

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет»
Кафедра управляющих и вычислительных систем

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Методические указания к курсовому проекту по дисциплине
«Основы электроники»

Направления: 140600 – Электротехника, электромеханика и
электротехнологии
230100 – Информатика и вычислительная техника
Специальности: 140604 – Электропривод и автоматика
промышленных установок и технологических комплексов
230101 – Вычислительные машины, комплексы,
системы и сети

Вологда, 2009

Проектирование активных фильтров. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Основы электроники».- Вологда, ВоГТУ, 2009.- 28 с.

Рассмотрены основные этапы проектирования активных фильтров, приведены основные теоретические сведения и задания на курсовой проект, даны рекомендации по расчету фильтра и его исследованиям в пакете Multisim.

Для студентов направлений 140600 и 230100, специальностей 140604 и 230101

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГТУ

Составители: А.М.Водовозов, к.т.н., доцент,

А.С.Елюков, студент

Рецензент - Реутов В.В., канд. техн. наук, зав. кафедрой
электротехники

©Вологодский государственный
технический университет, 2009 г.

Введение

Фильтром называется электронная схема, пропускающая или усиливающая синусоидальные сигналы в определенном диапазоне частот и ослабляющая сигналы с частотами, выходящими за пределы заданного диапазона.

Область применения фильтров в электронике и вычислительной технике очень широка и схемы отличаются большим разнообразием. Простые пассивные фильтры строятся на резисторах, конденсаторах и катушках индуктивности. Более сложные, активные - базе операционных усилителей и цепей из резисторов и конденсаторов.

В курсовом проекте студентам предлагается спроектировать активные фильтры разных типов с заданными параметрами, смоделировать и исследовать их характеристики в специализированном пакете программ.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Характеристики, параметры и математическое описание фильтров

Основной характеристикой фильтра считается его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), отображающая зависимость коэффициента передачи фильтра $K(\omega)$ от угловой частоты сигнала ω . По виду АЧХ устройства обычно разделяются на группы. Например, фильтр низкой частоты (ФНЧ) пропускает низкочастотные сигналы и ослабляет высокочастотные (рис.1.1а), фильтр высокой частоты (ФВЧ) пропускает сигналы высокочастотные и ослабляет низкочастотные (рис. 1.1б).

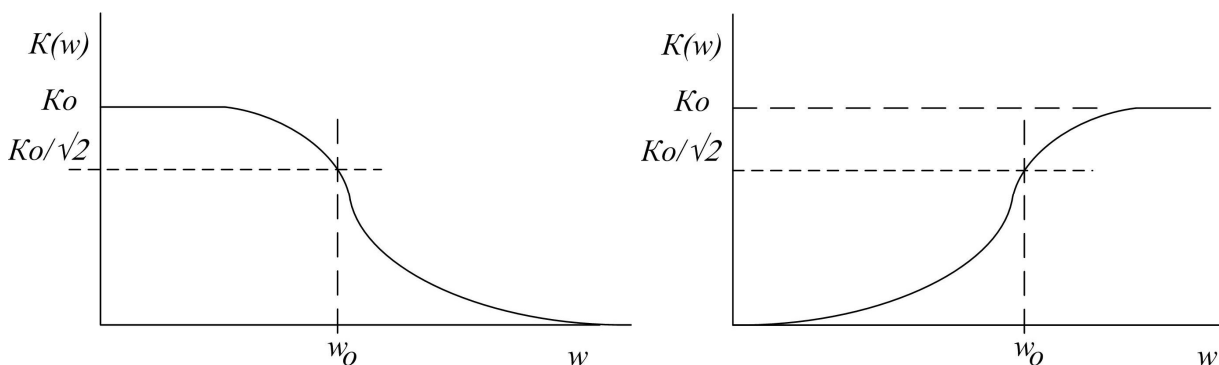


Рис. 1.1. Амплитудно-частотные характеристики (а – фильтр низкой частоты, б – фильтр высокой частоты).

Для описания ФНЧ и ФВЧ вводится понятие частоты среза ω_0 - частоты сигнала, на которой наблюдается уменьшение мощности в два раза.

Коэффициент коэффициента передачи фильтра при этом уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с коэффициентом передачи K_0 на нулевой (для ФНЧ) или на бесконечной (для ФВЧ) частоте.

Проектирование фильтра основывается на расчете его передаточной функции, которая является отношением изображения по Лапласу выходного сигнала к изображению по Лапласу входного сигнала:

$$W(p) = \frac{L\{U_{\text{вых}}(p)\}}{L\{U_{\text{вх}}(p)\}}$$

Для перехода от передаточной функции к частотным характеристикам производят замену $p = j\omega$, где: $j = \sqrt{-1}$.

При рассмотрении фильтров в обобщенном виде комплексную переменную p обычно нормируют, вводя безразмерное значение $P = j\omega / \omega_0 = j\Omega$, где $\Omega = \omega / \omega_0$ - относительная частота.

Передаточную функцию можно представить в виде комплексного выражения, содержащего вещественную $A(\omega)$ и мнимую $B(\omega)$ части:

$$W(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega),$$

или в показательной форме:

$$W(j\omega) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

где: $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ - соответственно, модуль и аргумент комплексной величины, указывающие величину и направление вектора $W(j\omega)$ на комплексной плоскости.

Модуль передаточной функции $K(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}$ является описанием АЧХ фильтра, а аргумент $\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{B(\omega)}{A(\omega)}\right)$ описывает его фазочастотную характеристику (ФЧХ).

Из-за большого диапазона изменения коэффициента передачи фильтра его значение обычно логарифмируется и умножается на 20. Это позволяет измерять $K(\omega)$ в децибелах – логарифмических единицах, используемых для оценки изменения мощности сигнала в радиотехнике (1 бел – единица, соответствующая десятикратному увеличению мощности сигнала; 1 дб = 0,1 бел).

При скачкообразном изменении входного сигнала в фильтре возникает переходный процесс. Требования, предъявляемые к фильтрам, при работе их в переходных режимах обычно противоречивы. С одной стороны, целесообразно, чтобы переходный процесс длился как можно меньше. С другой, этого можно достичь только, если изменения выходной величины происходят с большой скоростью, что приводит к появлению колебаний.

Для оценки качества переходных процессов обычно исследуют переходную функцию $h(t)$ - реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие $1(t)$.

В общем случае переходную функцию можно рассчитать по формуле:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{A(\omega)}{\omega} \sin(\omega \cdot t) d\omega.$$

В процессе проектирования параметры передаточной функции фильтра могут выбираться и оптимизироваться по различным критериям. Критериями чаще всего выступают равномерность АЧХ и колебательность переходной характеристики фильтра $h(t)$. Наиболее известны методики расчета, основанные на использовании алгебраических полиномов с известными свойствами, предложенных в своё время математиками Бесселем, Баттервортом и Чебышевым. Фильтры с использованием этих полиномов получили соответствующие имена.

На рис. 1.2 для сравнения показаны АЧХ фильтров нижних частот различных типов.

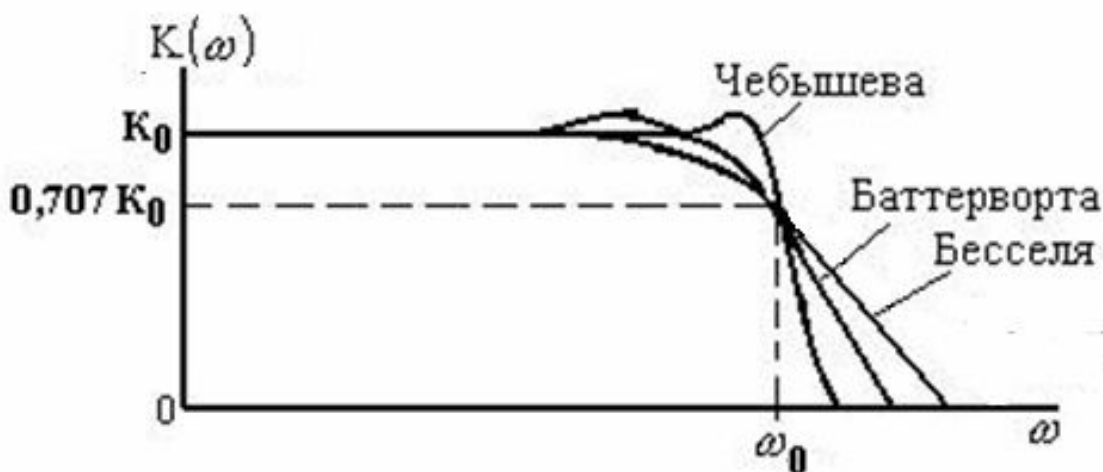


Рис. 1.2. Сравнительные АЧХ фильтров низкой частоты

АЧХ фильтра Баттерворта имеет довольно длинный горизонтальный участок и резко спадает за частотой среза. Переходная характеристика такого

фильтра при ступенчатом входном сигнале имеет колебательный характер. С увеличением порядка фильтра колебания усиливаются.

Характеристика фильтра Чебышева спадает более круто за частотой среза. В полосе пропускания она имеет волнообразный характер с постоянной амплитудой. Колебания переходного процесса при ступенчатом входном сигнале сильнее, чем у фильтра Баттерворта.

Фильтр Бесселя характеризуется меньшей длиной горизонтального участка, чем фильтр Баттерворта и более пологим спадом АЧХ за частотой среза, чем фильтры Баттерворта и Чебышева. Переходный процесс такого фильтра практически не имеет колебаний.

1.2. Фильтры нижних частот

Передаточные функция ФНЧ

Передаточная функция ФНЧ в общем виде должна иметь вид:

$$W(P) = \frac{K_0}{1 + c_1 P + c_2 P^2 + \dots + c_n P^n},$$

где $c_1, c_2, \dots, c_n$ – положительные действительные коэффициенты,

n – порядок фильтра,

K_0 - коэффициент передачи фильтра на нулевой частоте.

Порядок фильтра определяется максимальной степенью переменной P . Он задает асимптотический наклон АЧХ равный $-20n$ дБ/дек. Для реализации фильтра необходимо разложить полином знаменателя на множители. Если среди корней полинома есть комплексные, то полином представляется в виде произведения сомножителей первого и второго порядка.

$$W(P) = \frac{K_0}{(1 + a_1 P + b_1 P^2) \cdot (1 + a_2 P + b_2 P^2) \cdot \dots},$$

где a_i и b_i – положительные действительные коэффициенты. Для нечетных порядков полинома коэффициент b_1 равен нулю.

Фильтры Баттерворта, Чебышева и Бесселя отличаются значениями коэффициентов a_i и b_i передаточной функции. Значения коэффициентов для фильтров до третьего порядка приведены в таблице 1. Для фильтров более высокого порядка их можно найти в [3,4,5].

Таблица 1. Коэффициенты передаточной функции для расчета фильтров различных типов

Тип фильтра	n	i	a_i	b_i
Фильтр Бесселя	1	1	1,0000	0,0000
	2	1	1,3617	0,6180
	3	1	0,7560	0,0000
		2	0,9996	0,4772
Фильтр Баттерворта	1	1	1,0000	0,0000
	2	1	1,4142	1,0000
	3	1	1,0000	0,0000
		2	1,0000	1,0000
Фильтр Чебышева с неравномерностью 0,5 дБ	1	1	1,0000	0,0000
	2	1	1,3614	1,3827
	3	1	1,8636	0,0000
		2	0,6402	1,1931
Фильтр Чебышева с неравномерностью 1 дБ	1	1	1,0000	0,0000
	2	1	1,3022	1,5515
	3	1	2,2136	0,0000
		2	0,5442	1,2057
Фильтр Чебышева с неравномерностью 2 дБ	1	1	1,0000	0,0000
	2	1	1,1813	1,7775
	3	1	2,7994	0,0000
		2	0,4300	1,2036
Фильтр Чебышева с неравномерностью 3 дБ	1	1	1,0000	0,0000
	2	1	1,0650	1,9305
	3	1	3,3496	0,0000
		2	0,3559	1,1923

Схемотехника ФНЧ

Простые схемы ФНЧ первого порядка показаны на рис. 1.3.

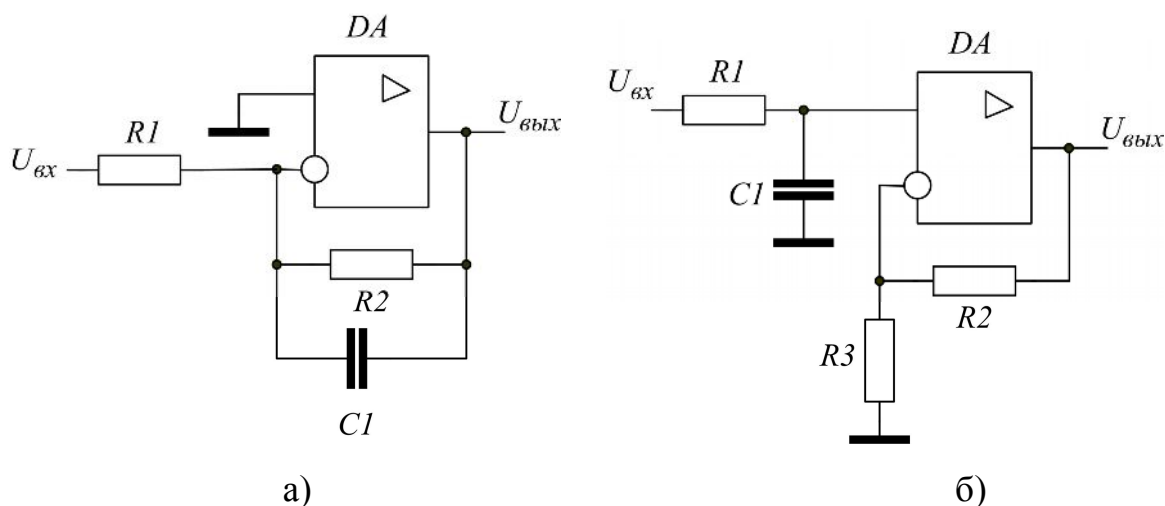


Рис. 1.3. ФНЧ первого порядка: а) на основе инвертирующего усилителя, б) на основе неинвертирующего усилителя.

Передаточная функция фильтра (рис. 1.3а) имеет вид

$$W(P) = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \omega_0 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot P}.$$

Откуда вытекают формулы для расчета

$$K_0 = -R_2 / R_1,$$

$$a_1 = \omega_0 \cdot R_2 \cdot C_1.$$

Коэффициент передачи этого фильтра отрицательный.

Для фильтра на рис. 1.3б передаточная функция определяется выражением

$$W(P) = \frac{R_2 / R_3 + 1}{1 + \omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot P}.$$

Формулы для расчета фильтра записываются в виде

$$K_0 = R_2 / R_3 + 1,$$

$$a_1 = \omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1.$$

Примером ФНЧ второго порядка является фильтр со сложной отрицательной обратной связью, схема которого, известна как схема Рауха (рис. 1.4.).

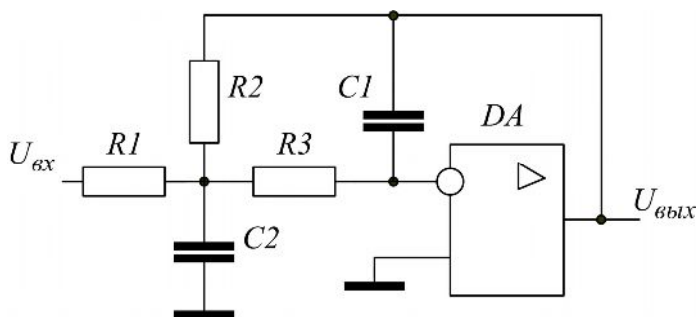


Рис. 1.4. ФНЧ по схеме Рауха

Передаточная функция данного фильтра определяется выражением

$$W(P) = - \frac{R_2 / R_1}{1 + \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \right) \cdot P + \omega_0^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot P^2}.$$

Соответствующая система уравнений для расчета параметров фильтра записывается в виде

$$K_0 = -R_2 / R_1,$$

$$a_1 = \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \right),$$

$$b_1 = \omega_0^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3.$$

Коэффициент передачи фильтра отрицательный.

ФНЧ второго порядка на основе операционного усилителя может быть построен также по схеме Салена - Кея, в которой используется положительная обратная связь (рис. 1.5).

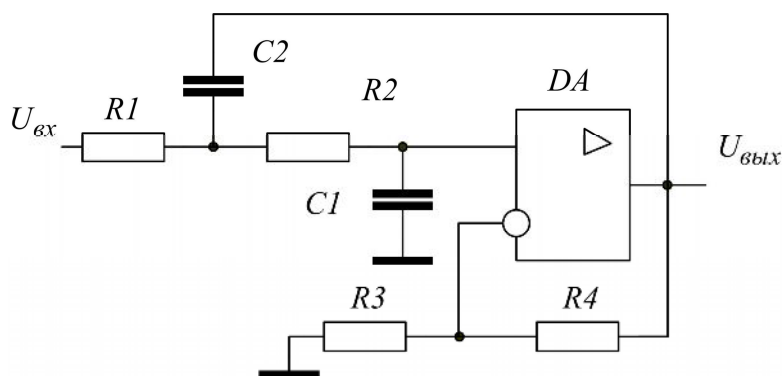


Рис. 1.5. ФНЧ по схеме Саллена-Кея

Передаточная функция фильтра имеет вид

$$W(P) = \frac{1 + R_4 / R_3}{1 + \omega_0 \left[C_1 \cdot (R_1 + R_2) - R_1 \cdot R_4 \cdot C_2 / R_3 \right] \cdot P + \omega_0^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot P^2}.$$

Откуда вытекает система уравнений для расчета:

$$K_0 = 1 + R_4 / R_3,$$

$$a_1 = \omega_0 \left[C_1 \cdot (R_1 + R_2) - R_1 \cdot R_4 \cdot C_2 / R_3 \right],$$

$$b_1 = \omega_0^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2.$$

Коэффициент передачи этой схемы K_0 должен быть меньше 3. В противном случае схема переходит в режим генератора синусоидальных колебаний.

Для реализации ФНЧ третьего и более высокого порядка обычно фильтры первого и второго порядка соединяют последовательно. В этом случае характеристики звеньев фильтра перемножаются.

1.3. Фильтры верхних частот

Передаточные функции ФВЧ

Передаточные функции ФВЧ можно получить из аналогичных функций ФНЧ, заменив оператор P на $1/P$. При этом частота среза фильтра ω_0 остается неизменной, а K_0 следует понимать как коэффициент передачи на бесконечно большой частоте.

$$K(P) = \frac{K_0}{\left(1 + a_1 \frac{1}{P} + b_1 \frac{1}{P^2}\right) \left(1 + a_2 \frac{1}{P} + b_2 \frac{1}{P^2}\right)}.$$

Методы оптимизации и расчета коэффициентов аппроксимирующих полиномов фильтров при этом не изменяются.

Схемотехника ФВЧ

Схемы для реализации ФВЧ первого и второго порядка получаются из схем ФНЧ, если поменять местами резисторы и конденсаторы всех времязадающих RC-цепей.

Примеры схем ФВЧ первого порядка представлены на рис. 1.6.

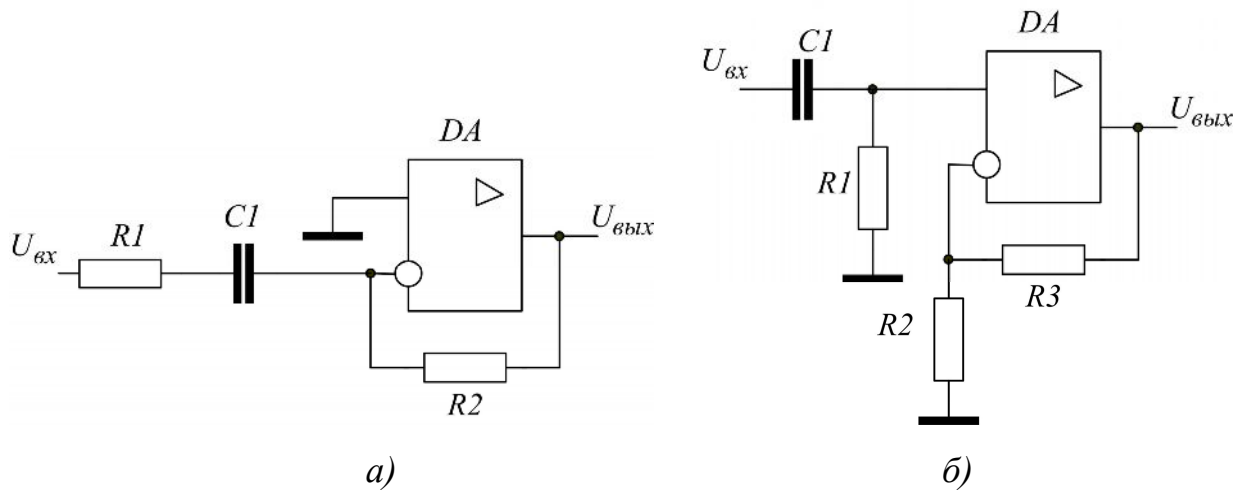


Рис. 1.6. ФВЧ первого порядка: а) на основе инвертирующего усилителя, б) на основе неинвертирующего усилителя

Передаточная функция фильтра рис. 1.6а имеет вид

$$W(P) = -\frac{R_2 / R_1}{\left(1 + \frac{1}{\omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1}{P}\right)}.$$

В результате имеем следующую систему уравнений для расчета

$$K_0 = -R_2 / R_1,$$

$$a_1 = 1 / \omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1.$$

Для схемы на рис. 1.6б имеем

$$W(P) = \frac{R_3 / R_2 + 1}{\left(1 + \frac{1}{\omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1}{P}\right)},$$

$$K_0 = R_3 / R_2 + 1,$$

$$a_1 = 1 / \omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1.$$

Схема Рауха для ФВЧ второго порядка (схема со сложной отрицательной обратной связью) изображена на рис. 1.7.

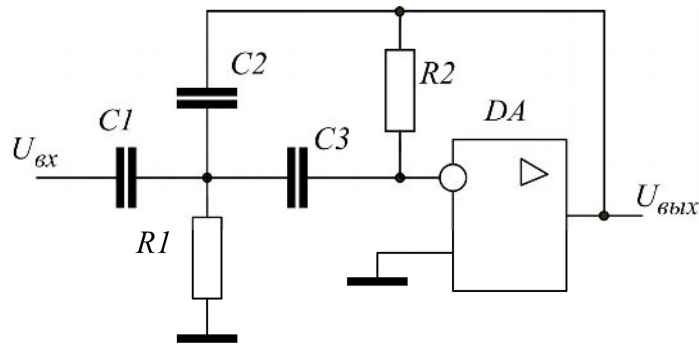


Рис. 1.7. ФВЧ второго порядка по схеме Рауха

Передаточная функция фильтра

$$W(P) = - \frac{C_1 / C_2}{1 + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 C_2 C_3 \omega_0} \frac{1}{P} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3 \omega_0^2} \frac{1}{P^2}}.$$

где:

$$K_0 = C_1 / C_2;$$

$$a_1 = (C_1 + C_2 + C_3) / R_2 C_2 C_3 \omega_0;$$

$$b_1 = 1 / R_1 R_2 C_2 C_3 \omega_0^2.$$

Еще одним примером реализации ФВЧ второго порядка является фильтр по схеме Саллена - Кея, показанный на рис. 1.8, который получается заменой в схеме ФНЧ на рис. 1.5 конденсаторов на резисторы, а резисторов на конденсаторы.

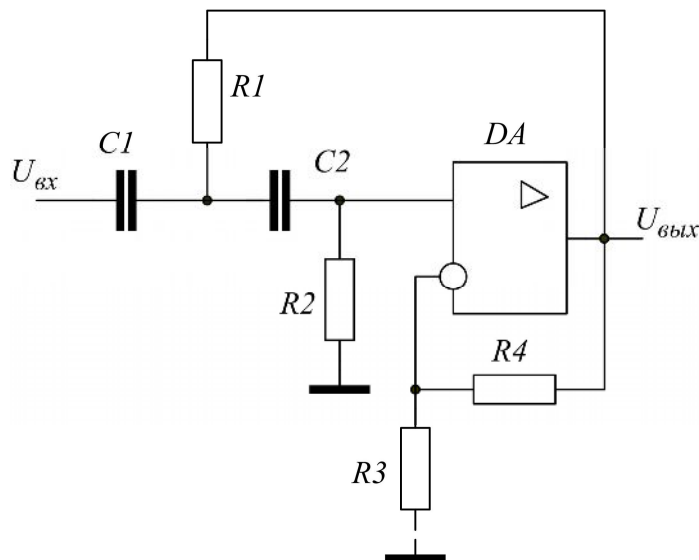


Рис. 1.7. ФВЧ второго порядка по схеме Саллена - Кея

Передаточная функция фильтра имеет вид

$$W(P) = \frac{1 + R_4/R_3}{1 + \frac{R_1(C_1 + C_2) + R_2C_2R_4/R_3}{R_1R_2C_1C_2\omega_0} \frac{1}{P} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2\omega_0^2} \frac{1}{P^2}}$$

Соответственно расчетные формулы записываются в виде:

$$K_0 = 1 + R_4/R_3;$$

$$a_1 = \frac{R_1(C_1 + C_2) + R_2C_2R_4/R_3}{R_1R_2C_1C_2\omega_0};$$

$$b_1 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2\omega_0^2}.$$

Полученные расчетные формулы позволяют синтезировать схемы при заданных коэффициентах передаточной функции.

2. Задание на курсовой проект

2.1. Исходные данные для расчета

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2 и 3. Вариант определяется двумя последними цифрами шифра зачетки. Цифра единиц указывает номер исходных данных в табл. 2, цифра десятков — в табл. 3.

Условные обозначения:

$f_0 = 2\pi\omega_0$ — частота среза фильтра в кГц;

K_0 — коэффициент усиления фильтра в полосе пропускания;

$AЧХ$ — тип АЧХ фильтра (ФНЧ, ФВЧ);

Φ — метод оптимизации фильтра: Ба — фильтр Баттерворта, Бе — фильтр Бесселя, Ч05 — фильтр Чебышева с неравномерностью 0,5 дБ, Ч1 — фильтр Чебышева с неравномерностью 1 дБ, Ч2 — фильтр Чебышева с неравномерностью 2 дБ, Ч3 — фильтр Чебышева с неравномерностью 3 дБ;

Таблица 2

№ варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_0, [\text{кГц}]$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$AЧХ$	ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ

Таблица 3

№ варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_0	10	12	15	18	20	22	26	30	32	35
Φ	Ба	Бе	Ч05	Ч1	Ч2	Ч3	Ба	Бе	Ч05	Ч1

2.2. Программа работы

1. Спроектировать активный фильтр по исходным данным, приведенным в табл. 2 и 3. Порядок фильтра и рекомендуемые к использованию схемы задаются преподавателем. В соответствии с заданными параметрами и типом фильтра рассчитать его передаточную функцию. Составить принципиальную электрическую схему. При выборе элементов схемы руководствоваться библиотеками элементов пакета Multisim 8.0 фирмы National Instruments.

2. Собрать модель фильтра в пакете Multisim. Проверить его работоспособность при синусоидальных входных сигналах. Определить частоту среза и коэффициент усиления в полосе пропускания. Полученные значения не должны отличаться от заданных более, чем на 5%. Зарисовать осциллограммы сигналов при частотах $f = 0,1f_0, f_0, 10f_0$. Определить диапазон изменения амплитуды входного сигнала, в котором фильтр работоспособен.

3. Используя построитель частотных характеристик (Bode Plotter), построить в Multisim АЧХ и ФЧХ фильтра в логарифмическом масштабе. Определить неравномерность частотной характеристики фильтра. Сравнить результаты с теоретическими данными, соответствующими заданному типу фильтра.

4. Используя функциональный генератор Function Generator в режиме генерации прямоугольных импульсов и осциллограф, построить переходную характеристику фильтра. Определить время переходного процесса на выходе фильтра и перерегулирование. Объяснить результаты.

5. Исследовать работу фильтра при треугольном входном сигнале с частотой, находящейся в полосе пропускания фильтра.

6. Выбрать реальные компоненты для создания схемы. Оформить принципиальную электрическую схему фильтра в виде чертежа в соответствии с действующими стандартами.

7. Оформить пояснительную записку к проекту в соответствии с требованиями [7].

3. Методические рекомендации

3.1. Расчет параметров фильтров

При расчете параметров фильтров следует учесть, что расчет схемы требует решения системы уравнений первого или второго порядка. Количество рассчитываемых элементов схемы всегда больше, чем количество уравнений. Поэтому часть элементов схемы предварительно выбирается. Рекомендуется задавать значения емкостей конденсаторов и вычислять необходимые значения сопротивлений резисторов. При проектировании фильтров второго порядка следует учесть, что решение задачи связано с поиском корней квадратного уравнения. Выбор емкостей конденсаторов оказывает существенное влияние на характер решения.

3.2. Выбор компонентов

При переходе от расчетных значений сопротивлений и емкостей RC -цепей следует учитывать конструктивные и технологические особенности элементов.

Конденсаторы обычно изготавливаются с точностью 20% и при их изготовлении обычно используется ряд E12, разрешающий выбор только 12 номиналов емкостей: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 30, 33, 39, 47, 56, 68 82.

Ряд E24 применяется при изготовлении резисторов. Он допускает использование 24 номинальных значений сопротивлений: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 82, 91.

Используемые значение сопротивления и емкости из ряда могут быть умножены на 10^n , где n – целое положительное число или нуль. Например, можно использовать резисторы: 13 Ом, 130 Ом, 1,3 кОм, 13 кОм, 130 кОм и т.д.

Использовать в схеме резисторы с сопротивлением менее 1 кОм нежелательно, т.к. это неминуемо приведет к увеличению энергопотребления схемы и затруднит выбор операционного усилителя.

Для выбора операционных усилителей необходимо предварительно определить их параметры: выходное сопротивление $R_{вых}$, входное

сопротивление R_{ex} , частоту единичного усиления f_T . Ориентировочно можно определить эти параметры по формулам:

$$R_{\text{вых}} \leq R_{\text{min}} / 10; R_{\text{ex}} \geq 10R_{\text{макс}}; f_T \geq K_0 f_0,$$

где $R_{\text{мин}}$ и $R_{\text{макс}}$ – соответственно номиналы минимального и максимального резисторов в схеме спроектированного фильтра.

При выборе конкретных элементов принципиальной схемы целесообразно использовать ресурсы Интернет, например: www.chip-dip.ru, www.platan.ru и др.

3.4. Оформление проекта

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и графического материала

Пояснительная записка

Пояснительная записка является документом, содержащим обоснование принятых при разработке решений, описание разработанного устройства.

Пояснительная записка курсового проекта должна содержать следующие разделы:

- введение,
- техническое задание,
- расчет принципиальной схемы и выбор компонентов,
- исследование фильтра,
- заключение,
- список использованных источников информации.

Во введении курсового проекта необходимо сформулировать поставленную задачу, её особенность и выбрать критерии проектирования.

Расчет изделия должен содержать расчетные схемы, расчетные формулы, результаты расчетов, обоснование выбора компонентов из справочников. В разделе приводятся все необходимые расчеты отдельных узлов принципиальной схемы и расчеты параметров элементов, обеспечивающих их совместную работу.

Пояснительная записка должна состоять из 10-12 страниц текста с иллюстрациями, выполненными на одной стороне листа белой бумаги формата А4.

Оформление чертежей

– Графический материал проекта должен содержать принципиальную схему, оформленную на листе стандартного формата. Лист чертежа должен иметь рамку и основную надпись.

Все чертежи, разработанные в проекте, должны быть подписаны студентом и преподавателем - руководителем проекта с указанием даты подписания.

Подробные правила выполнения схем изложены в [7].

4. Примеры расчетов и исследований

Пример 1. Фильтр низкой частоты первого порядка

Исходные данные:

- тип фильтра – фильтр низкой частоты (ФНЧ);
- метод оптимизации фильтра – фильтр Баттерворта;
- частота среза фильтра $f_0 = 5$ кГц;
- коэффициент усиления фильтра в полосе пропускания $K_0 = 5$;
- схема фильтра – фильтр с отрицательной обратной связью

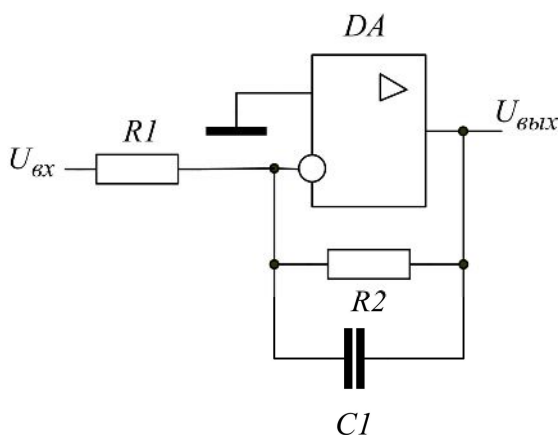


Рис. 4.1. Схема фильтра

Передаточная функция

$$W(P) = -\frac{R_2 / R_1}{1 + \omega_0 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot P}$$

где: коэффициент передачи $K_0 = R_2 / R_1 = 5$ по условиям задания;

коэффициент $a_1 = \omega_0 R_2 C_1 = 1$ по табл. 1.

Расчет параметров

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 31415,9 \text{ 1/с};$$

Из ряда E12 выбираем: $C_1 = 2,2 \text{ нФ}$;

Находим: $R_2 = 1 / \omega_0 C_1 = 14,5 \text{ кОм}$;

$$R_1 = R_2 / K_0 = 2,89 \text{ кОм}.$$

Из ряда E24 выбираем: $R_2 = 15 \text{ кОм}$, $R_1 = 3 \text{ кОм}$.

Модель

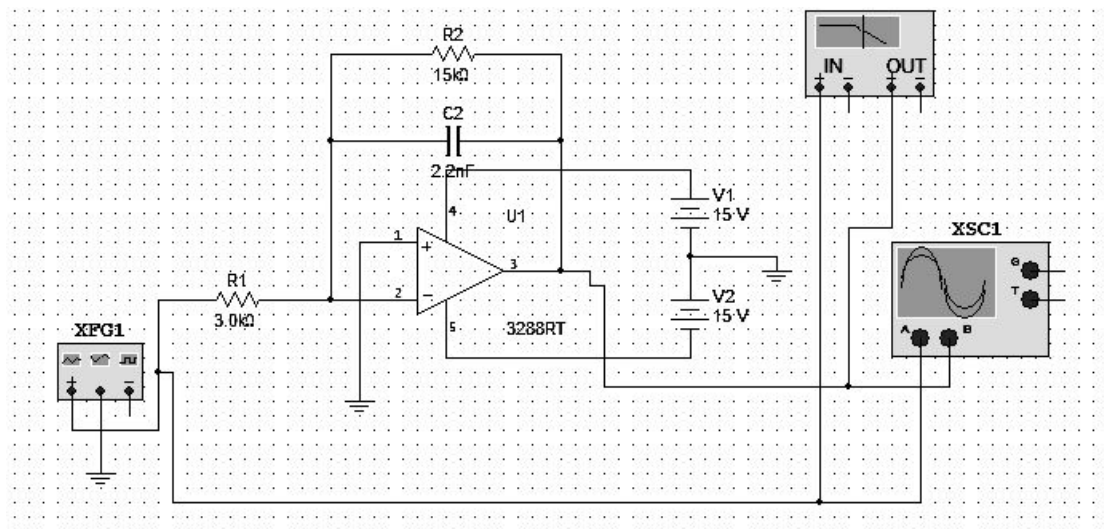


Рис. 4.2. Модель фильтра

Результаты исследований

Исследования фильтра проводятся в программе Multisim/ Исследуется работа с синусоидальными входными сигналами. Анализируется АЧХ и ФЧХ фильтра. Результаты отражены на рис. 4.1 – 4.7.

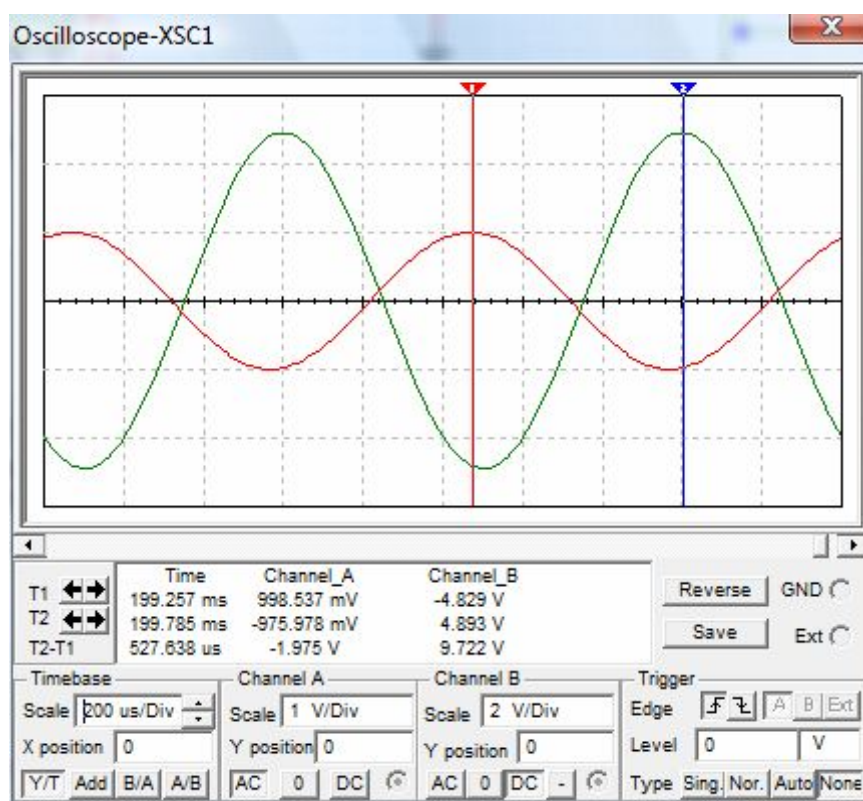


Рис. 4.3. Осциллограммы при частоте 1 кГц

Соотношение амплитуд $4,89/0,998 \approx 4,89$ примерно соответствует заявленному коэффициенту усиления $K_0 = 5$.

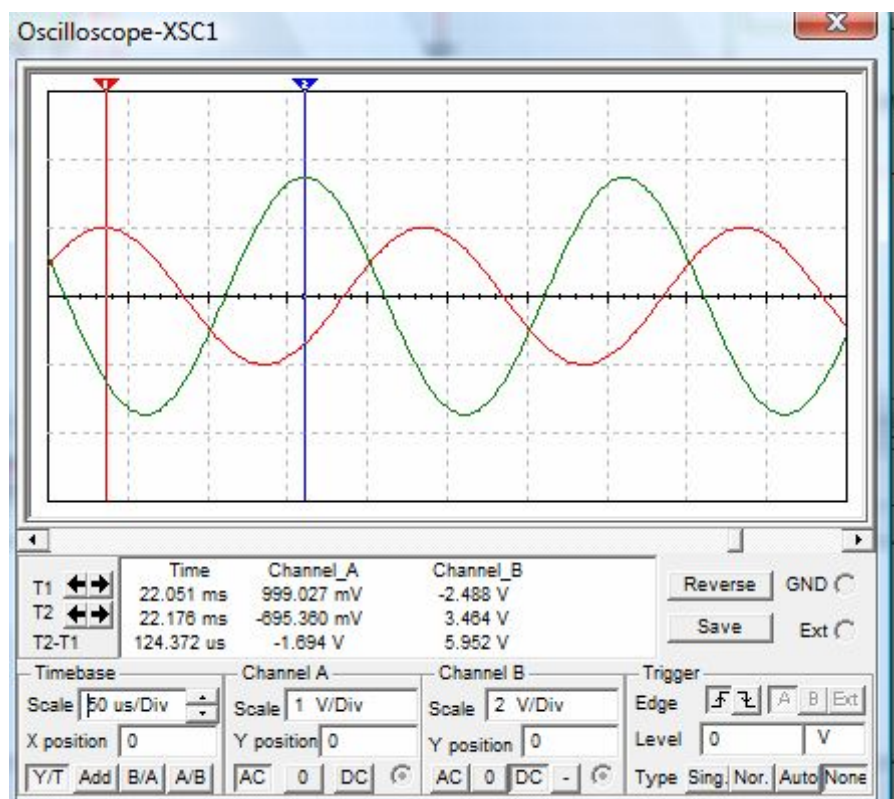


Рис. 4.4. Осциллограммы при частоте 5 кГц

На частоте среза сигнал ослабляется примерно в $\sqrt{2}$ раз:
 $5 * 0,99 / 3,46 = 1,43$.

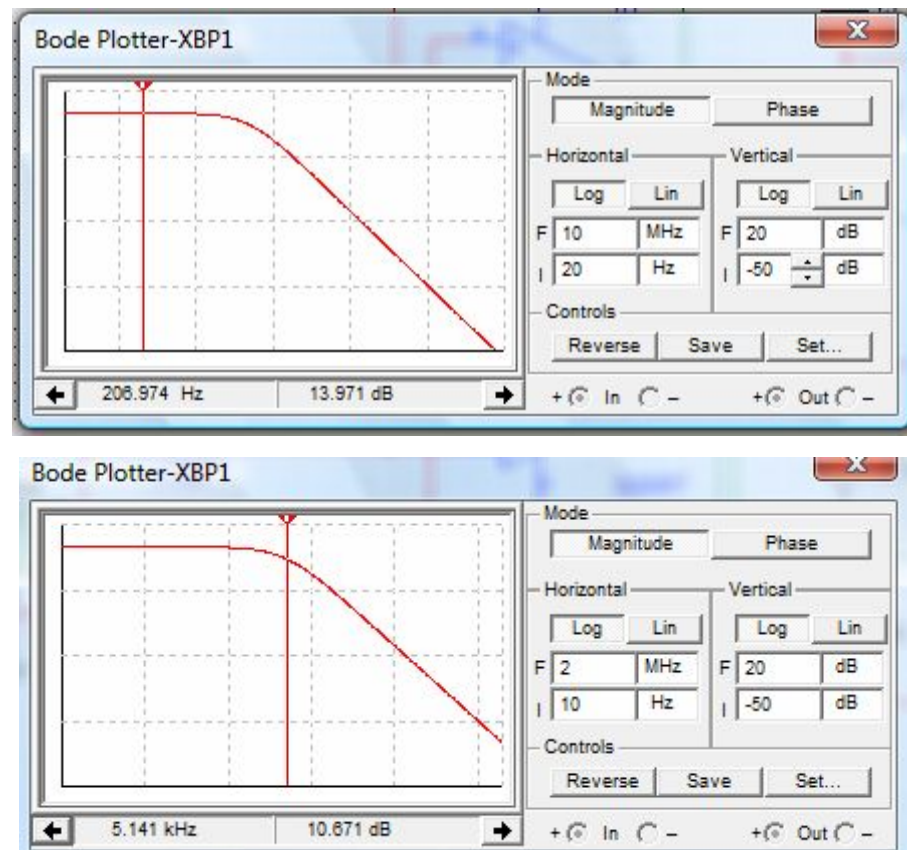


Рис. 4.5. АЧХ фильтра

Максимальный коэффициент усиления 13,97 дБ соответствует расчетному $20 \lg 5 = 13,97$. Ослабление на частоте среза $13,97 - 10,67 = 3,3$ (теоретически 3), наклон – 20 дБ/дек.

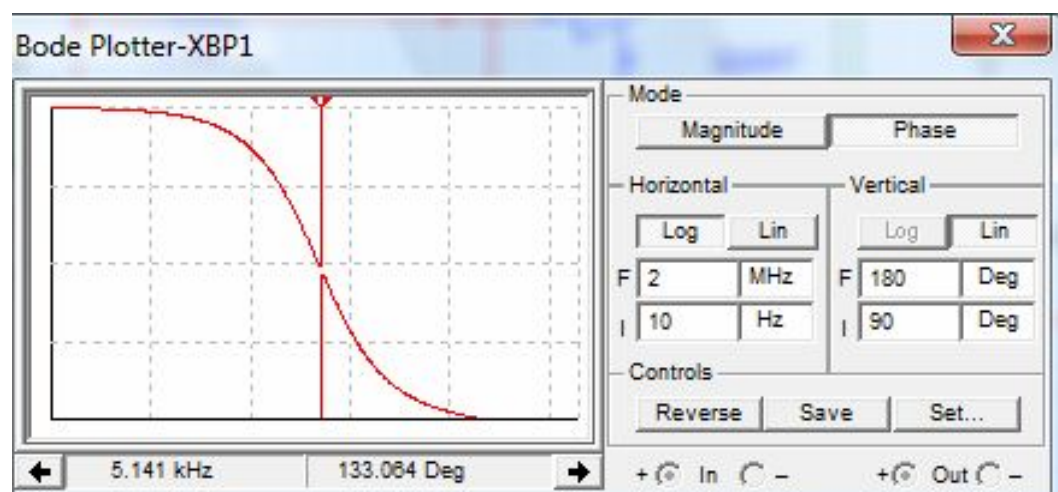


Рис. 4.6. ФЧХ фильтра

Фазовый сдвиг в полосе пропускания меняется от 180 до 133 градусов.

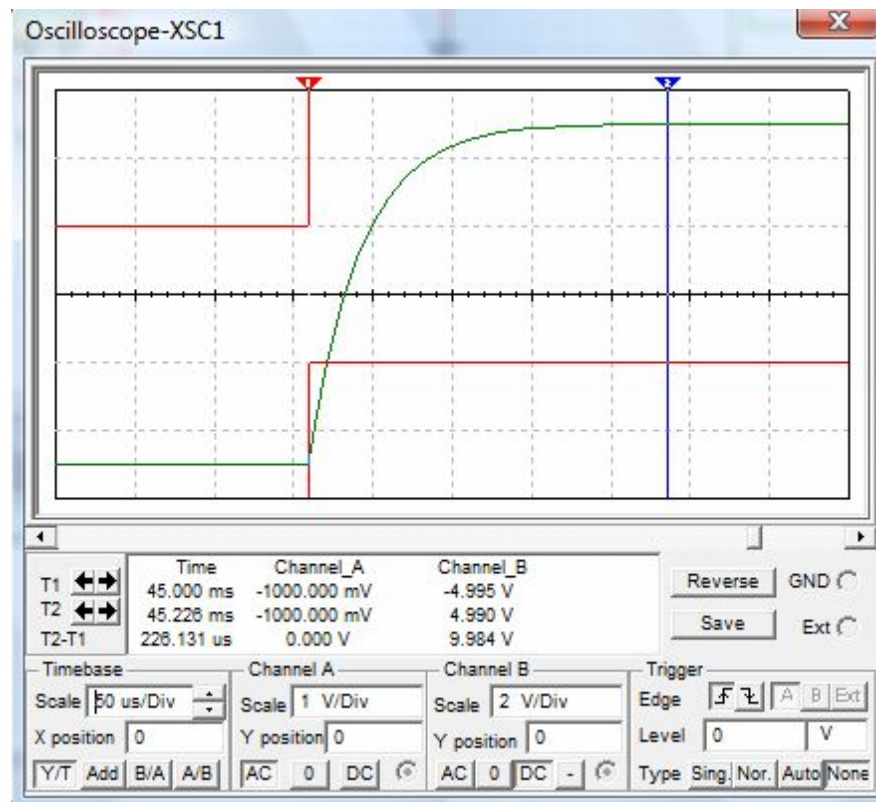


Рис. 4.7. Переходная характеристика фильтра

Переходная характеристика монотонная, без перерегулирования. Время переходного процесса примерно 150 мкс.

Пример 2. Фильтр высокой частоты второго порядка

Исходные данные:

- тип фильтра – фильтр высокой частоты (ФНЧ);
- метод оптимизации фильтра – фильтр Бесселя;
- частота среза фильтра $f_0 = 5$ кГц;
- коэффициент усиления фильтра в полосе пропускания $K_0 = 5$;
- схема фильтра – схема Рауха.

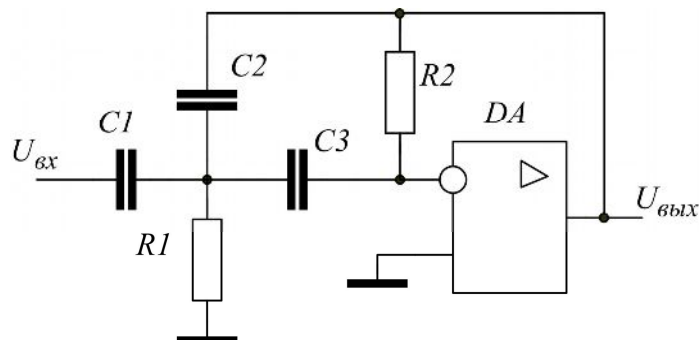


Рис. 4.8. Схема фильтра

Передаточная функция

$$W(P) = - \frac{C_1 / C_2}{1 + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 C_2 C_3 \omega_0} \frac{1}{P} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3 \omega_0^2} \frac{1}{P^2}}.$$

где:

$$K_0 = C_1 / C_2 = 5;$$

$$a_1 = (C_1 + C_2 + C_3) / R_2 C_2 C_3 \omega_0 = 1,3617;$$

$$b_1 = 1 / R_1 R_2 C_2 C_3 \omega_0^2 = 0,6180 \text{ (табл. 1).}$$

Расчет параметров

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 31415,9 \text{ 1/с;}$$

Из ряда E12 выбираем: $C_1 = C_3 = 51 \text{ нФ;}$

Находим: $C_2 = C_1 / 5 = 10,2 \text{ нФ;}$ выбираем $C_2 = 10 \text{ нФ}$

$$R_2 = (C_1 + C_2 + C_3) / a_1 C_2 C_3 \omega_0 = 50,41 \text{ кОм;}$$

$$R_1 = 1 / b_1 R_2 C_2 C_3 \omega_0^2 = 6,251 \text{ кОм}$$

Из ряда E24 выбираем: $R_2 = 51 \text{ кОм, } R_1 = 6,2 \text{ кОм.}$

Модель

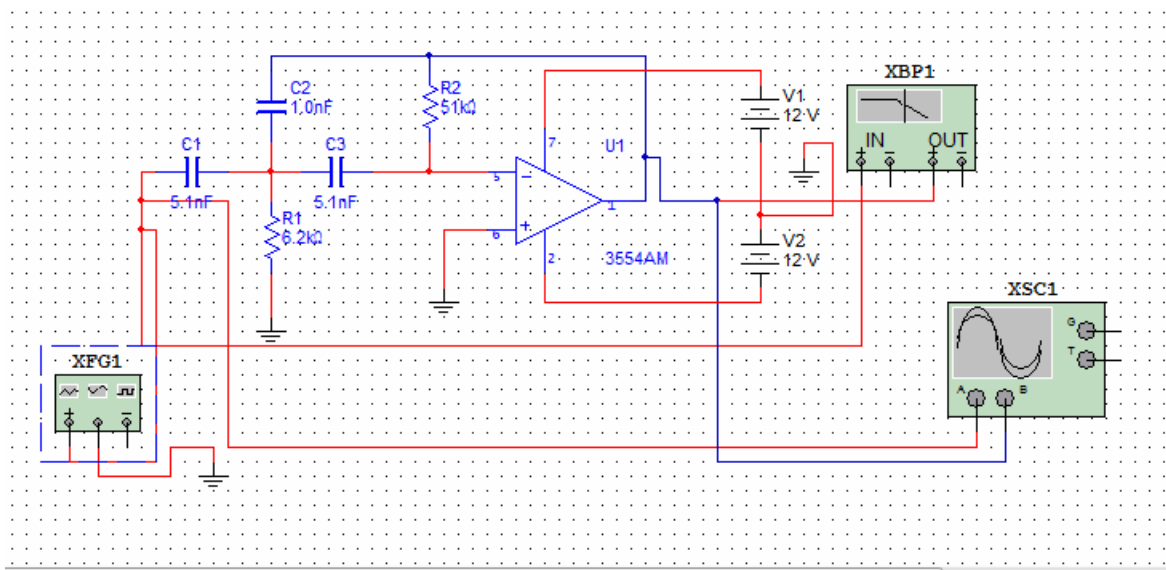


Рис. 4.9. Модель фильтра

Результаты исследований

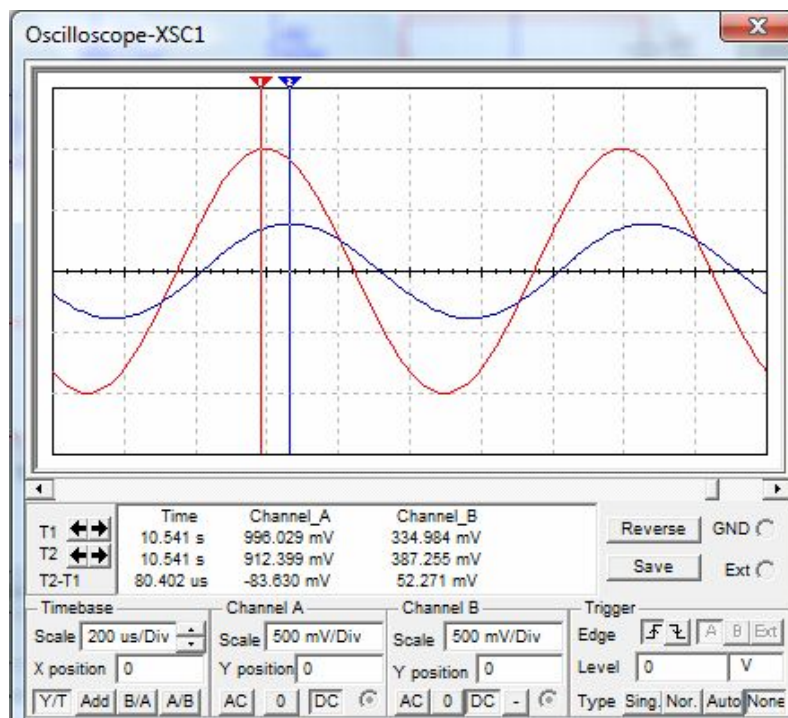


Рис. 4.3. Осциллограммы при частоте 1 кГц

Соотношение амплитуд $996/387 = 2,57$ - меньше заявленного коэффициента усиления. Сигнал ослабляется.

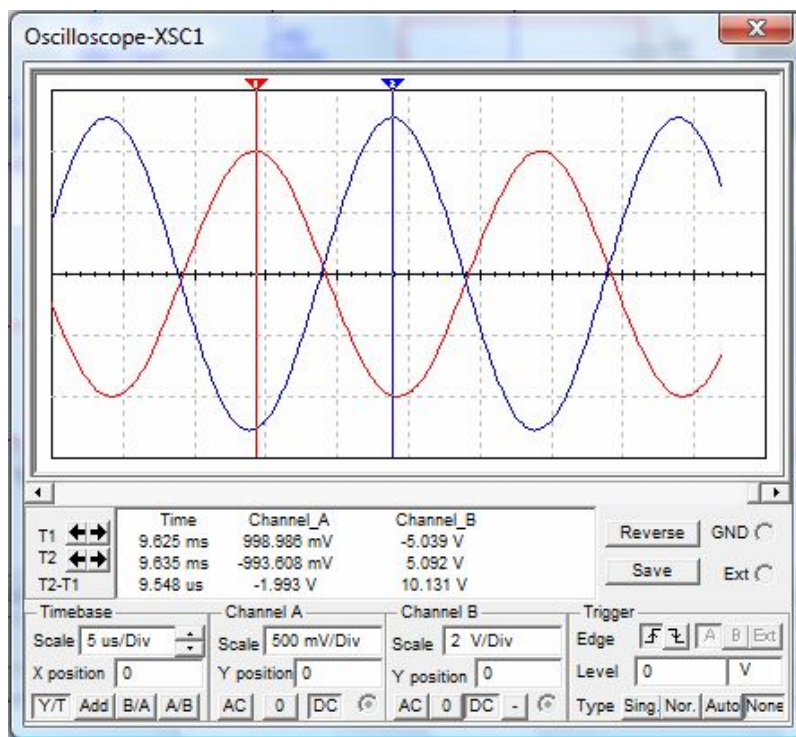


Рис. 4.3. Осциллограммы при частоте 50 кГц

Соотношение амплитуд $5,092/0,999 = 5,097$, что примерно соответствует расчетному коэффициенту усиления фильтра $K_0 = 5$.

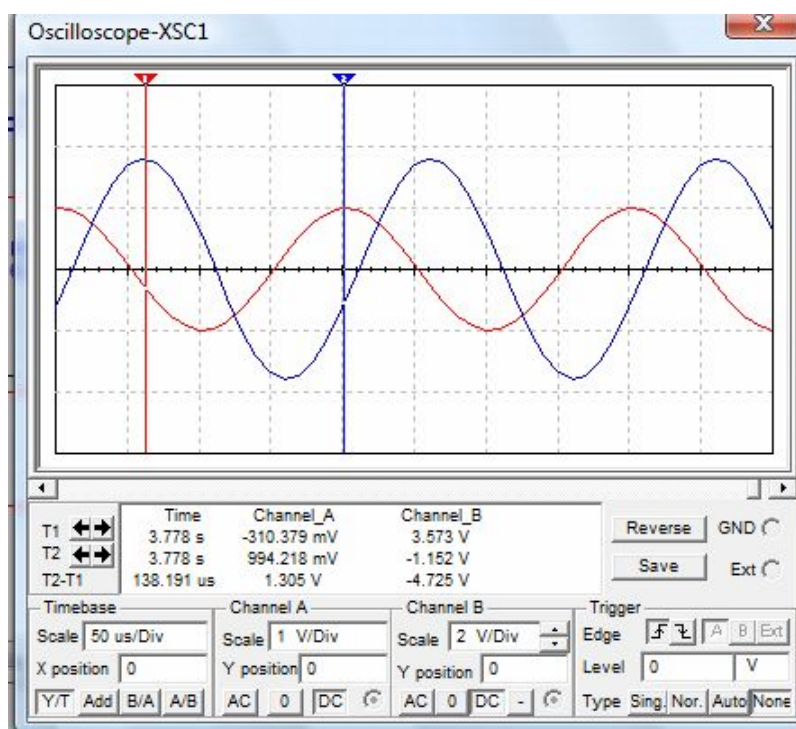


Рис. 4.4. Осциллограммы при частоте 5 кГц

Соотношение амплитуд $3,571/0,994 = 3,59$ - меньше заявленного коэффициента усиления в 1,39 раз. Теоретически сигнал должен ослабиться в $\sqrt{2}$ раз.

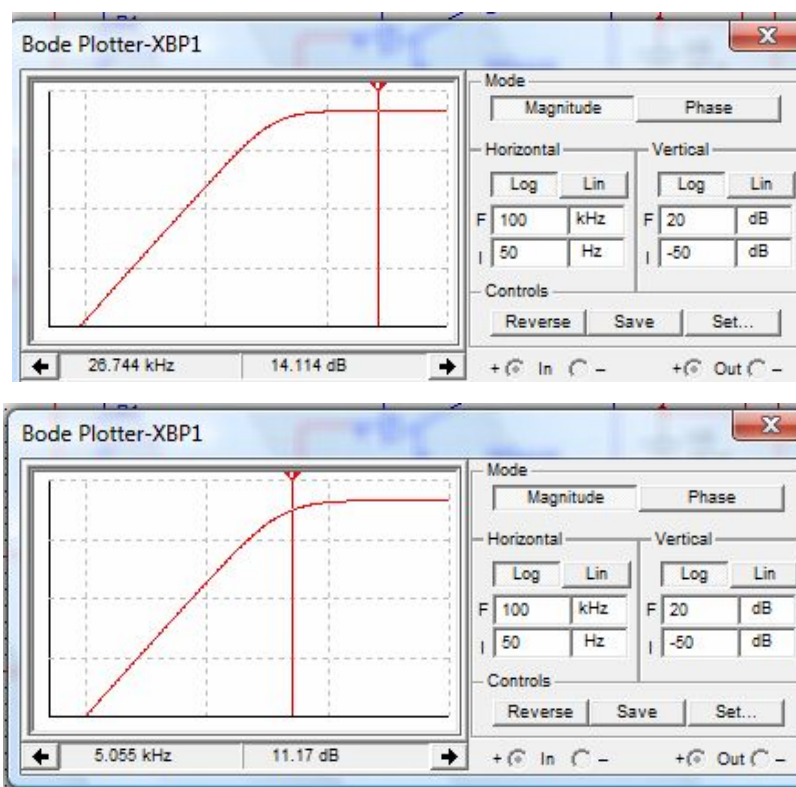


Рис. 4.5. АЧХ фильтра

АХХ не имеет колебаний, на характеристике 14,1 дБ примерно соответствует заявленному коэффициенту усиления $20\lg 5 = 13,98$. На частоте среза ослабление $\cong 14,1 - 11,17 = 2,93$ дБ. Наклон характеристики примерно 40 дБ/дек.

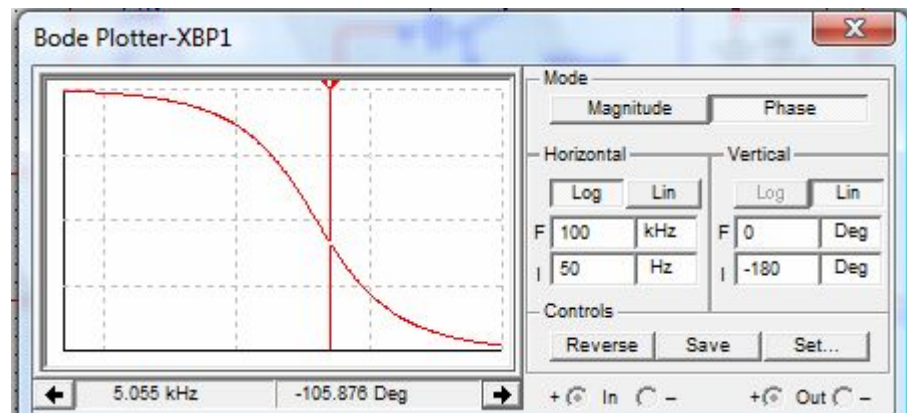


Рис. 4.6. ФЧХ фильтра

Задержка сигнала в полосе пропускания меняется от 105 до 180 градусов.

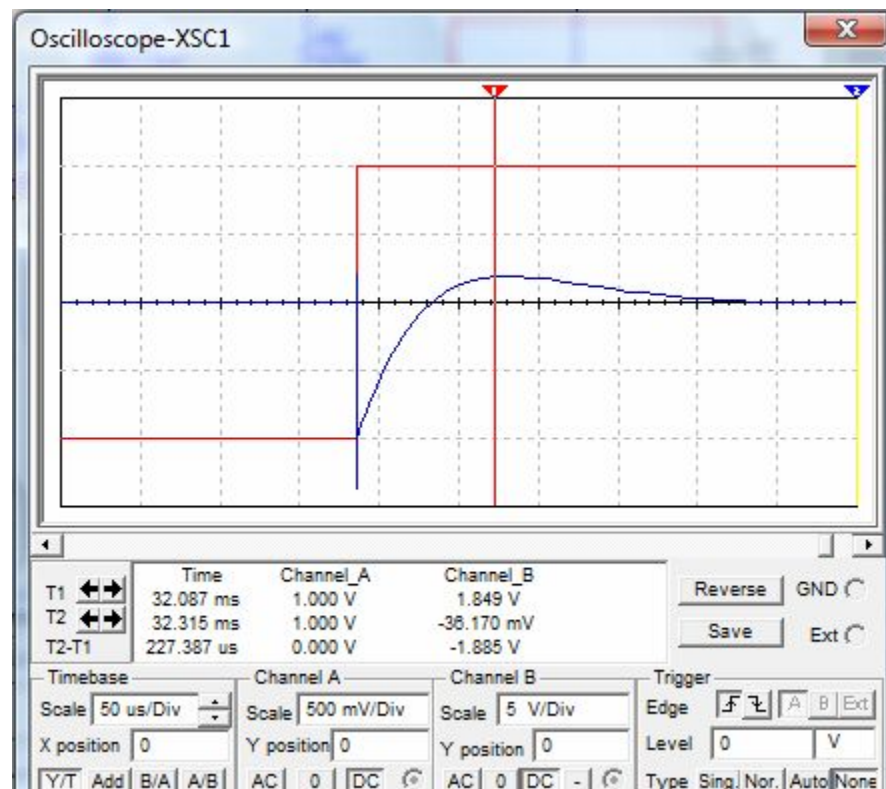


Рис. 4.7. Переходная характеристика фильтра

Переходный процесс имеет одно колебание; перерегулирование 18,5%, время переходного процесса $\cong 150$ мкс.

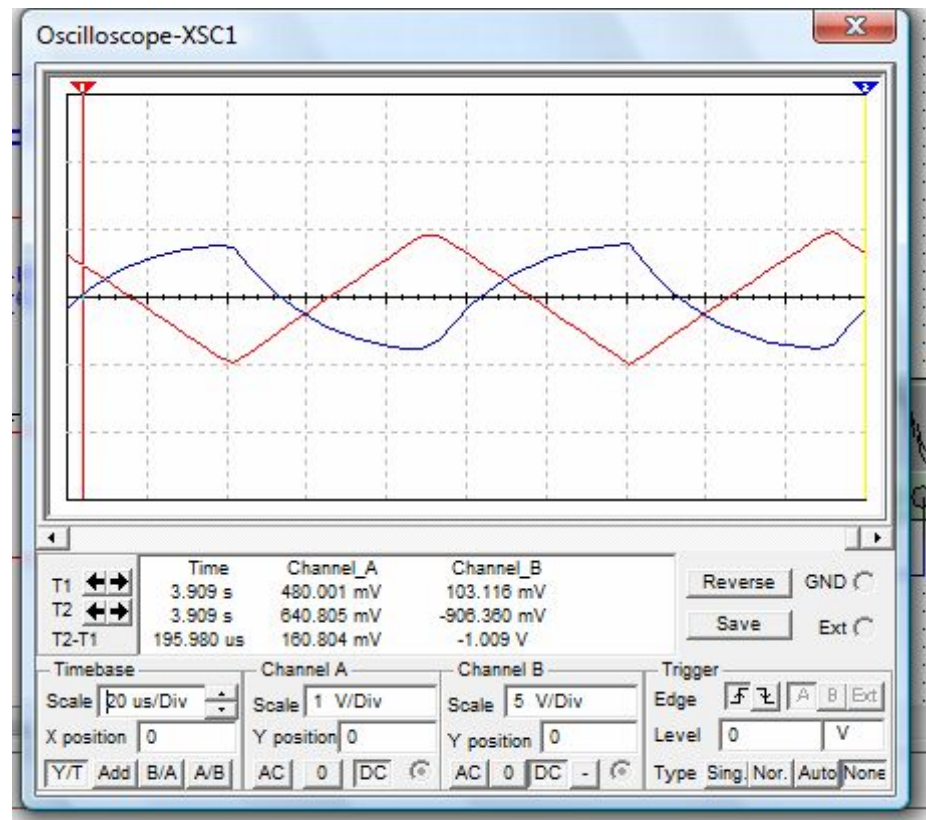


Рис. 4.8. Реакция фильтра на треугольный сигнал частотой 10 кГц

При прохождении через фильтр треугольный сигнал искажается из-за различных фазовых сдвигов разных гармоник.

Источники информации

1. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника/ Ю.Ф.Опадчий. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.- 768 с.
2. Водовозов, А.М. Основы электроники. – Вологда, ВоГТУ, 2002 г.
3. Зааль, Р. Справочник по расчету фильтров. – М. Радио и связь, 1983 г.
4. Мошиц, Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров/ Г.Мошиц, П. Хорн. – М., Мир, 1984 г.
5. Титце, У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника/ У.Титце, К. Шенк. – М., Мир., 1982 г.
6. Введение в Multisim. Режим доступа: <http://Ccsfs\publish\Методические указания\Электроника>.
7. Проекты дипломные и курсовые. Общие требования и правила оформления расчетно-пояснительной записки. - СТО ВоГТУ 2.7-2006 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Основные теоретические сведения	3
1.1. Характеристики, параметры и математическое описание фильтров	3
1.2. Фильтры нижних частот	6
1.3. Фильтры верхних частот	10
2. Задание на курсовой проект	13
2.1. Исходные данные для расчета	13
2.2. Программа работы	14
3. Методические рекомендации	15
3.1. Расчет параметров фильтров	15
3.2. Выбор компонентов	15
3.4. Оформление проекта	16
4. Примеры расчетов и исследований	17
Пример 1. Фильтр низкой частоты первого порядка	17
Пример 2. Фильтр высокой частоты второго порядка	21
Источники информации	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример оформления чертежа	27
ОГЛАВЛЕНИЕ	28