

Московский государственный технический университет
им.Н.Э. Баумана

Князькова Т.О., Гулова Н.А.

Анализ активного фильтра на базе операционного усилителя

*Методические указания по выполнению домашнего задания по курсу
«Электротехника и электроника» раздел «Аналоговая электроника»*

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2013

Князькова Татьяна Олеговна

Гулова Нели Ахтамовна

Рецензент: Мальцев Андрей Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры МТ 10

Рекомендовано кафедрой Электротехники и промышленной электроники и

Учебно-методической комиссией НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Выполнение домашнего задания «Анализ активного фильтра на базе операционного усилителя» предусмотрено учебным планом дисциплины «Электротехника и электротехника» для студентов факультетов СМ и РК второго и третьего курсов.

Домашнее задание выполняется с целью закрепления теоретических знаний и приобретения навыков работы в компьютерной программе моделирования электронных схем *Multisim 10.1* по указанной дисциплине. В теоретической части предлагается изучить свойства операционных усилителей, частотные характеристики фильтров. В работе подробно и доступно расписана методика анализа электронных устройств на примере активного фильтра. По результатам расчета студенты осуществляют моделирование электронной схемы активного фильтра в программе *Multisim 10.1*, которое позволит наглядно проверить правильность расчетов и выполнить необходимые измерения.

Выполнение домашнего задания № 2 первая часть

по курсу «Электротехника и электроника»

Тема «Анализ активного фильтра на базе операционного усилителя »

Цель работы: освоить принципы и метод Боде по построению активного фильтра с помощью частотных характеристик. Освоить инженерную компьютерную программу *Multisim*, для проектирования электронных схем.

1 Задание

1. Изучить теоретическое введение и методические указания по выполнению домашнего задания.
2. Построить ЛАЧХ активного фильтра в соответствии с методическими указаниями.
3. Построить ЛФЧХ активного фильтра.
4. По ЛАЧХ вывести формулу коэффициента усиления в канонической форме.
5. Собрать схему в среде *Work Bench* или *Multisim*. Снять с помощью частотного анализатора - Боде-плоттера ЛАЧХ и ЛФЧХ активного фильтра. Сравнить результаты с построением.
6. Определить величину и фазу комплексного коэффициента усиления на частотах: $f = 10, 100, 1000, 10000$ Гц.
8. Определить коэффициент усиления с помощью осциллографа.
9. Ответить на контрольные вопросы, приведенные в приложении 1.

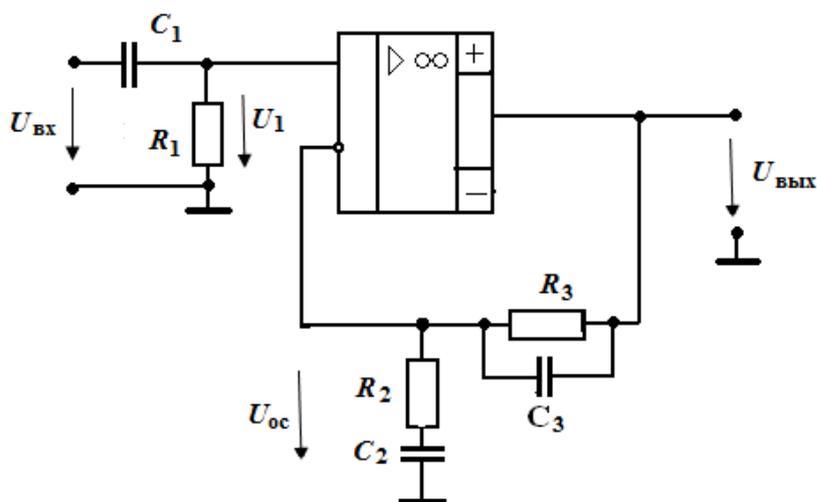


Рис. 1. Схема активного фильтра на базе ОУ

2 Указания по оформлению расчетно-графической работы

- 1) Номер варианта соответствует номеру в учебном журнале и данные выбираются из приложения 2.
- 2) Домашнее задание выполняется на листах формата А4 с одной стороны листа.
- 3) Выполнить чертеж схемы и её элементов в соответствии с ГОСТом.
- 4) Каждый пункт задания должен иметь заголовок. Формулы, расчёты, диаграммы должны сопровождаться необходимыми пояснениями и выводами.
- 5) Графики (диаграммы) должны выполняться на миллиметровой бумаге с обязательной градуировкой по осям и указанием масштабов.
- 6) Если студент сделал ошибки при выполнении домашнего задания, то исправление проводится на отдельных листах с заголовком «Работа над ошибками».
- 7) Срок выполнения домашнего задания 12 неделя семестра.

3 Теоретическое введение

Активный фильтр – представляет собой четырехполюсник, содержащий активный элемент операционный усилитель (ОУ) и пассивные RC цепи, усиливающий напряжение в заданной полосе частот. Операционный усилитель – это линейный преобразователь, дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления, предназначенный для работы с «глубокой» отрицательной обратной связью (ООС) рис. 2.

Комплексное устройство, состоящее из ОУ и внешних элементов, образующих цепь обратной связи, предназначено для выполнения некоторых математических операций над аналоговыми величинами (как, например, суммирование, интегрирование, дифференцирование, умножение на постоянные коэффициенты и др.). Собственно операционный усилитель без цепи обратной связи не применяют. ОУ используют также в качестве прецизионных усилителей, активных фильтров, повторителей напряжения, компараторов, на их основе строятся избирательные и полосовые усилители, генераторы синусоидальных сигналов, генераторы сигналов различной формы сигналов, регуляторы и стабилизаторы напряжения и т.д.

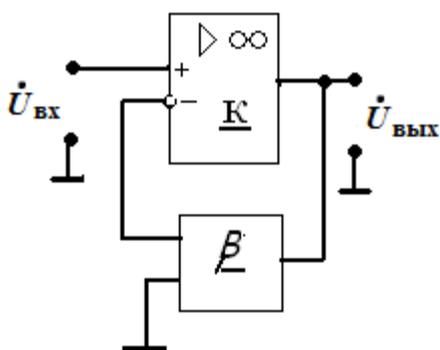


Рис. 2. Структурная схема ОУ с ООС

Параметры ОУ можно варьировать при помощи обратных связей, построив на их основе усилители с заданными значениями коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений. Отрицательная обратная связь (ООС) обеспечивает устойчивость устройств, подается она с выхода ОУ на инвертирующий вход рис. 2. Для снижения дрейфа нуля, устойчивости параметров и увеличения линейного участка передаточной характеристики ОУ, его в основном применяют с «глубокой» отрицательной обратной связью. С помощью подбора глубины обратной связи можно реализовать аналоговые устройства с параметрами в широком диапазоне.

Основными преимуществами активных фильтров перед пассивными, являются: воспроизведение частотных характеристик с заданными свойствами, независимость фильтра от нагрузки, совмещение усилительных свойств с фильтрующими в пределах полосы пропускания. ОУ дает возможность использовать резисторы и конденсаторы небольших номиналов даже на очень низких частотах.

Основной параметр любого усилителя - коэффициент усиления. Коэффициент усиления ОУ уменьшается пропорционально глубине обратной связи:

$$\underline{K}_{oc} = \frac{\underline{K}}{1 + \underline{\beta}\underline{K}} \quad (1)$$

K_{oc} – коэффициент усиления с учётом отрицательной обратной связи;

β или γ – коэффициент передачи обратной связи;

K - коэффициент усиления ОУ.

Проанализируем формулу (1):

если $|\underline{\beta}\underline{K}| \ll 1$, то $\underline{K}_{oc} = \underline{K}$

если $|\underline{\beta}\underline{K}| \gg 1$, то $\underline{K}_{oc} = \frac{1}{\underline{\beta}}$ - «глубокая» ООС (2)

При глубокой отрицательной обратной связи коэффициент усиления не зависит от коэффициента усиления операционного усилителя, а зависит только от соотношения параметров звена обратной связи $\underline{K}_{oc} = \frac{1}{\beta}$.

Важной характеристикой усилителей и фильтров, являются амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), представляющая собой зависимость коэффициента усиления от частоты $K = F(f)$.

Так как звено обратной связи, образовано включенными R и C элементами, то между входным и выходным напряжениями возникнет сдвиг фаз. Эту зависимость отражает фазо-частотная характеристика ФЧХ $\varphi = F(f)$.

Логарифмические амплитудно- и фазо-частотные характеристики (ЛАЧХ) и (ЛФЧХ), или асимптотические диаграммы, предложенные учёным Боде, являются приближенным методом ускоренного построения частотных и фазовых характеристик линейных аналоговых схем, систем автоматического регулирования. Они являются удобным средством анализа устойчивости линейных систем и служат для расчета корректирующих частей.

Амплитудно-частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе. По оси ординат откладывают коэффициент усиления, выраженное в децибелах, по оси абсцисс откладывают частоту или отношение частот сигналов, в логарифмическом масштабе.

Логарифмический масштаб удобен для графического представления частотных характеристик, это позволяет свести все операции умножения и деления числовых выражений к простым операциям сложения и вычитания, и позволяет проанализировать поведение устройства в достаточно широком диапазоне частот.

Удобство логарифмических характеристик заключается в возможности их аппроксимации отрезками прямых – асимптотами,

имеющих различные углы наклона. Углы наклона этих кривых обычно выражают в децибелах на декаду дБ/дек.

Децибел (дБ) – русское обозначение, (dB) – международное. Это специальная единица, определяемая отношением амплитуд двух сигналов, $1 \text{ дБ} = 20 \lg(A_1/A_2)$.

Отношение частот двух гармонических колебаний называется интервалом. Интервал, соответствующий изменению частоты в десять раз называют декадой.

Для построения диаграмм Бode передаточную функцию цепи в области комплексной частоты удобно представить в виде отношения двух полиномов:

$$K(j\omega) = K \cdot e^{j\varphi} = \frac{(1 + j \frac{\omega}{\omega_{01}})(1 + j \frac{\omega}{\omega_{02}}) \dots (1 + j \frac{\omega}{\omega_{0n}})}{(1 + j \frac{\omega}{\omega_{n1}})(1 + j \frac{\omega}{\omega_{n2}}) \dots (1 + j \frac{\omega}{\omega_{nq}})} \quad (3)$$

где ω_{0i} – корни полинома в числителе нули,

ω_{nj} – корни полинома в знаменателе полюса,

K – модуль коэффициента передачи,

φ – фаза коэффициента передачи.

Выражение АЧХ можно представить в виде:

$$K(\omega) = K_0 \sqrt{\frac{(1 + (\frac{\omega}{\omega_{01}})^2)(1 + (\frac{\omega}{\omega_{02}})^2) \dots (1 + (\frac{\omega}{\omega_{0n}})^2)}{(1 + (\frac{\omega}{\omega_{n1}})^2)(1 + (\frac{\omega}{\omega_{n2}})^2) \dots (1 + (\frac{\omega}{\omega_{nq}})^2)}}$$

Тогда выражение (3) для логарифмической амплитудно-частотной характеристики будет иметь вид:

$$20 \lg |K(\omega)| = 20 \lg K_0 + 10 \sum_{i=1}^n \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{0i}} \right)^2 \right] - 10 \sum_{j=1}^q \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{nj}} \right)^2 \right]$$

K_0 - коэффициент передачи на нулевой частоте в дБ.

Члены передаточной функции могут быть представлены выражениями:

$$20\lg\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{0i}}\right)^2} \text{ и } -20\lg\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{0i}}\right)^2} \quad (4)$$

$$\text{При } \omega \gg \omega_{0i} \quad 20\lg\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{0i}}\right)^2} \approx 20\lg\left(\frac{\omega}{\omega_{0i}}\right) \quad (5)$$

$$\text{При } \omega \ll \omega_{nj} \quad -20\lg\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{nj}}\right)^2} \approx -20\lg\left(\frac{\omega}{\omega_{nj}}\right) \quad (6)$$

В логарифмическом масштабе выражения (4), (5), (6) можно представить отрезками прямых линий. Таким образом, в результате аппроксимации модуль частотной характеристики состоит из константы и абсолютных углов наклона прямых к оси абсцисс: $20\lg 10 = 20$ дБ/дек. Изменение наклона происходит в точках излома характеристики: $\omega = \omega_{0i}$ и $\omega = \omega_{nj}$ при $\omega < \omega_{0i}$ и $\omega > \omega_{nj}$, участки АЧХ представляют собой прямые, лежащие на оси абсцисс (0 дБ). Результирующая характеристика представляет собой сумму отрезков по участкам, ограниченные точками излома.

Фазо-частотная характеристика передаточной функции выглядит следующим образом:

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{01}}\right) + \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{02}}\right) + \dots + \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{0i}}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{n1}}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{n2}}\right) - \dots - \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{nq}}\right) \quad (7)$$

Отдельная фазовая характеристика имеет вид:

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) \text{ - эта характеристика может быть аппроксимирована}$$

отрезками прямых линий следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi &= \begin{cases} 0 & \text{если } \omega \leq \omega_1/10 \\ 45^\circ & \text{если } \omega_1/10 \leq \omega \leq 10\omega_1 \\ 90^\circ & \text{если } \omega \geq 10\omega_1 \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

В логарифмическом масштабе диаграмма фазового сдвига может быть представлена тремя отрезками, изломы характеристики соответствуют частотам $\omega_1/10$, $10\omega_1$. Её наклон составляет 45°/дек.

3.1 Фильтр высоких частот (входная RC цепь)

Четырехполюсники, напряжение на выходе которых пропорциональны производной по времени от напряжения на входе называют дифференцирующими.

Такая цепь рис. 3, пропускает без изменения высокочастотные сигналы, на низких происходит уменьшение выходного сигнала, т.е. данная цепь является фильтром высоких частот (ФВЧ). Применяют в качестве корректирующих звеньев в электронных схемах, а также в схемах формирования импульсов.

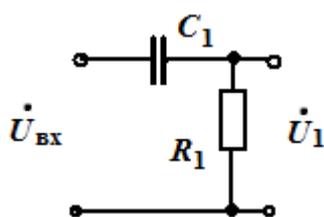


Рис. 3. Фильтр высоких частот (входная RC цепь)

Операция дифференцирования по времени в комплексной форме соответствует умножению на $j\omega$, поэтому дифференцирующим будет любой четырехполюсник, для которого выполняются условие:

$$\dot{U}_{вых} \leftrightarrow j\omega \dot{U}_{вх}.$$

Проанализируем фильтр высоких частот, являющийся фильтром высоких частот. Запишем уравнение коэффициента передачи:

$$\beta_{вх} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{вх}} = \frac{R_1}{R_1 - j \frac{1}{\omega C_1}} = \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{j\omega T_0}{1 + j\omega T_0} \quad (9)$$

где $T_0 = C_1 R_1$ – постоянная времени $R_1 C_1$ цепи;

$\omega = 2\pi f_0$ – угловая частота; $f_0 = 1/2\pi T_0$ – частота сигнала

Выражение (9) можно представить в показательной форме:

$$\underline{\beta}_{\text{вх}} = \beta_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi}, \text{ где } \beta_{\text{вх}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (1/\omega T_0)^2}}; \quad \varphi = \arctg 1/\omega T_0.$$

$\beta_{\text{вх}}$ – модуль коэффициента передачи $R_1 C_1$ цепи; φ – фазовый сдвиг выходного напряжения $R_1 C_1$ цепи (U_1) относительно входного ($U_{\text{вх}}$)

Проанализируем поведение коэффициента передачи входной цепи формула (9) на всём частотном диапазоне, рис. 4:

- 1) Пусть $j\omega T_0 = 1$ точка излома ЛАЧХ;
- 2) При $j\omega T_0 \ll 1$, тогда $\underline{\beta}_{\text{вх}} = j\omega T_0$, т.е. наклон ЛАЧХ будет +20 дБ/дек (на низких частотах коэффициент передачи возрастает с ростом частоты под углом $\alpha = \arctg 20 \text{ дБ/дек}$, т.е. модуль коэффициента передачи увеличивается в 10 раз при увеличении частоты в 10 раз, а в логарифмическом масштабе на 20 дБ за декаду);
- 3) При $j\omega T_0 \gg 1$, тогда $\underline{\beta}_{\text{вх}} = 1$; $\underline{\beta}_{\text{вх}} \text{ дБ} = 0$ прямая по оси от точки излома вправо.

Изменение наклона ЛАЧХ происходит в точке излома f_0 рис. 4. Цепь дифференцирует входной сигнал на частотах до частоты излома f_0 .

При этом максимальная ошибка ЛАЧХ будет наблюдаться на частоте излома характеристики, и составлять 3 дБ (рис. 4 пунктирная прямая).

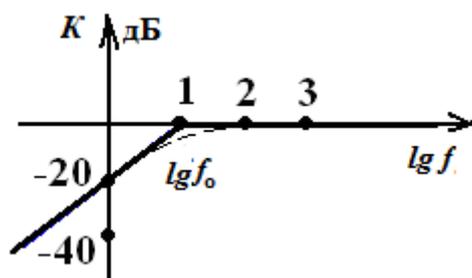


Рис. 4. ЛАЧХ ФВЧ (входной цепи)

ЛФЧХ дифференцирующего звена $\varphi = F(f)$ рис. 5 показывает фазовый сдвиг выходного напряжения относительно входного. В соответствии с выводами условий (7): на частоте излома фазовый угол входной цепи будет $+45^\circ$, на частотах, где дифференцируется входной сигнал фазовый угол $+90^\circ$, на высоких частотах фазовый угол входной цепи будет 0° .

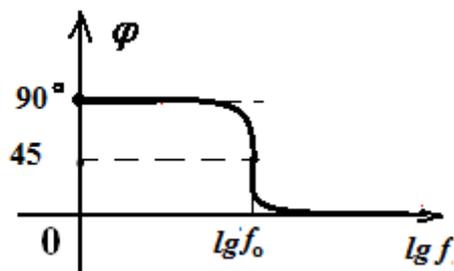


Рис. 5. ЛФЧХ ФВЧ (входной цепи)

3.2 Фильтр низких частот (выходная RC цепь)

Интегрирующими называются четырехполюсники рис. 6, напряжение на выходе которых пропорционально интегралу от напряжения на входе, т.е. при условии $u_{\text{вых}}(t) \sim \int u_2(t) dt$.

Операция интегрирования в комплексной форме соответствует умножению на множитель $1/j\omega$, поэтому интегрирующим будет любой четырёхполюсник, для которого выполняется условие: $\dot{U}_{\text{вых}} \sim (1/j\omega)\dot{U}_2$

Интегрирующие цепи рис. 6 называются запаздывающими и применяются в качестве корректирующих звеньев и формирователей в электронных схемах, их используют для получения на выходе сигналов, длительность которых больше, чем входных, а крутизна меньше, а также применяются как фильтры низких частот.

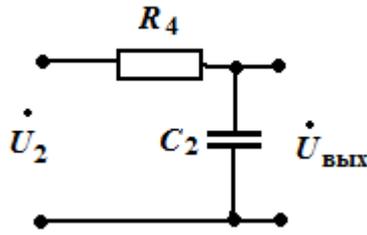


Рис. 6 Фильтр низкой частоты (выходная RC цепь)

Фильтр низкой частоты состоит из последовательно соединённых элементов R_4 и C_2 рис. 6.

Выходное напряжение снимается с конденсатора и рассчитывается по формуле:

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_c = \frac{1}{C_2} \int i_c \partial t = \frac{1}{C_2} \int \frac{u_2}{R_4} \partial t = \frac{1}{R_4 \cdot C_2} \int u_2 \partial t = \frac{1}{T_{\text{ВЫХ}}} \int u_2 \partial t \quad (10)$$

Когда $R_4 \gg X_c$, при этом ток цепи $i = \frac{u_2}{R_4}$ и цепь является

интегрирующей.

Запишем уравнение коэффициента передачи:

$$\beta_{\text{ВЫХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_2} = \frac{-j \frac{1}{\omega C_2}}{R_4 - j \frac{1}{\omega C_2}} = \frac{1}{1 + j\omega R_4 C_2} = \frac{1}{1 + j\omega T_{\text{ВЫХ}}} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{f}{f_{\text{ВЫХ}}}\right)} \quad (11)$$

где $T_{\text{ВЫХ}} = R_4 C_2$ - постоянная времени $R_4 C_2$ - цепи.

Выражение (11) можно представить в показательной форме:

$\beta_{\text{ВЫХ}} = \beta_{\text{ВЫХ}} \cdot e^{j\varphi}$, где

$$\beta_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega T_{\text{ВЫХ}}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{ВЫХ}}}\right)^2}}; \quad \varphi = -\arctg \frac{1}{\omega T_{\text{ВЫХ}}} = \arctg \frac{f}{f_{\text{ВЫХ}}}$$

$\beta_{\text{ВЫХ}}$ – модуль коэффициента передачи $R_4 C_2$ цепи; φ – фазовый сдвиг выходного напряжения $R_4 C_2$ цепи ($U_{\text{ВЫХ}}$) относительно входного (U_2).

Прологарифмируем $\beta_{\text{ВЫХ}}$, получаем выражение ЛАЧХ:

$$\beta_{\text{ВЫХ}} = -20 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{ВЫХ}}}\right)^2} \approx -20 \lg \left(\frac{f}{f_{\text{ВЫХ}}}\right) \quad (\text{дБ})$$

Проанализируем поведение коэффициента передачи входной цепи формула (11) на всём частотном диапазоне, рис. 7:

- 1) Пусть $j\omega T_{\text{ВЫХ}} = 1$ точка излома ЛАЧХ ФНЧ соответствует $\lg f_{\text{ВЫХ}}$ (дек);
- 2) при $j\omega T_{\text{ВЫХ}} \ll 1$, $\beta_{\text{ВЫХ}} = 1$ тогда $\beta_{\text{ВЫХдБ}} = 0$ прямая по оси, рис.
- 3) при $j\omega T_{\text{ВЫХ}} \gg 1$, $\beta_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{j\omega T_{\text{ВЫХ}}}$, тогда наклон ЛАЧХ будет -20 дБ/дек, т.е.

выходная R_4C_2 цепь интегрирует сигнал на частотах от частоты излома $f_{\text{ВЫХ}}$ вправо.

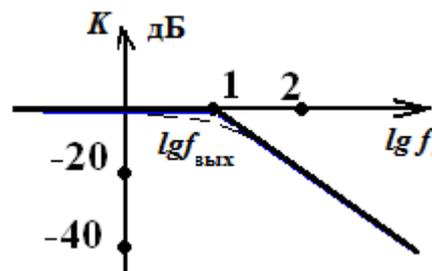


Рис. 7. ЛАЧХ ФНЧ (выходной RC цепи)

При этом максимальная ошибка ЛАЧХ будет наблюдаться на частоте излома характеристики, и составлять 3 дБ (рис. 7 пунктирная прямая).

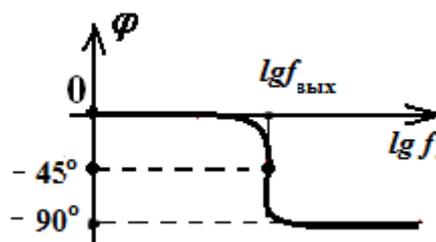


Рис. 8. ЛФЧХ ФНЧ (выходной RC цепи)

ЛФЧХ интегрирующего звена $\varphi = F(f)$ рис. 8 показывает фазовый сдвиг выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ относительно входного U_2 . В соответствии с выводами условий (7): на частоте излома фазовый угол входной цепи

будет - 45° , на частотах, где интегрируется входной сигнал фазовый угол - 90° , на низких частотах фазовый угол входной цепи будет 0° .

3.3 Операционный усилитель

Операционный усилитель основной элемент активного фильтра и многих других электронных устройств. Обозначения ОУ на схемах, показаны на рис. 9.

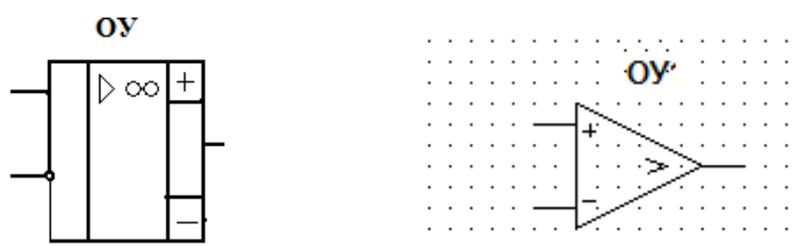


Рис. 9. Обозначения ОУ

Идеальный операционный усилитель имеет параметры:

неопределенно большой дифференциальный коэффициент усиления $K \rightarrow \infty$;

входное сопротивление $R_{вх} \rightarrow \infty$;

выходное сопротивление $R_{вых} \rightarrow 0$;

полностью симметричен;

имеет неограниченную полосу пропускания.

Реальный ОУ имеет: коэффициент усиления K от 10^3 до 10^6 , частоту единичного усиления $f_{ед}$ (частота при которой коэффициент усиления ОУ равен единице $K=1$) обычно составляет 0,5 – 10 МГц.

Зная частоту единичного усиления $f_{ед}$ и коэффициент усиления реального ОУ можно легко определить частоту среза по амплитудно-частотной характеристике или ЛАЧХ.

3.3.1 Методика построения ЛАЧХ ОУ

Для построения ЛАЧХ ОУ достаточно знать частоту единичного усиления ($f_{ед}$) и коэффициент усиления (K) реального ОУ.

Решение: перевести коэффициент усиления в дБ:

$$K_{dB} = 20 \lg K \text{ dB}$$

Перевести частоту единичного усиления в декады:

$$\lg f_{ед} = \text{дек}$$

На верхних частотах ОУ, начиная с частоты среза f_c (точка излома ЛАЧХ ОУ), коэффициент усиления снижается из-за инерционности, и скорость спада АЧХ составляет -20 дБ/дек.

Отложить на графике рис. 10 значение коэффициент усиления K и частоту единичного усиления $f_{ед}$. Провести прямую с наклоном -20 дБ/дек из точки $f_{ед}$ в верх до пересечения с прямой по уровню коэффициент усиления K и получить ЛАЧХ ОУ.

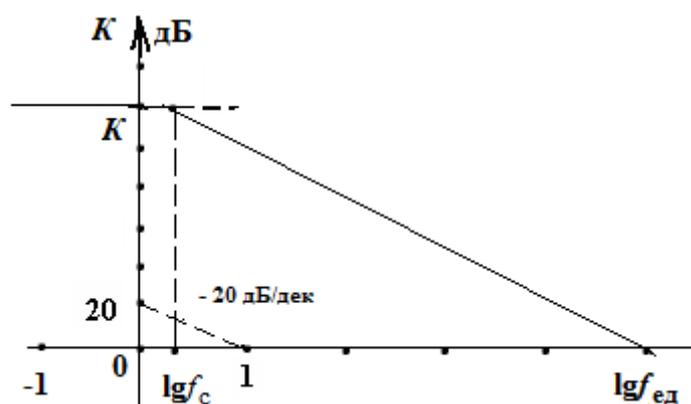


Рис. 10. ЛАЧХ ОУ

3.4 Алгоритм построения ЛАЧХ и ЛФЧХ активного фильтра (метод Боде)

Активный фильтр состоит из операционного усилителя с цепью «глубокой» отрицательной обратной связи и входной цепи. Построение

ЛАЧХ всего устройства заключается в построении ЛАЧХ каждого звена в отдельности и получение общей характеристики с помощью их сложения.

Порядок построения ЛАЧХ

1. Построение ЛАЧХ ОУ.
2. Построение ЛАЧХ звена ООС.
3. Построение ЛАЧХ входной цепи.
4. Графическое суммирование ЛАЧХ отдельных звеньев.

По общей ЛАЧХ можно составить уравнение коэффициента передачи активного фильтра.

4 Применение компьютерных программ для анализа электронных схем

Современные пакеты программ для автоматизации проектирования электронных устройств, включают все этапы их разработки – от синтеза принципиальных схем и топологии печатной схемы до анализа характеристик устройства с учётом возможного изменения параметров его элементов. Основные универсальные инженерные программы *Elektronics Work Bench*, *Multisim*, *TINA*, *MATLAB* и т.п. В частности, программа *Multisim*, включает в себя интегрированный пакет программ, включающий удобный графический ввод и построение электронной или электрической схем и *Spise* симулятор. Программа позволяет анализировать работу аналоговых и цифровых электронных схем. В пакет входят библиотеки элементов (диодов, транзисторов, ОУ, логические элементы, функциональные устройства), приборы для измерений тока напряжения, мощности, генераторы, осциллографы, измеритель частотных характеристик Боде-плоттер, логический анализатор и т.д. Инструменты – осциллограф, Боде-плоттер и т.д. находятся справа рабочего поля и в поле перетаскиваются с помощью мышки. Экраны

приборов открываются двойным щелчком мышки. Необходимо проводить настройки инструментов, как на настоящих приборах. Схему, показания приборов, инструментов, (характеристики с осциллографа, Бode-плоттера) можно распечатать, перенести в текстовый или графический редактор.

5 Методические указания по выполнению домашнего задания

5.1 Построить логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) операционного усилителя с заданными параметрами.

Параметры ОУ: $K = 10^6$ (коэффициент усиления ОУ); $f_{ед} = 10^5$ Гц (частота единичного усиления);

Решение: перевести коэффициент усиления в дБ: $K_{дБ} = 20 \lg K = 120$ дБ

Прологарифмировать частоту единичного усиления ОУ: $\lg f_{ед} = \lg 10^5 = 5$ дек

Построение ЛАЧХ ОУ согласно методике пункт 3.3.1. Полученная ЛАЧХ ОУ, показана на рис. 11.

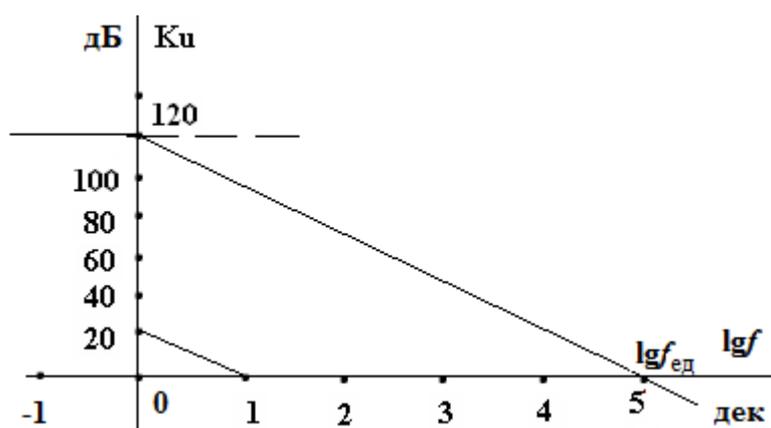


Рис. 11. ЛАЧХ ОУ

5.2 Построение ЛАЧХ входной RC цепи

Входная цепь C_1R_1 рис.12 проектируемого активного фильтра.

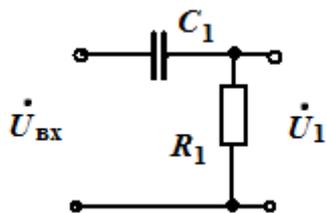


Рис. 12. Входная C_1R_1 цепь

Значение C_1 и R_1 входной цепи задаются по условию таблица 1.

Коэффициент передачи входной цепи $\beta_{\text{вх}} = \frac{U_1}{U_{\text{вх}}} = \frac{j\omega T}{1 + j\omega T}$

Частота точки излома ЛАЧХ входной цепи:

Определяется постоянная $T_0 = R_1 \cdot C_1$ следовательно $f_0 = 1/2\pi T_0$.

Построение ЛАЧХ входной цепи в соответствии с методикой пункт 3.1.

Перевести частоту в декады $\lg f_0$ (дек) (рис.13).

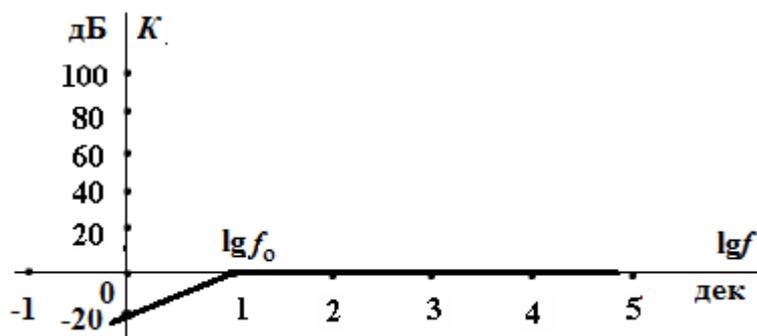


Рис. 13 ЛАЧХ входной $R_1 C_1$ цепи

5.3 Построение ЛАЧХ звена отрицательной обратной связи

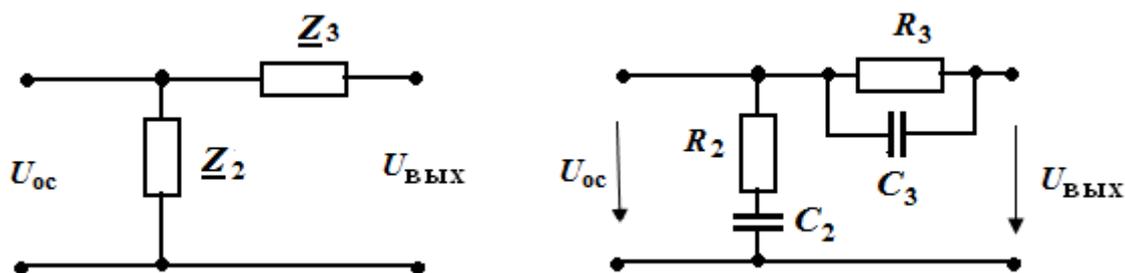


Рис.14. Звено ООС

Коэффициент передачи звена ООС рис. 14:

$$\underline{\beta} = \frac{U_{oc}}{U_{ВЫХ}} = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$$

$$Z_2 = R_2 - \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{1 + j\omega T_2}{j\omega C_2}$$

$$Z_3 = \frac{R_3 \cdot \left(-\frac{1}{j\omega C_3}\right)}{R_3 - \frac{1}{j\omega C_3}} = \frac{R_3}{1 + j\omega T_3}$$

Обязательное выполнение условия при расчётах: $C_3 \ll C_2$.

Определить постоянные времени звена ООС:

где $T_1 = C_2 \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$ $T_2 = C_3 \cdot (R_2 + R_3)$ (12)

$$T_3 = C_2 \cdot (R_2 + R_3) \quad T_4 = C_3 \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

Общая формула коэффициента передачи звена ООС имеет вид:

$$\underline{\beta} = \frac{(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2)}{(1 + j\omega T_3)(1 + j\omega T_4)} \quad (13)$$

Пусть $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$, тогда $\omega_3 < \omega_1 < \omega_2 < \omega_4$.

Анализируется уравнение (13), т.е. поведение ЛАЧХ звена ООС рис.15. Отдельно строится ЛАЧХ каждого множителя уравнения коэффициента передачи β (13):

На участке $\omega < \omega_3$ коэффициент передачи звена ООС $\beta = 1$ (прямая по оси абсцисс рис.15);

На участке $\omega_3 < \omega < \omega_1$; $\beta = \frac{1}{j\omega_3 T_3}$, наклон ЛАЧХ -20 дБ/дек;

На участке $\omega_1 < \omega < \omega_2$, $\beta = \text{const}$;

На участке $\omega_2 < \omega < \omega_4$ $j\omega T \ll 1$, тогда $\beta = j\omega T_2$, наклон ЛАЧХ будет +20 дБ/дек;

На участке $\omega > \omega_4$ $\beta = 1$, прямая по оси абсцисс.

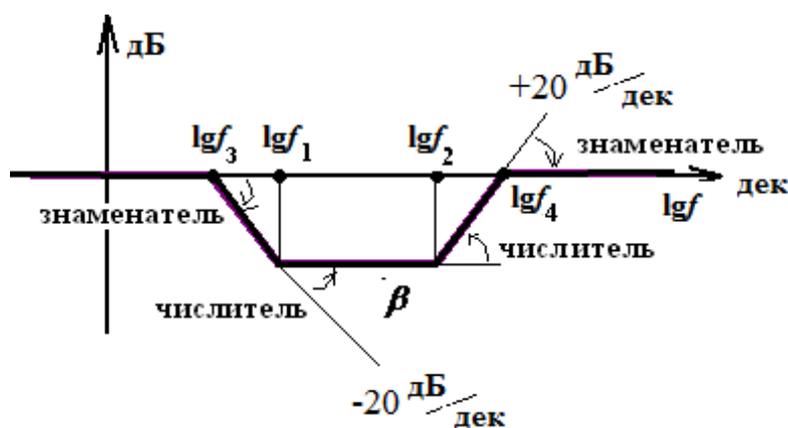


Рис. 15. ЛАЧХ ООС

Расчет точек излома ЛАЧХ:

$$f_j = \frac{1}{2\pi T_j}, \text{ где } T_j \text{ – рассчитываются по формулам (12).}$$

Прологарифмировать полученные частоты $\lg(f_j)$, т.е. перевести в декады (дек).

Полученная ЛАЧХ звена ООС показана на рис.15.

5.4 Построение «зеркальной» ЛАЧХ звена ООС

Общий коэффициент передачи рассчитывается $\underline{K}_{yc} = \frac{1}{\underline{\beta}} \cdot \underline{K}_{oy} \cdot \underline{\beta}_{вх}$

При построении общей ЛАЧХ, суммируются характеристики ОУ, звена

ООС и входной цепи: $\underline{K}_{yc} = \frac{1}{\underline{\beta}} + \underline{K}_{oy} + \underline{\beta}_{вх}$

Так как используется «глубокая» ООС, то коэффициент передачи звена

ООС определяется: $\underline{K}_{oc} = \frac{1}{\underline{\beta}}$

Строится $\frac{1}{\underline{\beta}}$ - т.е. «зеркальная» ЛАЧХ звена ООС рис. 16.

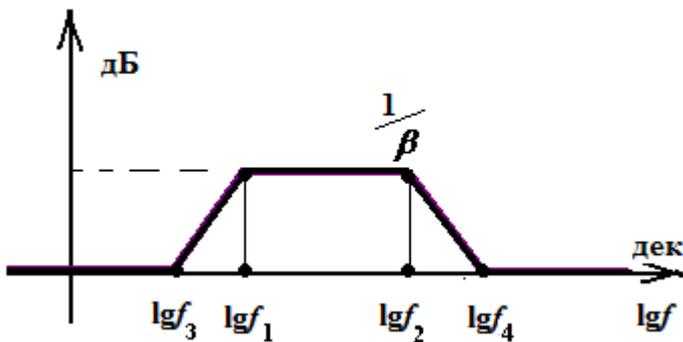


Рис.16. «Зеркальная» ЛАЧХ звена ООС

5.5 Построение ЛАЧХ усилителя с учетом ООС

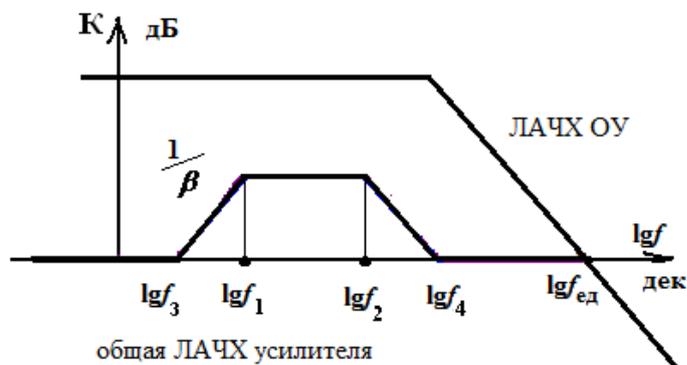


Рис.17. Сложение характеристик ОУ и «зеркальной» ЛАЧХ звена ООС

Операционный усилитель всегда ограничивает ЛАЧХ на высоких частотах $f_{ед}$ рис.17.

5.6 Построение результирующей ЛАЧХ активного фильтра

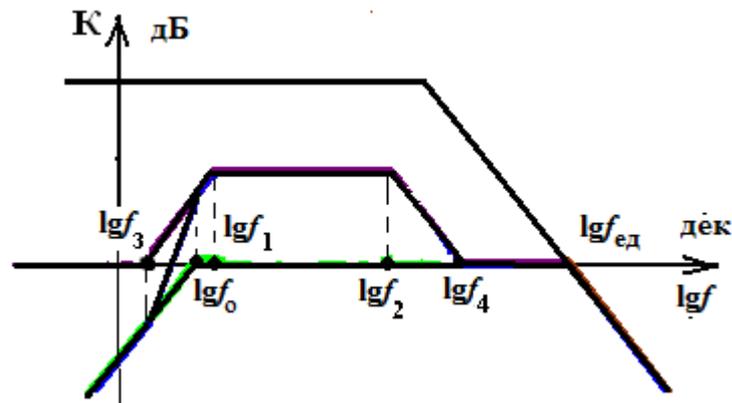


Рис.18. Общая ЛАЧХ активного фильтра

Анализ общей частотной характеристики.

Наклон ЛАЧХ рис.18 на частотах от $-\infty$ до f_3 определяется характеристикой входной цепи, на участке между частотами f_3 и f_0 будет 40 дБ/дек, т.к. звено ООС на нижних частотах дает наклон +20 дБ/дек и звено входной цепи +20 дБ/дек, т.е. $20+20 = 40$ дБ/дек. Участок $f_0 - f_1$ определяется только зеркальной характеристикой звена ООС наклон + 20 дБ/дек. На участке $f_1 - f_2$ коэффициент усиления усилителя не зависит от частоты и является полосой пропускания усилителя. Участки $f_2 - f_4$ и $f_4 - f_{ед}$ ЛАЧХ определяются зеркальной характеристикой звена ООС. Участок $f_{ед} + \infty$ характеризуется только ЛАЧХ операционного усилителя.

6 Построение ЛФЧХ активного фильтра

В соответствии с методическими указаниями теоретического введения в соответствии с условиями (8) строится ЛФЧХ усилителя рис. 19, используя ЛАЧХ усилителя:

на участках, где ЛАЧХ идет с наклоном:

± 20 дБ/дек, фаза соответствует $\pm 90^\circ$;

± 40 дБ/дек, фаза соответствует $\pm 180^\circ$;

если ЛАЧХ параллельна оси абсцисс, то фаза равна 0° ;

в точках излома ЛАЧХ фаза соответствует $\pm 45^\circ$ ($\pm 135^\circ$).

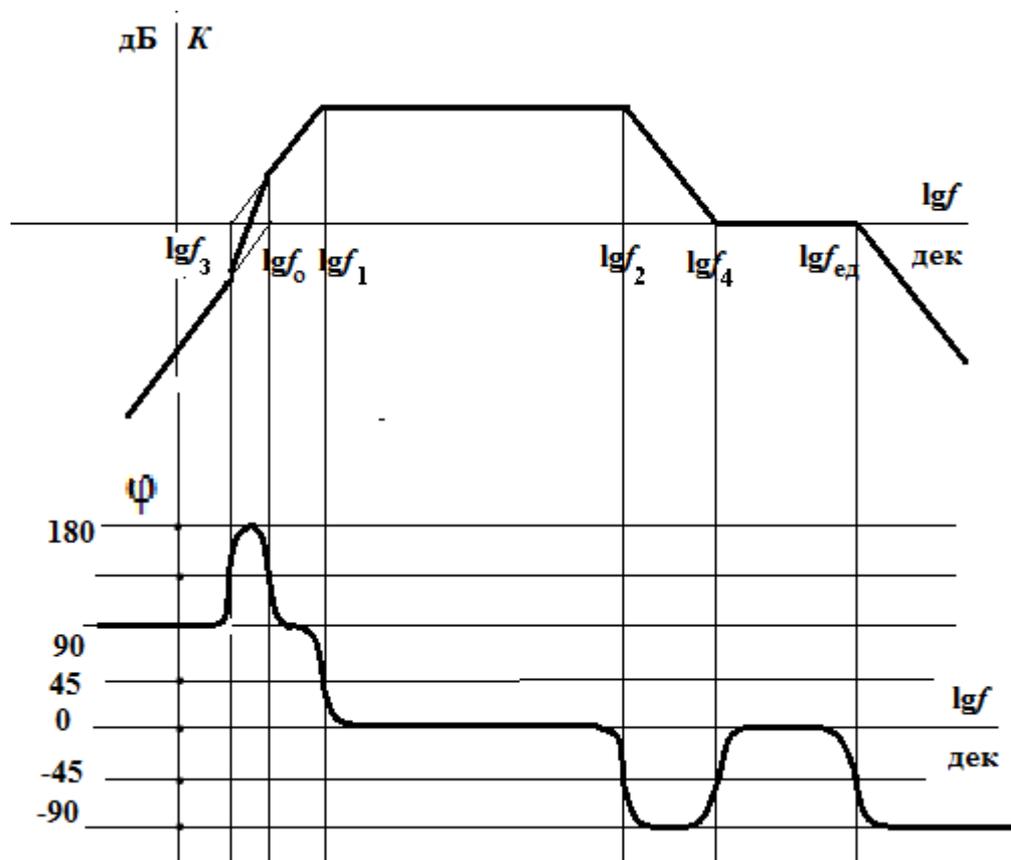


Рис. 19. Построение ЛФЧХ активного фильтра

7 Вывод формулы коэффициента передачи активного фильтра

Запись выражения коэффициента усиления усилителя в канонической форме - сопоставляется формула (14) по следующей методике: на ЛАЧХ 7 участков, следовательно, должно быть 7 сомножителей: первый сомножитель определяется коэффициентом передачи входной цепи ($j\omega T_0$) на частотах от $-\infty$ до f_3 рисунок 20. Участок $f_3 f_0$ определяется формулой $(1 + \omega T_3)$, т.к. наклон ЛАЧХ увеличился на +20 дБ/дек, участок $f_0 f_1$ наклон ЛАЧХ уменьшается на 20 дБ/дек сомножитель формулы

$1/(1 + \omega T_0)$, участок $f_1 f_2$ наклон ЛАЧХ уменьшиться на 20 дБ/дек сомножитель $1/(1 + \omega T_1)$, участок $f_2 f_4$ наклон ЛАЧХ уменьшиться на 20 дБ/дек сомножитель $1/(1 + \omega T_2)$, участок $f_4 f_{ед}$ наклон ЛАЧХ увеличится на 20 дБ/дек сомножитель формулы $(1 + \omega T_4)$, ЛАЧХ ОУ участок $f_{ед} +\infty$, формула $1/(1 + \omega T_{ед})$.

Получается формула коэффициента передачи активного фильтра в канонической форме (14):

$$\underline{K} = \underline{K}_{вх} \cdot \frac{1}{\underline{\beta}} \cdot \underline{K}_{оу} = \frac{(j\omega T_0) \cdot (1 + j\omega T_3) \cdot (1 + j\omega T_4)}{(1 + j\omega T_0) \cdot (1 + j\omega T_1) \cdot (1 + j\omega T_2) \cdot (1 + j\omega T_{ед})} \quad (14)$$

8 Сборка схемы в среде *Multisim*. Снятие ЛАЧХ и ЛФЧХ активного фильтра

Сборка схемы в среде *Multisim*. На рис. 20 один рабочее окно в среде *Multisim*. Панель инструментов, располагается справа.

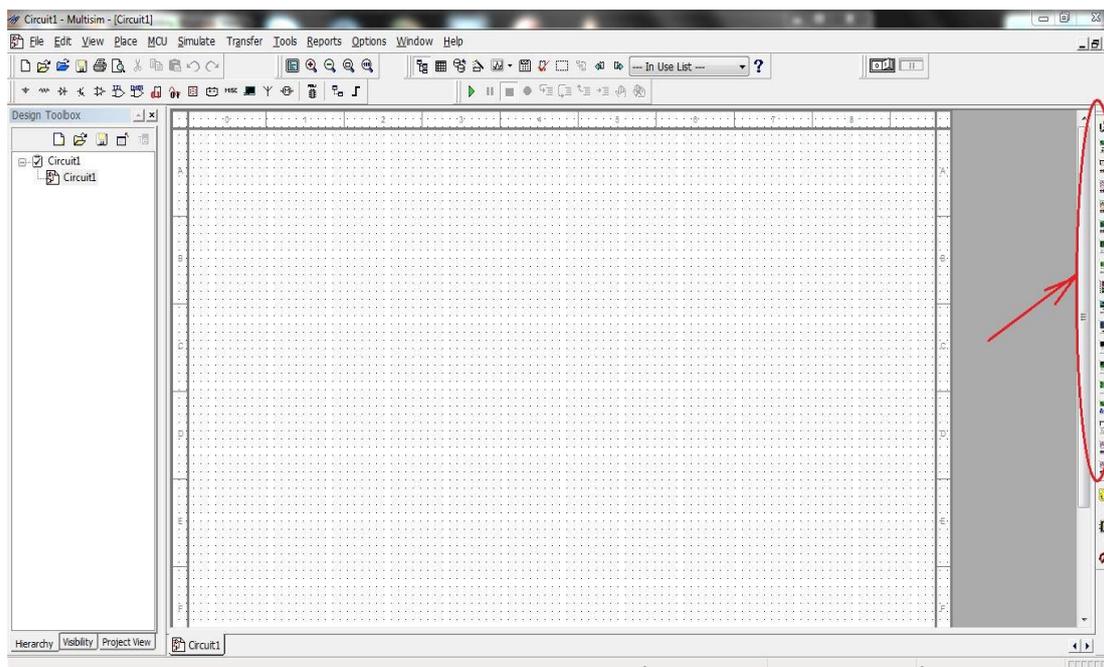


Рис.20. Рабочее окно в среде *Multisim* и панель инструментов

На рабочем поле необходимо разместить элементы схемы. Для этого на верхней панели инструментов слева нажмём кнопку «*Place Basic*» рис. 21. На ней изображён резистор. Обозначение резисторов на схеме в *Multisim* отличается от принятого ГОСТом. Появится окно «*Select a Component*», где из списка «*Family*» надо выбрать «*Resistor*» рис. 21. Под строкой «*Component*» появятся номинальные значения сопротивлений, выбрать нужное нажатием левой кнопки мыши или же непосредственным введением в графу «*Component*» необходимого значения с клавиатуры.

В поле «*Symbol*» можно увидеть, как будет выглядеть выбранный элемент на рабочем поле. После выбора номинального значения, нажать кнопку «*OK*» и, поместить элемент на поле схемы нажатием левой кнопки мыши. Далее можно продолжать размещение необходимых элементов или нажать кнопку «*Close*», чтобы закрыть окно «*Select a Component*».

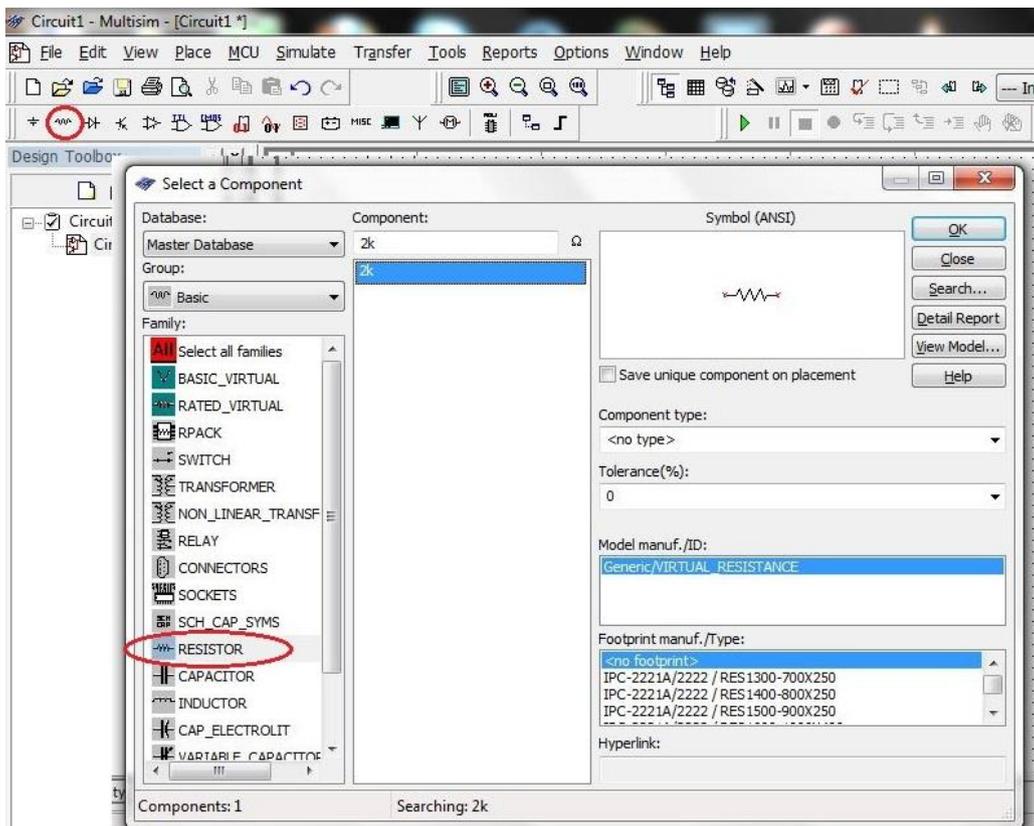


Рис.21. Выбор резистора

Аналогично расположить в поле конденсаторы. Только в списке «Family» выбирается конденсатор «Capacitor» рис. 22.

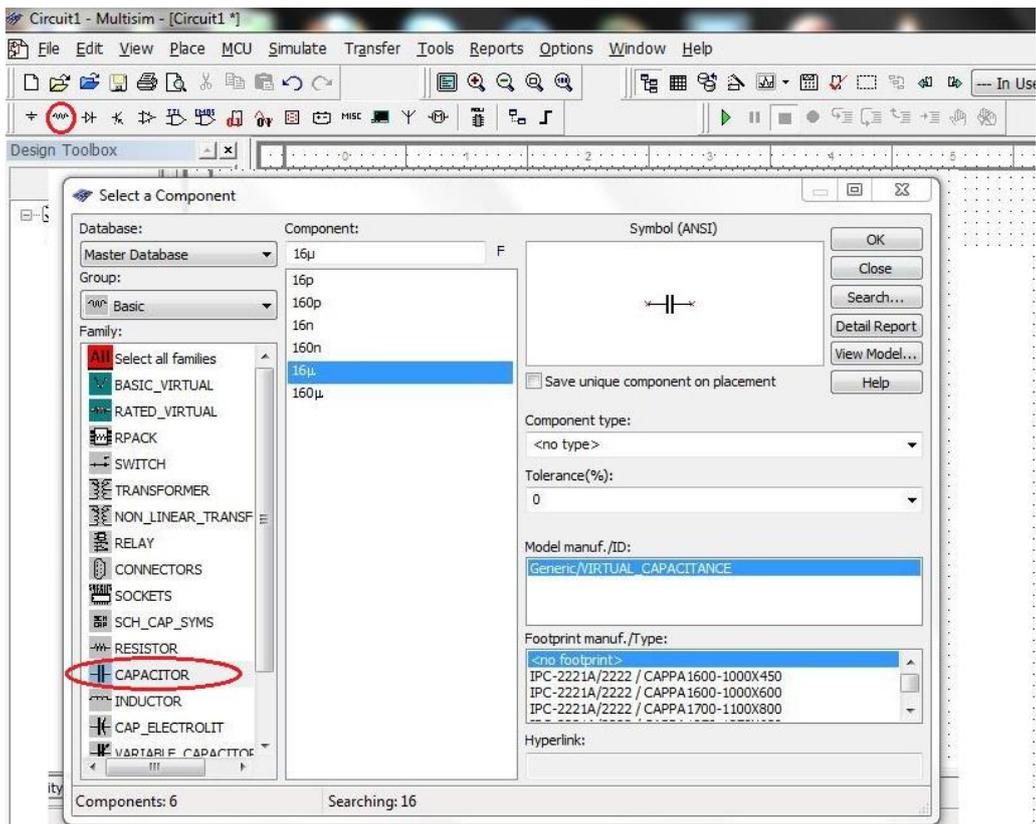


Рис.22. Выбор конденсатора

Размещённые на поле элементы необходимо соединить проводами. Для этого наводится курсор на клемму-вывод одного из элементов, нажать левую кнопку мыши. Появится провод, обозначенный пунктиром, подвести провод к клемме второго элемента и снова нажать левой кнопкой мыши и соединить элементы. Проводу так же можно придавать промежуточные изгибы, обозначая их кликом мыши и двигая по стрелке рис. 23.

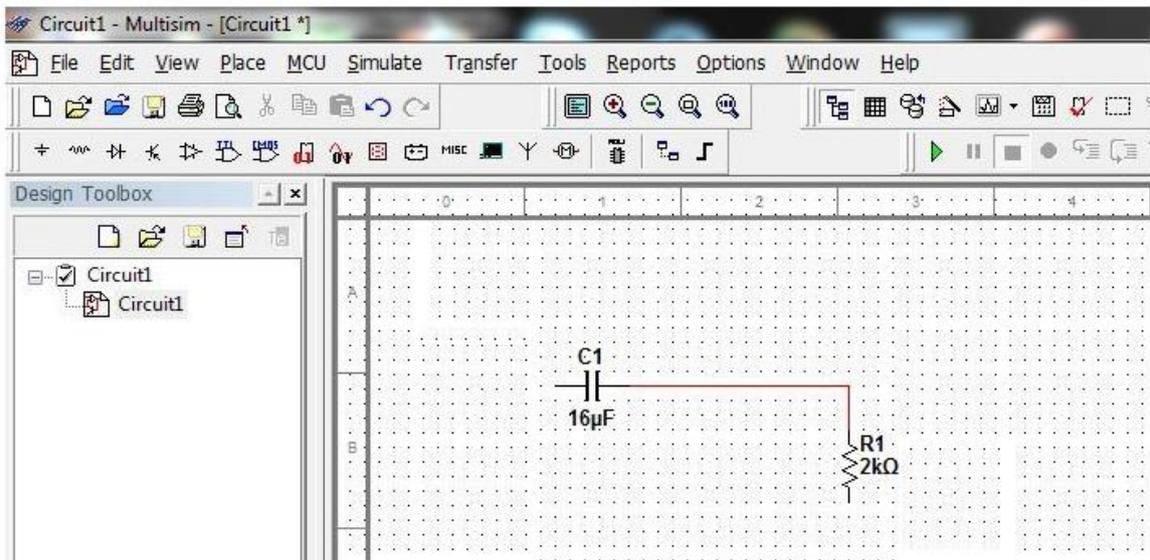


Рис.23. Соединение элементов

Поместить на рабочее поле ОУ. Для этого выбрать на верхней панели инструментов «Analog» рис. 24. В списке «Family» выбрать элемент «Analog_Virtual». В списке «Component» - элемент «OPAMP_3T_VIRTUAL» рис.25. Разместить ОУ на рабочем поле.



Рис.24. ОУ на панели *Multisim*

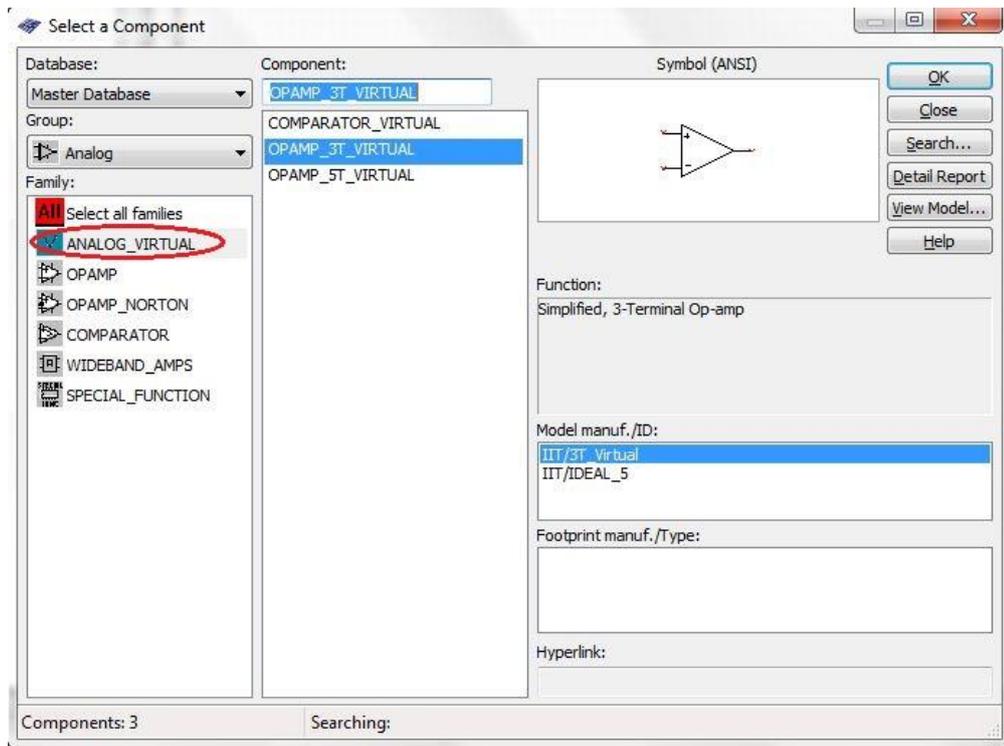


Рис.25. Выбор ОУ

Соединяются все размещённые элементы по схеме рис.1.. Схему необходимо заземлить. Для этого на панели инструментов выбирается «Place Source». В списке «Family» открывшегося окна выбирают тип элемента «Power Sources», в списке «Component» - элемент земля «GND». Итоговая схем в поле *Multisim* рис.26.

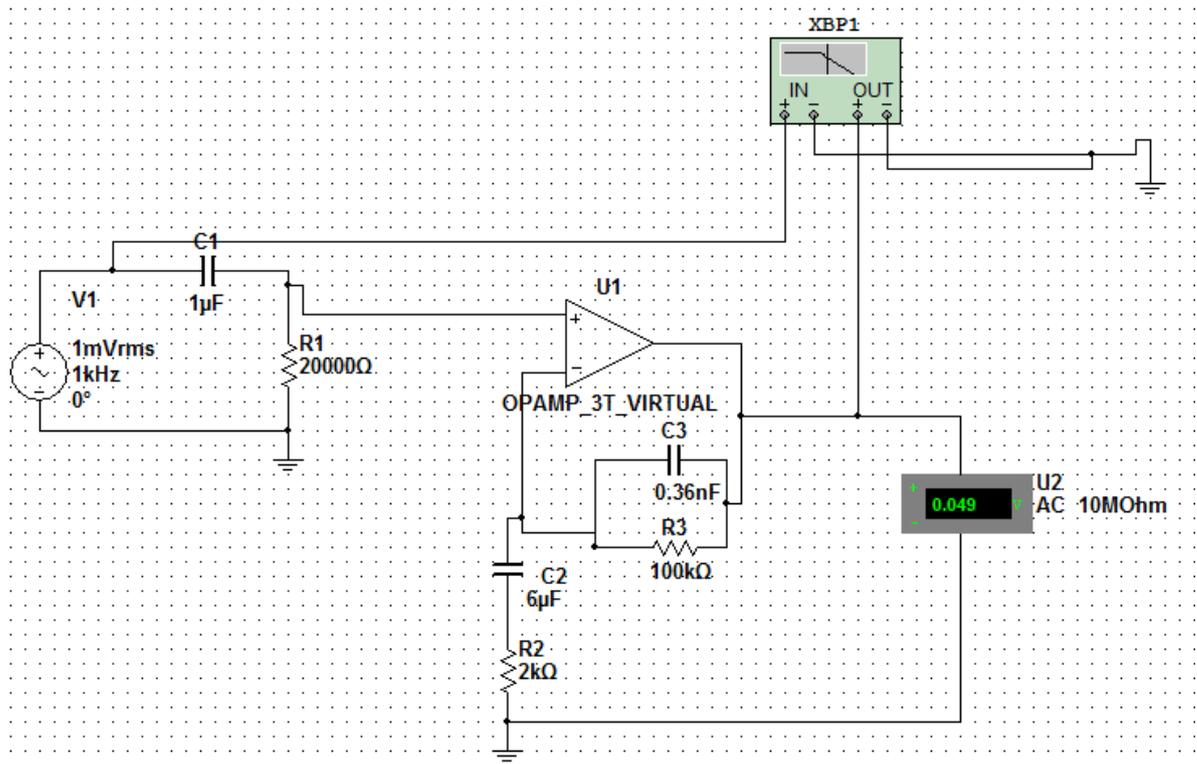


Рис.26. Схема активного фильтра в среде *Multisim*

Для подключения частотного анализатора выбирается на правой инструментальной панели «*Bode Plotter*» рис.20, и размещается на рабочем поле нажатием левой кнопки мыши. Приборы подсоединяются к схеме, как показано на рис.26.

Перед запуском схемы проводится настройка параметров генератора, ОУ и пассивных элементов.

Настройка генератора- источника питания: левой кнопкой мыши щелкнуть на генератор. Появляется окно, в котором установить частоту («*Frequency*») равной 1к Гц (1 kHz), амплитуду («*Amplitude*») – 1 мВ.

Для настройки параметров ОУ выполняются аналогичные операции. Открывается окно, изображённое на рис.27. Устанавливаются необходимые значения параметров ОУ. *Unity-Gain Bandwidth (FU)* – частота единичного усиления $f_{ед}$, *Open Loop Gain* – коэффициент усиления ОУ.

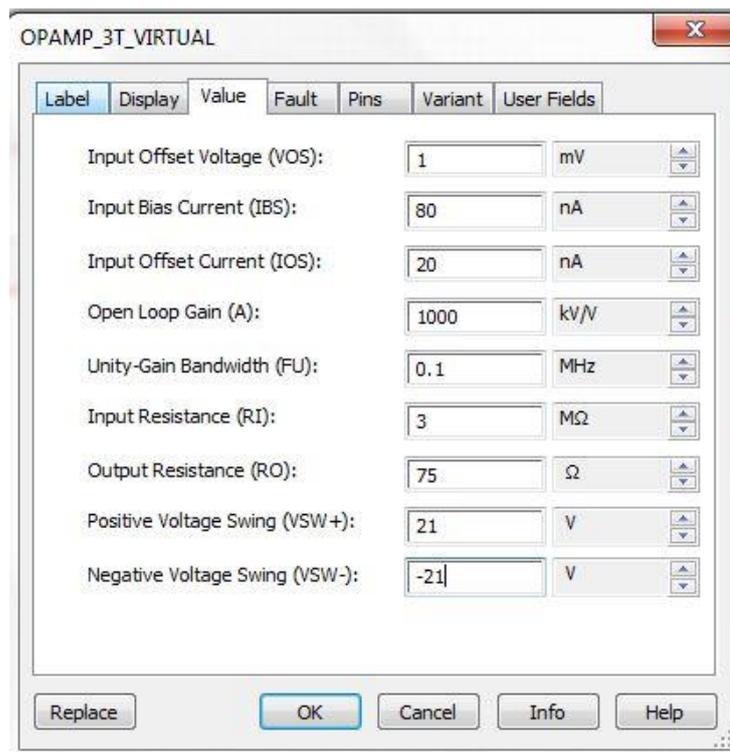


Рис.27. Настройка ОУ

Запустить схему нажатием «*Simulation switch*» рис.28. Снять ЛАЧХ и ЛФЧХ усилителя с помощью Боде-плоттера. После нажатия на него два раза левой кнопкой мыши, появится экран Боде-плоттера, представленное на рис.29. Для снятия ЛАЧХ выбрать в опции «*Mode*» режим «*Magnitude*». Настроить шкалу для наиболее удобного просмотра графика. Вводить параметры горизонтальной и вертикальной шкал, как указано на рис. 29, (**внимание!** шкала должна быть логарифмическая).



Рис.28. «*Simulation switch*» включение схемы

На экране Боде-плоттера в левом верхнем углу есть стрелка-указатель, которую можно перемещать вдоль горизонтальной оси с

помощью мыши, и отмечать необходимые значения частоты f и коэффициента усиления K рис.29 ($f = 282,195$ Гц, а $K = 34,16$ dB).

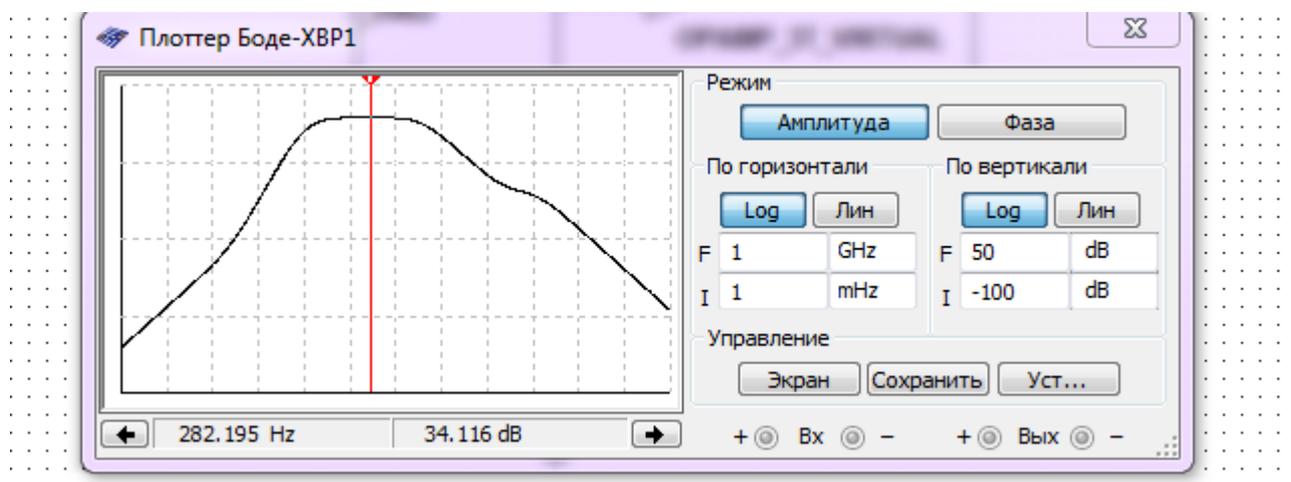


Рис.29. ЛАЧХ активного фильтра на экране Боде-плоттера

Для снятия ЛФЧХ переключают режим на «*Phase*». Изменяется настройки шкалы фаз, как показано на рис.30.

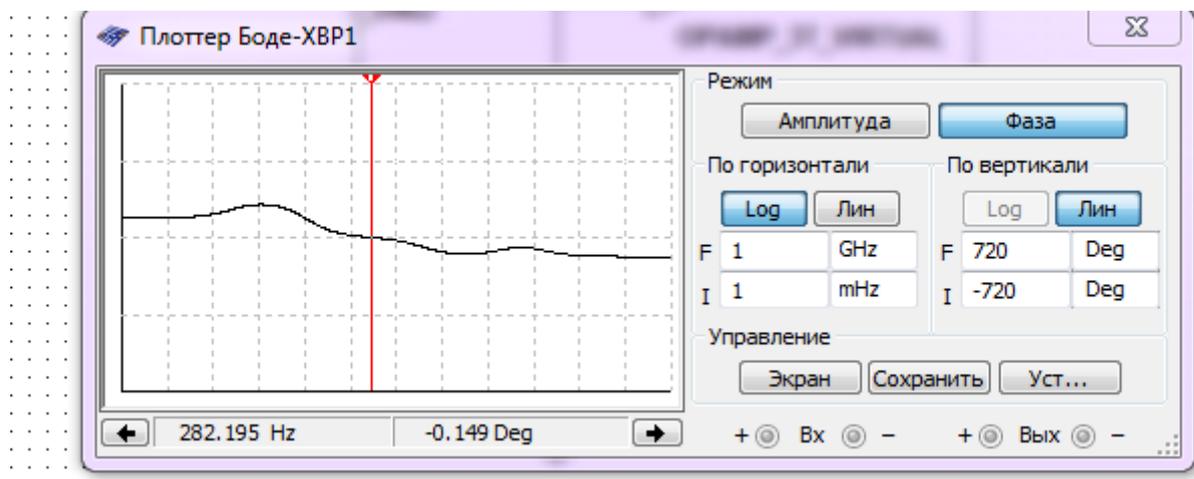


Рис.30. ЛФЧХ активного фильтра на экране Боде-плоттера

9 Определить величину комплексного коэффициента усиления на частотах $f = 10, 100, 1000, 10000$ Гц

Определить значение коэффициента усиления и фазы из графика рис.18 или, используя Бode-плоттер. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

| | $f=10$ Гц | $f=100$ Гц | $f=1000$ Гц | $f=10000$ Гц |
|----------------|-----------|------------|-------------|--------------|
| К дБ | | | | |
| φ град | | | | |

10 Определение коэффициента усиления с помощью осциллографа

Подключить осциллограф к активному фильтру на вход и выход рис.31.

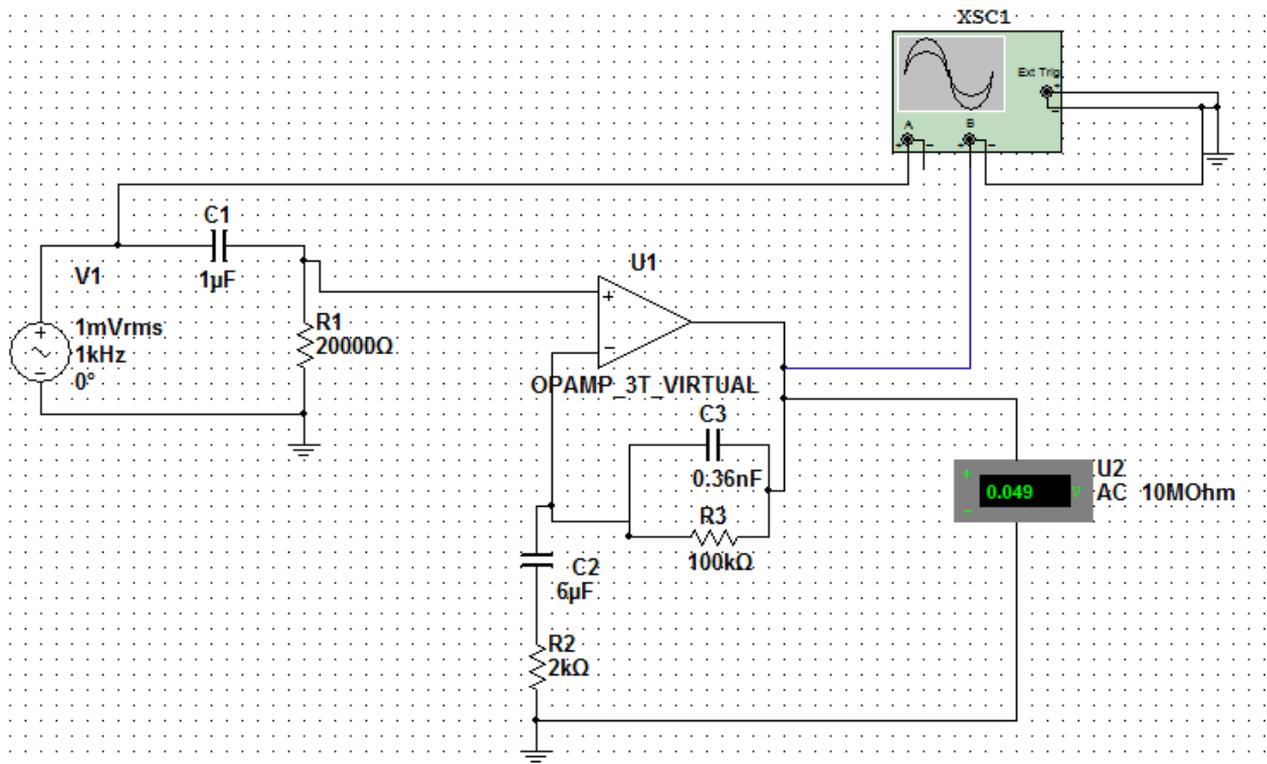


Рис.31. Подключение к схеме осциллографа и вольтметра

Показание вольтметра – это действующее значение выходного напряжения.

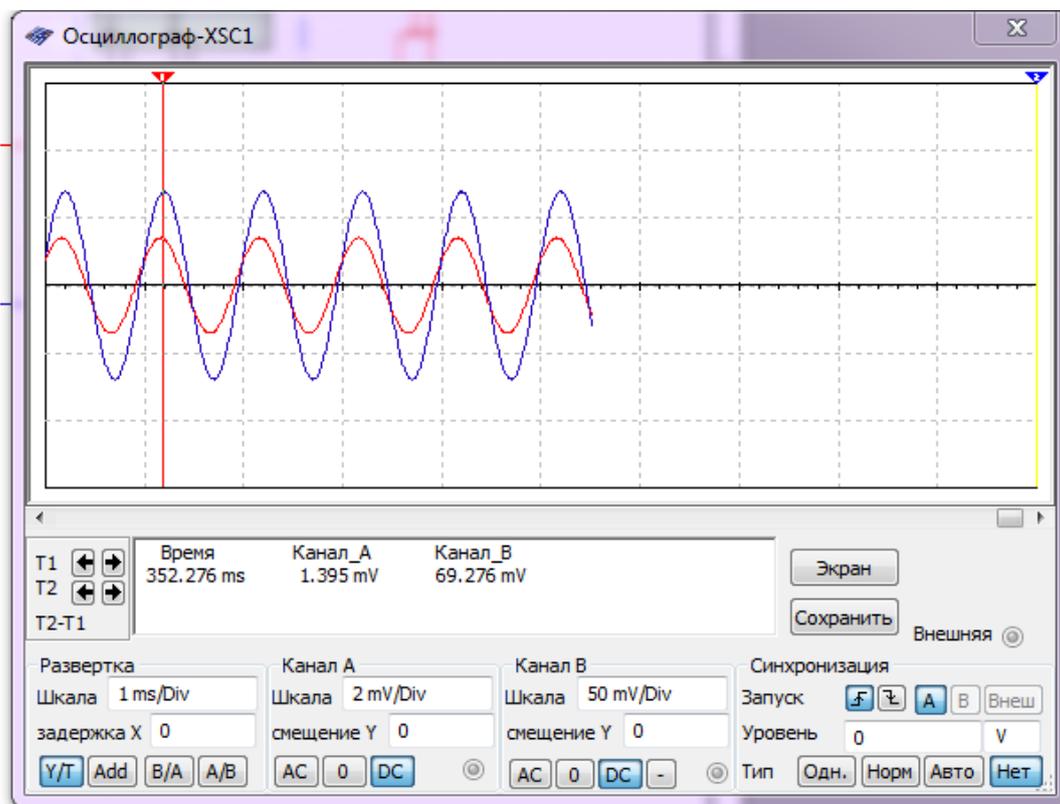


Рис.32. Осциллограммы входного и выходного напряжений

Коэффициент усиления определяется с помощью осциллографа. Входное напряжение на осциллографе это показания с канала *A*, которое определяется с помощью указателя рис.32. Выходное напряжение показание с канала *B* определяется аналогично. Данные напряжения имеют амплитудные значения. Коэффициент усиления – отношение выходного напряжения к входному напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{69.276}{1.395} = 49,66$$

Приложение 1

Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель?
2. Для чего включают обратные связи в ОУ?
3. Основные статические параметры ОУ?
4. Каким параметром определяется полоса пропускания ОУ?
5. Основные характеристики ОУ?
6. Как влияет ООС на полосу пропускания ОУ?
7. На какой из входов ОУ подается отрицательная обратная связь?
8. Какая отрицательная обратная связь используется в схемах с ОУ?
9. Основные характеристики активных фильтров?
10. Как определить коэффициент усиления активного фильтра?
11. Что такое активный фильтр?
12. Как задать полосу пропускания активного фильтра?
13. Что такое фильтр низких частот? Схема. Основные свойства.
14. Что такое фильтр высоких частот? Схема. Основные свойства.
15. Что такое ЛАЧХ и ЛФЧХ?
16. Как можно задать коэффициент усиления активного фильтра?
17. Как можно задать полосу пропускания активного фильтра?

Приложение 2

| № вар | K_{oy} | $f_{ед}$ | R_1 | R_2 | R_3 | C_1 | C_2 | C_3 |
|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | МГЦ | кОм | кОм | кОм | МКФ | МКФ | пФ |
| 1 | 195000 | 1 | 26 | 2 | 124 | 5 | 47 | 643 |
| 2 | 156000 | 2 | 22 | 2 | 168 | 7 | 23 | 263 |
| 3 | 113000 | 1 | 26 | 2 | 160 | 3 | 38 | 454 |
| 4 | 258000 | 2 | 40 | 1 | 208 | 5 | 50 | 703 |
| 5 | 108000 | 1 | 37 | 1,3 | 186 | 5 | 60 | 415 |
| 6 | 255000 | 2 | 18 | 1,4 | 163 | 5 | 26 | 710 |
| 7 | 180000 | 1 | 26 | 1,1 | 207 | 5 | 34 | 500 |
| 8 | 212000 | 2 | 28 | 2 | 160 | 4 | 54 | 726 |
| 9 | 296000 | 1 | 38 | 1,2 | 119 | 4 | 66 | 679 |
| 10 | 259000 | 1 | 37 | 2 | 177 | 5 | 38 | 661 |
| 11 | 230000 | 2 | 44 | 1,3 | 195 | 3 | 58 | 489 |
| 12 | 272000 | 2 | 43 | 2 | 132 | 7 | 57 | 443 |
| 13 | 136000 | 1 | 29 | 1,5 | 118 | 5 | 57 | 372 |
| 14 | 111000 | 1 | 24 | 1 | 224 | 7 | 31 | 550 |
| 15 | 164000 | 1 | 27 | 2 | 154 | 6 | 65 | 670 |
| 16 | 136000 | 0,8 | 19 | 2 | 128 | 3 | 30 | 580 |
| 17 | 225000 | 0,7 | 19 | 1 | 143 | 6 | 42 | 577 |
| 18 | 190000 | 1 | 43 | 2 | 216 | 5 | 67 | 623 |
| 19 | 243000 | 0,9 | 34 | 1,8 | 104 | 6 | 72 | 297 |
| 20 | 111000 | 1,5 | 29 | 2 | 130 | 7 | 35 | 298 |
| 21 | 123000 | 1 | 23 | 1 | 87 | 4 | 58 | 705 |
| 22 | 205000 | 1,2 | 45 | 2 | 82 | 7 | 61 | 639 |
| 23 | 275000 | 2 | 35 | 1,8 | 148 | 6 | 70 | 325 |
| 24 | 207000 | 2 | 29 | 1 | 202 | 7 | 42 | 307 |
| 25 | 194900 | 2 | 24 | 1 | 115 | 4 | 62 | 361 |

Список литературы

1. *Прянишников В.А.* Электроника, полный курс лекций, 5-е издание. СПб.: КОРОНА принт, М.: Бином- пресс, 2006.
2. *Князькова Т.О.* Конспект лекций сайт <http://hoster.bmstu.ru/-moodle>, 2012г.
3. *Фолкенбери Л.* Применение операционных усилителей и линейных интегральных микросхем, пер. с англ. М.: изд-во Мир, 1985.
4. *Картер Брюс, Манчини Рон.* Операционные усилители для всех *ID 6283385 Op Amps for Everyone*: изд-во Додэка XXI, ISBN 978-5-94120-242-3, 2011.
5. *Марченко А.Л., Освальд С.В.* Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде *Multisim*. Учебное пособие для вузов. М.: изд-во ДМК Пресс, 2010.
6. *Р.Кофлин, Ф.Дрископ* Операционные усилители и линейные интегральные схемы: пер. с англ. М.: изд-во Мир, 1979.
7. *Агаханян Т.М.* Интегральные микросхемы М.: изд-во Энергоатомиздат, 1983.

Оглавление

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Задание..... | 3 |
| 2 | Указания по оформлению расчетно-графической работы..... | 4 |
| 3 | Теоретическое введение..... | 5 |
| 3.1 | Фильтр высоких частот (входная RC цепь)..... | 10 |
| 3.2 | Фильтр низких частот (выходная RC цепь)..... | 12 |
| 3.3 | Операционный усилитель..... | 15 |
| 3.3.1 | Методика построения ЛАЧХ ОУ..... | 16 |
| 3.4 | Алгоритм построения ЛАЧХ и ЛФЧХ активного фильтра (метод Боде)..... | 16 |
| 4 | Применение компьютерных программ для анализа электронных схем..... | 17 |
| 5 | Методические указания по выполнению домашнего задания..... | 18 |
| 5.1 | Построение ЛАЧХ операционного усилителя с заданными параметрами..... | 18 |
| 5.2 | Построение ЛАЧХ входной RC цепи..... | 19 |
| 5.3 | Построение ЛАЧХ звена отрицательной обратной связи..... | 20 |
| 5.4 | Построение «зеркальной» ЛАЧХ звена ООС..... | 22 |
| 5.5 | Построение ЛАЧХ усилителя с учетом ООС..... | 22 |
| 5.6 | Построение результирующей ЛАЧХ активного фильтра..... | 23 |
| 6 | Построение ЛФЧХ активного фильтра..... | 24 |
| 7 | Вывод формулы коэффициента передачи активного фильтра..... | 25 |
| 8 | Сборка схемы в среде <i>Multisim</i> . Снятие ЛАЧХ и ЛФЧХ активного фильтра..... | 25 |
| 9 | Определение величин коэффициента усиления на частотах $f = 10, 100, 1000, 10000$ Гц..... | 34 |
| 10 | Определение коэффициента усиления с помощью осциллографа..... | 34 |
| | Приложение 1..... | 36 |
| | Приложение 2..... | 37 |
| | Список литературы..... | 38 |