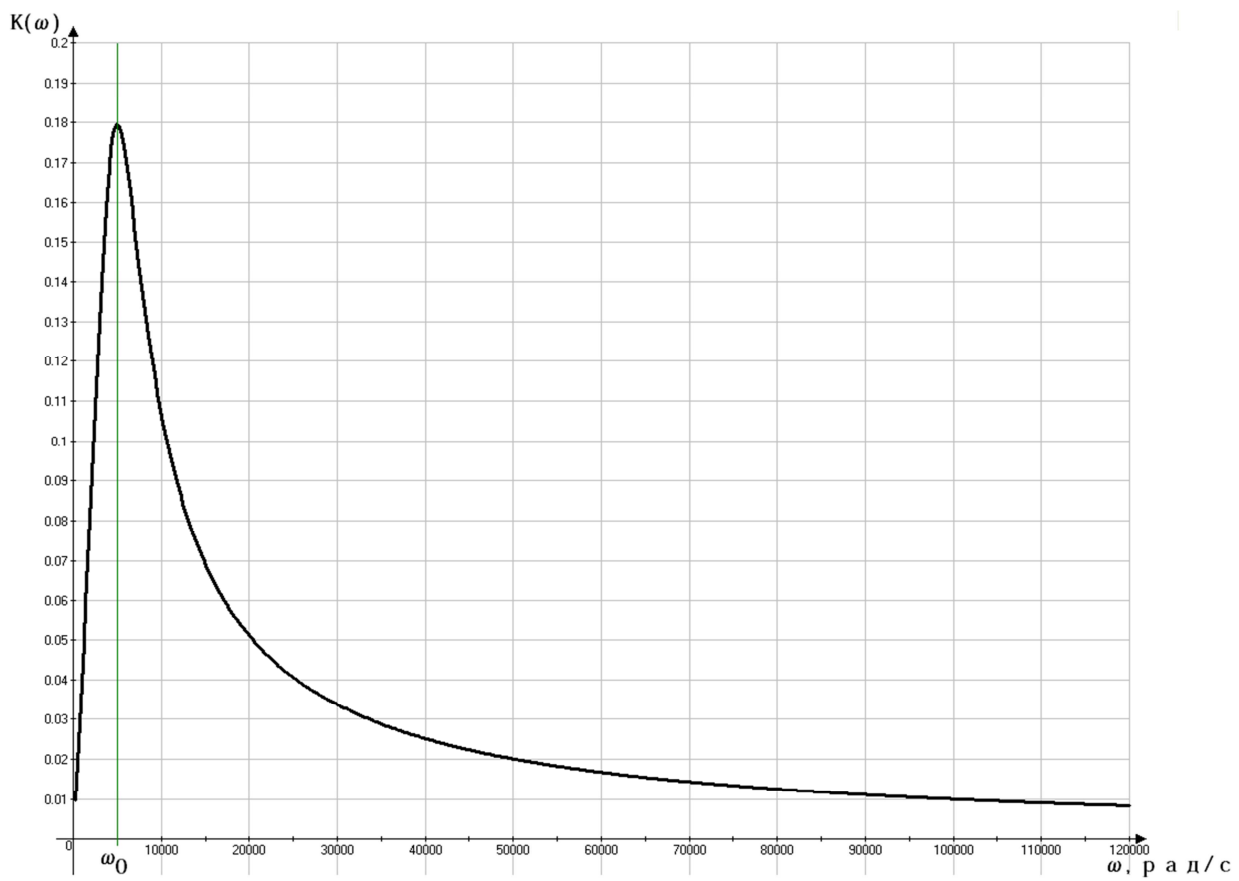


Рисунок 21 - АЧХ г-L-с цепочки до частоты помехи

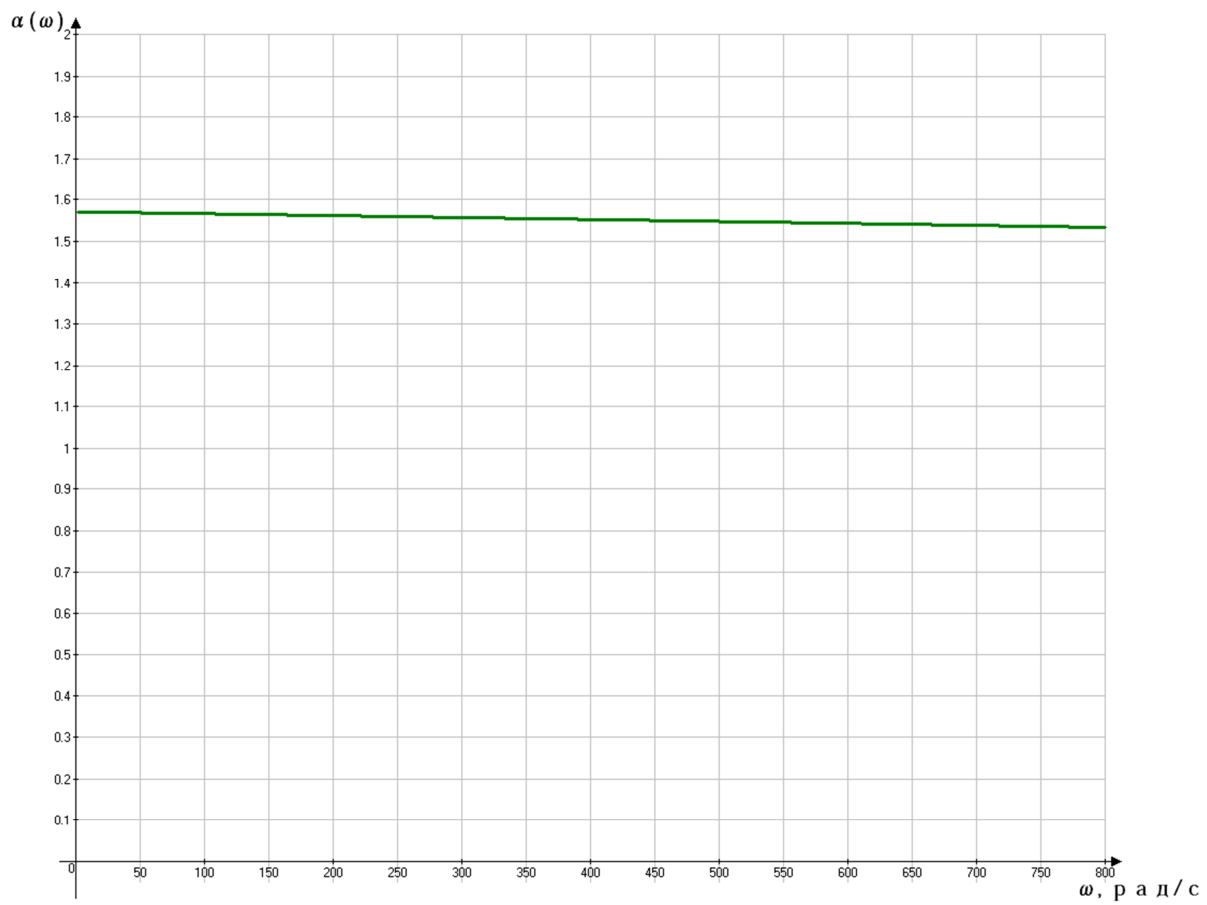


Рисунок 22 - ФЧХ г-L-с цепочки в диапазоне частот полезного сигнала

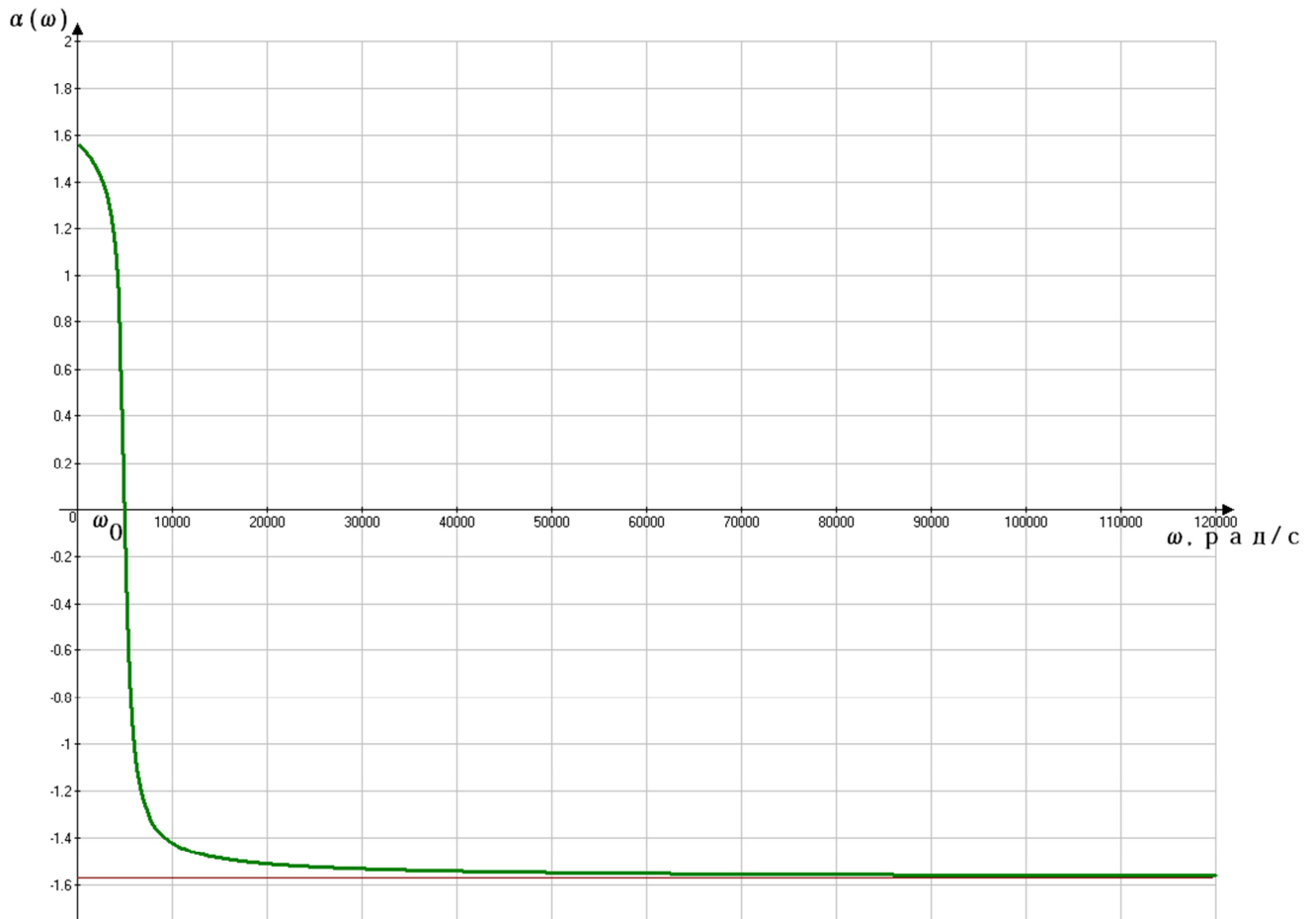


Рисунок 23 - ФЧХ r-L-с цепочки до частоты помехи

При помощи рассчитанных АЧХ и ФЧХ, можно полностью вычислить выходной сигнал $u_2(t)$, построив его график. При этом:

$$\begin{aligned}
 u_2(t) &= U_{1(1)m} \cdot K(\omega_1) \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha(\omega_1)) + U_{1(2)m} \cdot K(\omega_2) \cdot \sin(\omega_2 t + \alpha(\omega_2)) + U_{1(n)m} \cdot K(\omega_n) \cdot \\
 &\sin(\omega_n t + \alpha(\omega_n)) = \\
 &= 1 \cdot 0,016 \cdot \sin(400t + 1,55) + 0,5 \cdot 0,032 \cdot \sin(800t + 1,533) + 0,025 \cdot 8,34 \cdot \\
 &10^{-3} \cdot \sin(120000t - 1,56)
 \end{aligned}$$

Для сравнения будем использовать идеальную математическую производную без учёта помехи:

$$u_{2и}(t) = \frac{du_1(t)}{dt} = 400 \cdot \sin\left(400t + \frac{\pi}{2}\right) + 0,5 \cdot 800 \sin\left(800t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Для того, чтобы графики совпадали по уровню, умножим математическую производную $u_{2и}(t)$ на масштабный коэффициент m (рис. 23):

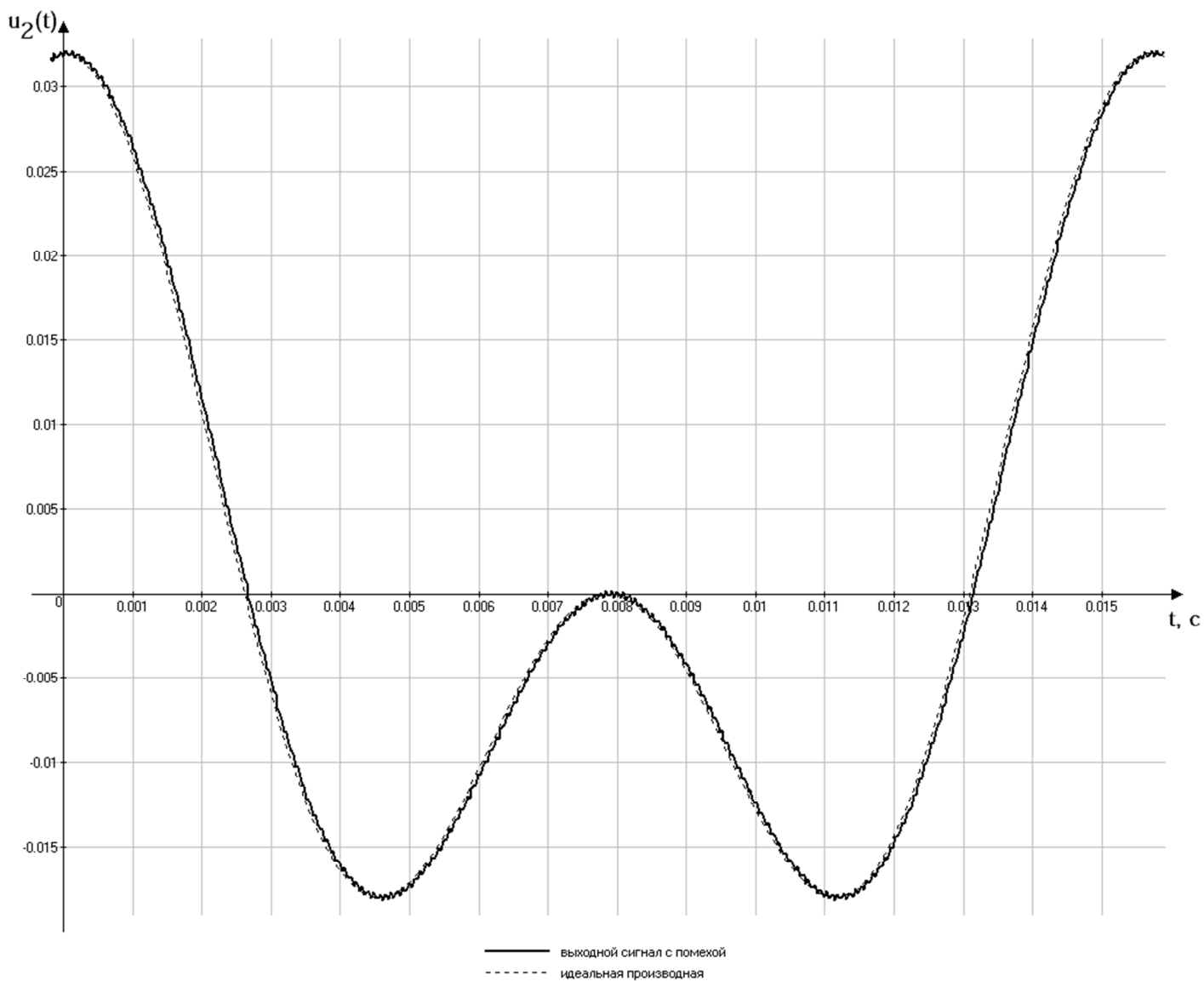


Рисунок 24 - Графики идеального (без учёта помехи) и полученного $r-L-c$ -цепочкой (с учётом помехи) выходных сигналов. Масштабный коэффициент $m=4 \cdot 10^{-5}$

ВЫВОДЫ

В данной работе был произведён расчет дифференцирующего устройства, используемого в устройстве формирования управляющих сигналов некоторой системы автоматического регулирования. В процессе выполнения работы оказалось, что применение простейшей дифференцирующей rc -цепочки не может удовлетворить всем требованиям технического задания. Поэтому были приняты соответствующие меры (добавление в rc -цепочку индуктивности L) для достижения необходимых свойств дифференцирующего устройства. Для $r-L$ -с цепочки был произведён анализ допустимого интервала $\Delta\omega$ резонансной частоты ω_0 . После выбора резонансной частоты ω_0 , было выбрано значение индуктивности катушки L , рассчитаны геометрические параметры её сердечника и определено её активное сопротивление r_k .

После расчета всех параметров $r-L$ -с цепочки, расчёта и построения её частотных характеристик, а также построения графиков выходного сигнала, был сделан вывод о том, что $r-L$ -с цепочка с выбранными параметрами полностью удовлетворяет всем требованиям технического задания, в частности:

- 1) Уровень полезного сигнала достаточно высок для его дальнейшего использования в системе автоматического регулирования. Амплитуда 1-ой гармоники полезного сигнала $U_{2(1)m}$ составляет 16 мВ (по ТЗ $U_{2(1)m} \geq 1$ мВ).

- 2) Обеспечена достаточная точность дифференцирования:

$$\frac{K_{(2)}}{K_{(1)}} \approx 2, \text{ по условию } \frac{K_{(2)}}{K_{(1)}} \leq 2,18;$$

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{(2)} = 0,0378, \text{ по условию } \Delta \leq 0,038.$$

- 3) Уровень высокочастотной помехи в составе выходного сигнала достаточно низок, по сравнению с уровнем входного сигнала:

$$\frac{U_{2(n)m}}{U_{2(1)m}} \geq \frac{2,085 \cdot 10^{-4}}{0,016} = 0,013, \text{ по условию } \frac{U_{2(n)m}}{U_{2(1)m}} \leq \frac{U_{1(n)m}}{U_{1(1)m}} = 0,025$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ГОСТ Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции «Основы Теории Фильтров» от 2 июля 2001 г. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001
- 2 Зевеке Г.В. Основы Теории Цепей. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. - 360 с. ил.
- 3 Маклаков С.В. Теория Цепей — М.: Диалог МИФИ, 2002
- 4 Баранов Е.Н. Основы электротехники // Курс лекций – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004, 50 с.