

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"**

Факультет: Московский институт электроники и математики
Департамент компьютерной инженерии

**Методические указания по выполнению лабораторной работы по
дисциплине «Схемотехника»**

по теме

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

Составители

к.т.н., доц. Е.М. Иванова
ст. преп. Сафонов С.Н.

Москва 2017

Цель работы

Данная лабораторная работа направлена на

Целью работы является изучение режима работы схемы операционного усилителя путём моделирования режимов с помощью программного пакета MicroCap и закрепления теоретического материала по разделу «Аналоговая схемотехника».

Краткое содержание

В настоящем пособии приводятся описание частотных свойств аналоговых устройств, их параметров, единиц их измерения на примере операционного усилителя. Показано как измерить эти параметры с помощью встроенных средств программы MicroCap. Студент должен иметь представление о логарифмическом масштабе измерения, уметь объяснить полученные результаты моделирования: коэффициента усиления, АЧХ, ФЧХ, для своего варианта задания и ответить на вопросы преподавателя по теме работы.

ОБЩЕЕ ТРЕБОВАНИЕ К ПОСЕТИТЕЛЯМ ЛАБОРАТОРИИ

В процессе выполнения работ создаются документы формата xxx.sig, которые по умолчанию сохраняются в директории пакета mc9. Чтобы не заполнять системные папки неудачными черновиками, **УБЕДИТЕЛЬНАЯ ПРОСЬБА** к студентам, сохранять ваши файлы на своих флеш-картах памяти или на рабочем столе, а после окончания ЛР удалять с лабораторного компьютера.

ЗАДАНИЕ

- Собрать схему инвертирующего усилителя (см. рис. 7) с коэффициентом усиления $K = -1$ (0 дБ). Параметры элементов: $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 10$ кОм.
- Исследовать форму выходных сигналов при гармоническом, треугольном и прямоугольном входных сигналах на фиксированной частоте 1 кГц.
- Измерить максимальную скорость нарастания выходного прямоугольного сигнала.
- Построить АЧХ и ФЧХ инвертирующего усилителя в диапазоне частот от 10 кГц до 40 МГц в логарифмическом масштабе по осям координат (сигнал только гармонический, при отсутствии ограничений на выходе усилителя).
- Измерить полосу пропускания усилителя.
- Оценить суммарный сдвиг фаз в заданном диапазоне частот и определить порядок эквивалентного интегрирующего звена для исследуемого операционного усилителя.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Операционный усилитель – это основное аналоговое устройство, применяемое для выполнения математических операций над аналоговыми сигналами:

- суммирование/вычитание,
- умножение/деление,
- интегрирование/дифференцирование,
- логарифмирование/потенцирование.

Частотные параметры аналоговых устройств

Исчерпывающим описанием частотных свойств аналоговых устройств является амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ), которая для практических расчетов обычно заменяется двумя характеристиками: амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ).

Все виды частотных характеристик строятся и анализируются в линейном режиме работы аналоговых устройств (без перегрузок и ограничений амплитуды). Поэтому при измерении частотных характеристик на вход устройства подается гармонический сигнал малой амплитуды.

Основные параметры аналоговых устройств:

1. коэффициент усиления в заданной полосе частот
2. полоса пропускания при заданной неравномерности усиления
3. добротность
4. максимальная скорость нарастания выходного сигнала
5. длительность переходных процессов

Коэффициент усиления

Коэффициент усиления (действительная величина) представляет собой модуль отношения установившихся значений входного и выходного сигналов устройства. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

- по напряжению
- по току
- по мощности.

Коэффициент усиления может быть выражен безразмерной величиной, представляющей отношение выходной величины к входной. Но в электронике и автоматике широко используются логарифмические единицы для выражения коэффициента усиления. Логарифмические единицы позволяют представить характеристики аналоговых устройств в широком диапазоне частоты и коэффициента усиления. Логарифмическая единица коэффициента K_p усиления по мощности – децибелы:

$$1[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения, для коэффициентов усиления по току и напряжению используются логарифмические величины:

$$K_I = 1[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_2 = I_{\text{ВЫХ}}^2 R_{\text{ВЫХ}}}{P_1 = I_{\text{ВХ}}^2 R_{\text{ВХ}}}, \quad K_U = 1[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_2 = U_{\text{ВЫХ}}^2 R_{\text{ВХ}}}{P_1 = U_{\text{ВХ}}^2 R_{\text{ВЫХ}}}.$$

В частном (весьма распространенном) случае, если оба напряжения $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ измеряются на одном и том же сопротивлении ($R_{\text{вых}} = R_{\text{вх}}$), можно пользоваться кратким выражением:

$$K_I = 1[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}^2}{I_{\text{ВХ}}^2} = 20 \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}},$$

$$K_U = 1[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{U_{\text{ВХ}}^2} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Полоса пропускания

Полоса пропускания операционной схемы (в том числе и операционного усилителя) – это диапазон рабочих частот $\omega_{\text{В}} \div \omega_{\text{Н}}$ или $\Delta\omega$ (круговая частота), в котором коэффициент усиления не снижается менее значения $\Delta K_U = \frac{K_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot K_{\text{max}}$, т.е. примерно на 30% (см. рис.1), что соответствует величине, выраженной в дБ:

$$\Delta K_U = 20 \cdot \lg 0,707 [\text{дБ}] = 3 \text{дБ}.$$

Полоса пропускания $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = \omega_{\text{В}} - \omega_{\text{Н}},$$

где ω_0 – частота, при которой $K_U = K_{\text{max}}$

$\omega_{\text{В}}$ – верхняя граница частоты, при которой $K_U = K_{\text{max}} - 3[\text{дБ}]$,

$\omega_{\text{Н}}$ – нижняя граница частоты, при которой $K_U = K_{\text{max}} - 3[\text{дБ}]$.

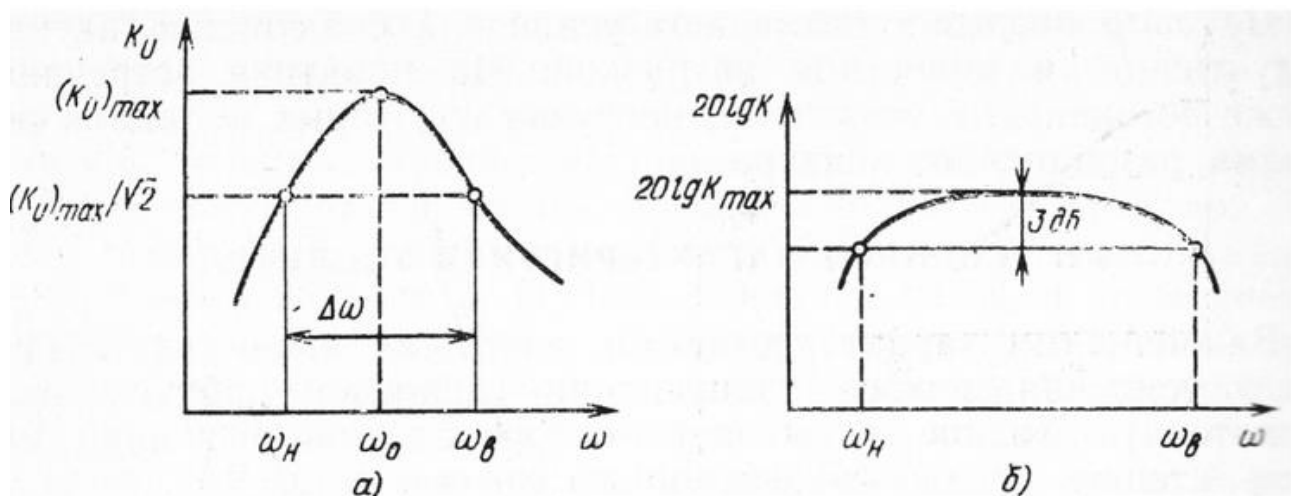


Рис.1. Полоса пропускания полосового фильтра по напряжению: а) в линейном масштабе по оси K_U , б) в логарифмическом масштабе по оси K_U .

Для операционного усилителя частотная характеристика выглядит по-другому (см. рис.2), а значит, полоса пропускания может быть шире:

$$\Delta\omega = \omega_B - \omega_0.$$

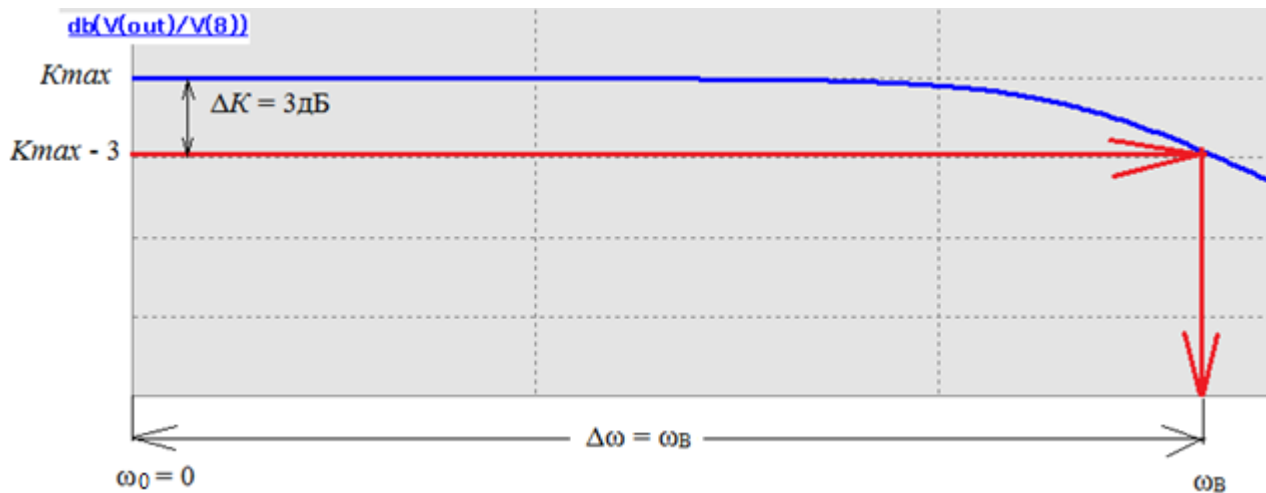


Рис.2. Полоса пропускания усилителя, исследуемого в лабораторной работе

Амплитудно-частотная характеристика

Амплитудно-частотная характеристика $dB(K_U) = 20 \lg \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$ усилителя показана на графике (см. рис.3).

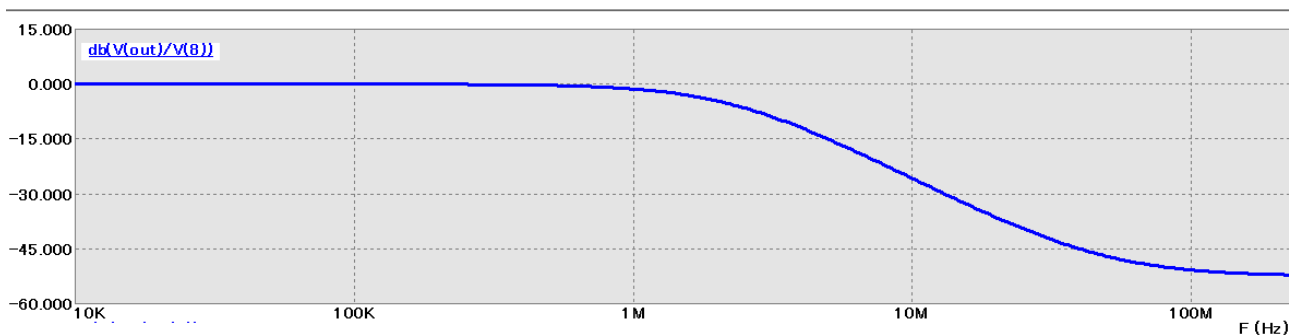


Рис.3. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

По оси ОХ отложено значение циклической частоты f входного сигнала в логарифмическом масштабе $\left[f = \frac{\omega}{2\pi} \right]$. По оси ОУ отложено значение коэффициента усиления по напряжению [дБ]. На характеристике можно видеть, как усилитель передает выходной сигнал при различных частотах входного сигнала. Коэффициент усиления уменьшается потому, что на высоких частотах внутренняя ёмкость ОУ имеет малое ёмкостное сопротивление и шунтирует выход.

Можно оценить следующие величины:

- **Частота среза** ω_{CP} (круговая) или f_{CP} (циклическая) – это значение частоты, при котором коэффициент усиления уменьшается на 3дБ.

- **Крутизна спада АЧХ** – это отношение уменьшение коэффициента усиления к частоте, выраженное в логарифмическом масштабе $\left[\frac{\text{дБ}}{\text{декада}^1}\right]$, примерно равное отрицательной величине $-20\left[\frac{\text{дБ}}{\text{декада}}\right]$ (рис.4.).

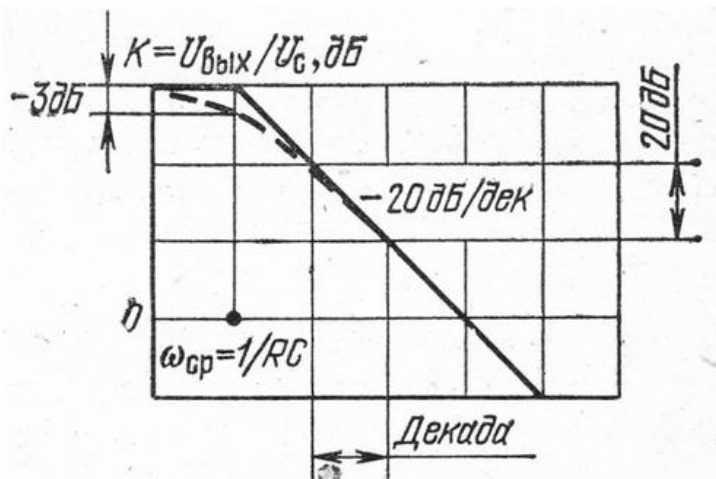


Рис.4. АЧХ: Частота среза, крутизна спада

Амплитудно-частотная характеристика операционной схемы может в простейшем случае моделироваться интегрирующим звеном (эквивалентной RC-цепочкой). Операционный усилитель состоит из нескольких каскадов (интегрирующих звеньев первого, порядка). Таким образом, АЧХ операционного усилителя может включать несколько частот среза, каждый из которых увеличивает крутизну спада АЧХ на 20 дБ/дек. Кроме того, для крутизны спада возможно отклонение от величины -20 дБ/дек из-за наличия обратной связи в схеме.

Фазо-частотная характеристика

Фазо-частотная характеристика $\varphi = \arctg\left(\frac{-f}{f_{ср}}\right)$ показана на графике (рис.5) отражает зависимость сдвига фаз между входным и выходным сигналами от частоты сигнала.

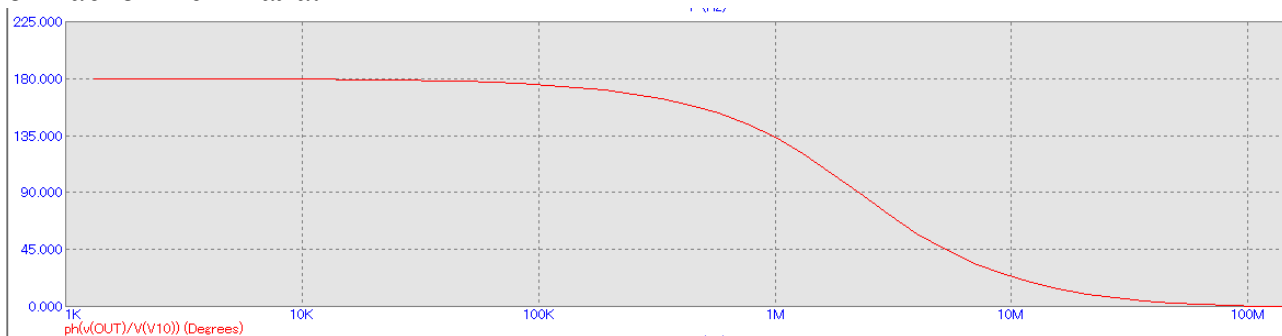


Рис.5. Фазо-частотная характеристика усилителя

¹ Декада – отличие значения частоты в 10 раз

По оси ОХ отложено значение частоты сигнала f в логарифмическом масштабе. По оси ОУ отложено значение фазового сдвига φ [град] выходного сигнала относительно входного, выраженное в градусах (рис 6).

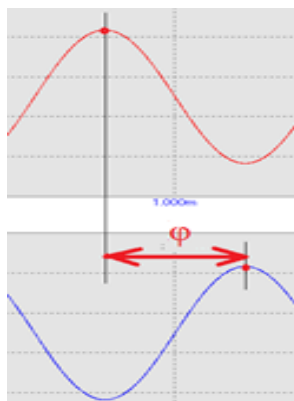


Рис.6. Диаграммы входного (вверху)и выходного(внизу)сигналов усилителя.

Из фазо-частотной характеристики усилителя видно, что максимальный набег фазы выходного сигнала относительно входного составляет -180° . Это означает, что частотные свойства операционного усилителя следует моделировать двумя интегрирующими цепочками (возможно, с различными частотами среза), включенными последовательно.

По АФХ(рис.5) можно оценить первую частоту среза ФЧХ.

- **Частота среза** f_{CP} – это значение частоты, при котором набег фазы (отрицательная величина) составляет -45° .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустить программу MicroCap (файл mc9.exe).
2. Создать схему (рис.7).

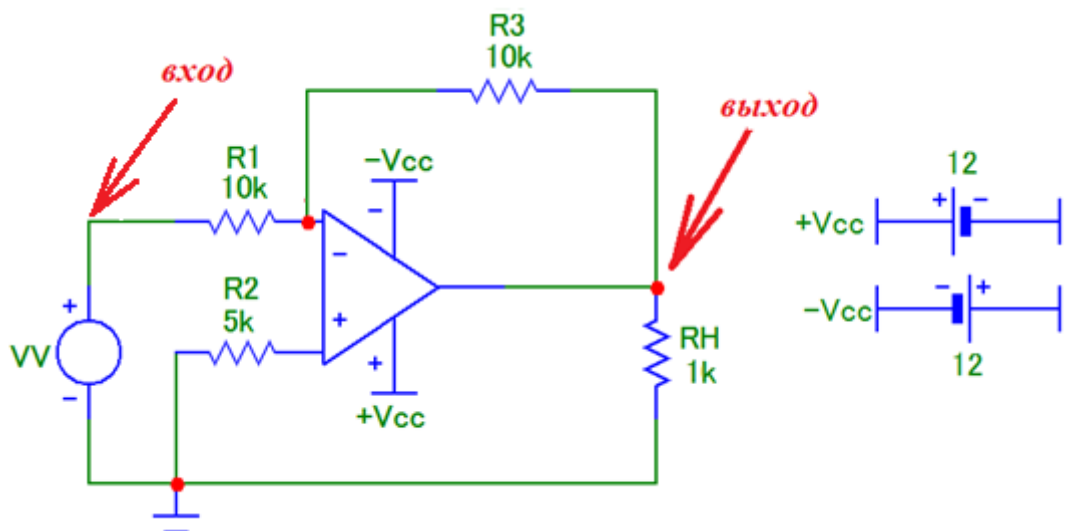


Рис.7. Схема инвертирующего усилителя

Вход и выход данной схемы показаны на рис.7. В процессе создания схемы следует задать параметры каждого элемента.

Основной параметр, задаваемый при выборе **операционного усилителя**, следующий:

- параметр Model – выбрать \$GENERIC.

Значения прочих параметров остаются заданными по умолчанию.

Для задания/изменения **параметров источника сигнала** дважды щелкните по условному графическому обозначению источника. В открывшемся окне надо задать его параметры. Нужно исследовать три варианта входного сигнала.

- 1) гармонический входной сигнал с частотой 1 кГц (параметры показаны на рис.8)

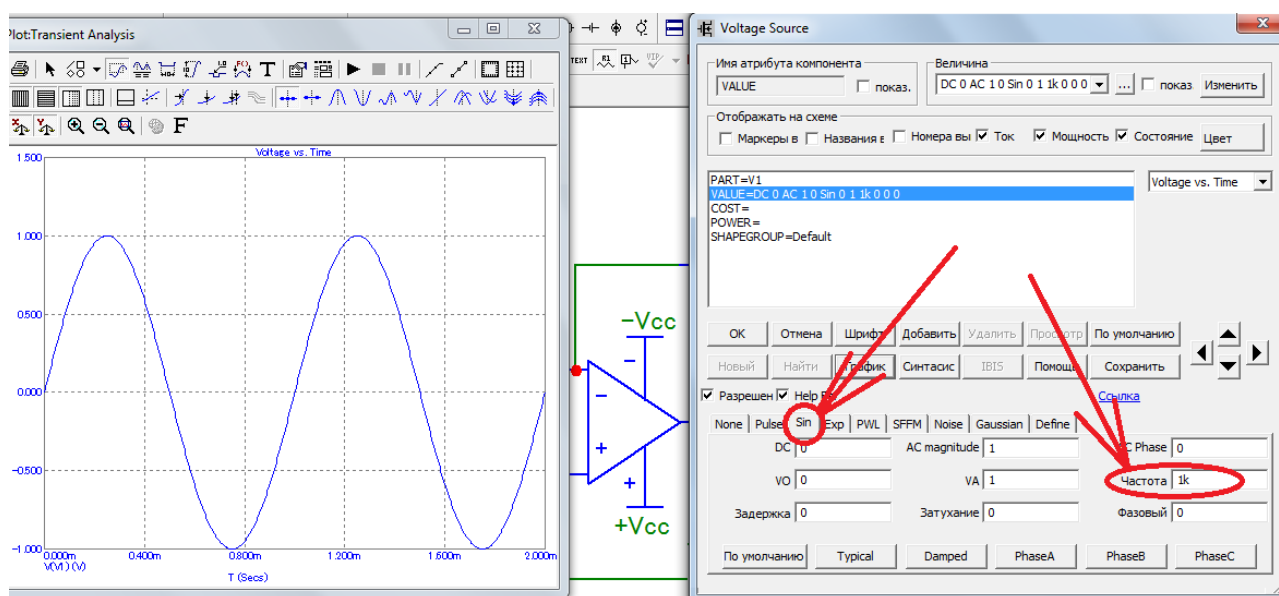


Рис.8. Параметры гармонического входного сигнала

- 2) треугольный входной сигнал с частотой 1 кГц (рис.9) – выбрать параметры самостоятельно в соответствии с заданной частотой. Рис.9. Параметры треугольного входного сигнала. Легко заметить, что треугольный сигнал может быть получен из прямоугольного указанием:

- нулевой длительности вершины импульса,
- равных длительности фронта и среза
- равенства периода сумме двух фронтов
- $V1 = -2,5V; V2 = 2,5V$.

Легко заметить, что треугольный сигнал может быть получен указанием нулевой длительности вершины импульса, и равных длительности фронта и среза.

- 3) прямоугольный входной сигнал с частотой 1 кГц (способ задания по аналогии с ЛРН№1)

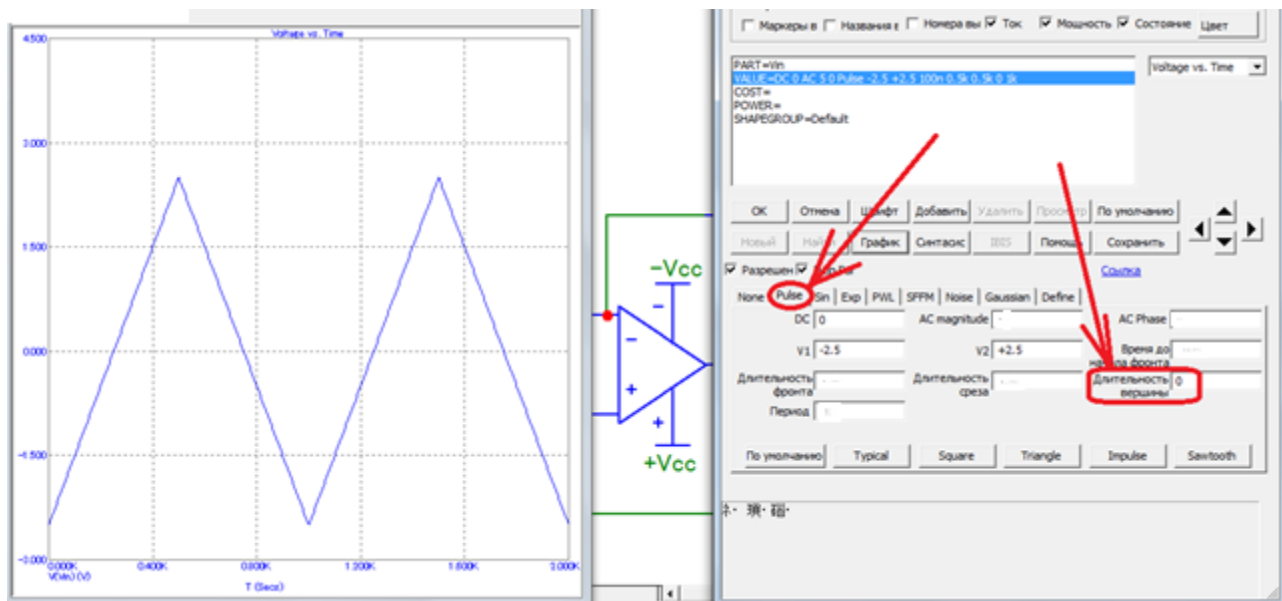


Рис.9. Параметры треугольного входного сигнала

3. Задать параметры источника постоянного напряжения $|+V_{cc}|=|V_{cc}|=12\text{В}$ (рис.10).

4. Задать расположение и номиналы сопротивлений как показано на рис.7. и прочие компоненты схемы (способом, аналогичным с ЛР№1).

На этой схеме для облегчения чтения и уменьшения пересечений проводников показан способ разбиения схемы на отдельные части и способ задания соединений этих частей с помощью специального примитива – коннектор «Tie» (рис.10), который может добавляться также во вкладке «Power Supplies» (внизу окна моделирования).

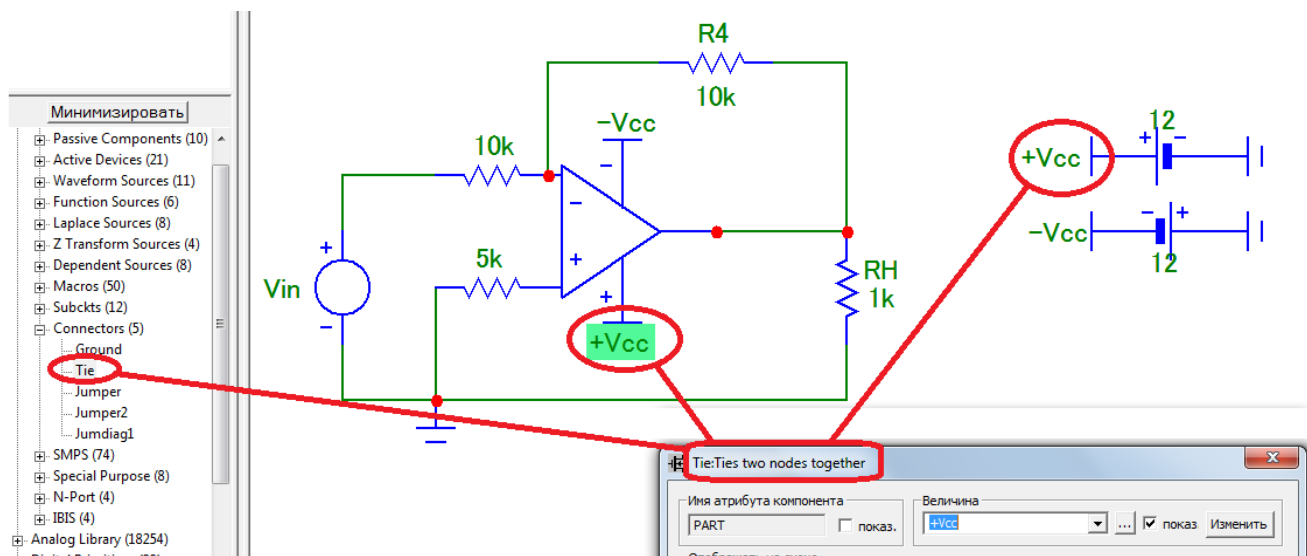


Рис.10. Соединение двух узлов схемы

5. Сохранить скриншот схемы в отчете.

ЗАДАНИЕ

- Исследовать форму выходных сигналов при гармоническом, треугольном и прямоугольном входных сигналах на фиксированной частоте 1 кГц.
- Измерить максимальную скорость нарастания выходного прямоугольного сигнала.

ВЫПОЛНЕНИЕ

6. Форма выходных сигналов выводится и исследуется в режиме «Анализ переходных процессов» (см. ЛР№1). В этом режиме измерить максимальную скорость нарастания выходного импульсного сигнала. Метод измерения максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ установлен ГОСТ 23089.10-83 и основан на определении отношения разности напряжений между уровнями 0,1 и 0,9 выходного напряжения ОУ ко времени его нарастания. Измерение проводят на фронте выходного импульса ОУ при подаче на вход его прямоугольного импульса. Измеренный параметр должен измеряться величинами (В/мксек÷В/мсек).

ЗАДАНИЕ

- Построить АЧХ и ФЧХ инвертирующего усилителя в диапазоне частот от 10кГц до 40 МГц в логарифмическом масштабе по осям координат.
- Измерить полосу пропускания.
- Оценить суммарный сдвиг фаз в заданном диапазоне частот и определить порядок эквивалентного интегрирующего звена для рассматриваемого операционного усилителя.

ВЫПОЛНЕНИЕ

7. Построить АЧХ и ФЧХ в режиме «Частотный анализ». Запустить режим можно через меню «Анализ»/подменю «Частотный анализ» или горячими клавишами Alt+2 (рис.11).

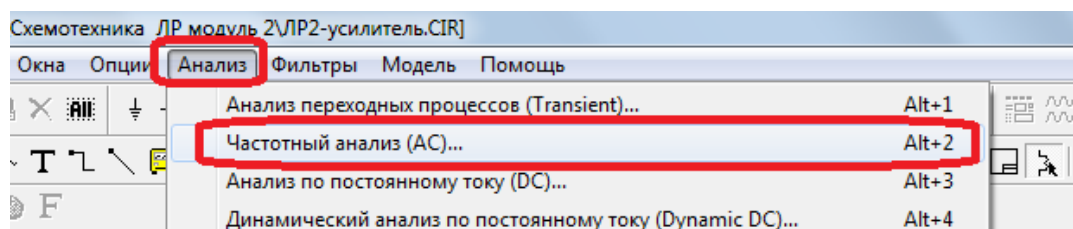


Рис.11. Частотный анализ схемы

В появившемся окне настроек выставить следующие параметры (рис.12):

- способ распределения и диапазон частот (FrequencyRange), число точек (NumberOfPoints) и масштаб по оси Y – выберите/рассчитайте/укажите

самостоятельно. Можно попробовать задать в режиме «Auto», а потом конкретизировать для детального рассмотрения наиболее значимой части графиков.

- задать отображение двух диаграмм АЧХ и ФЧХ, для чего заполнить две строки параметров:
 - задать «Выражения по оси X» – частота – переменная F – для обеих диаграмм,
 - задать «Выражения по оси Y» – $\text{dB}(V(\text{out})/V(\text{in}))$,
 - задать «Выражения по оси Y» – $\text{ph}(V(\text{out})/V(\text{in}))$,
 - выбрать «Масштаб по оси X» – FMAX,FMIN – для обеих диаграмм,
- P = № графика, надо указать 1 для первого и 2 для второго, тогда диаграммы АЧХ и ФЧХ будут выведены на разные графики.

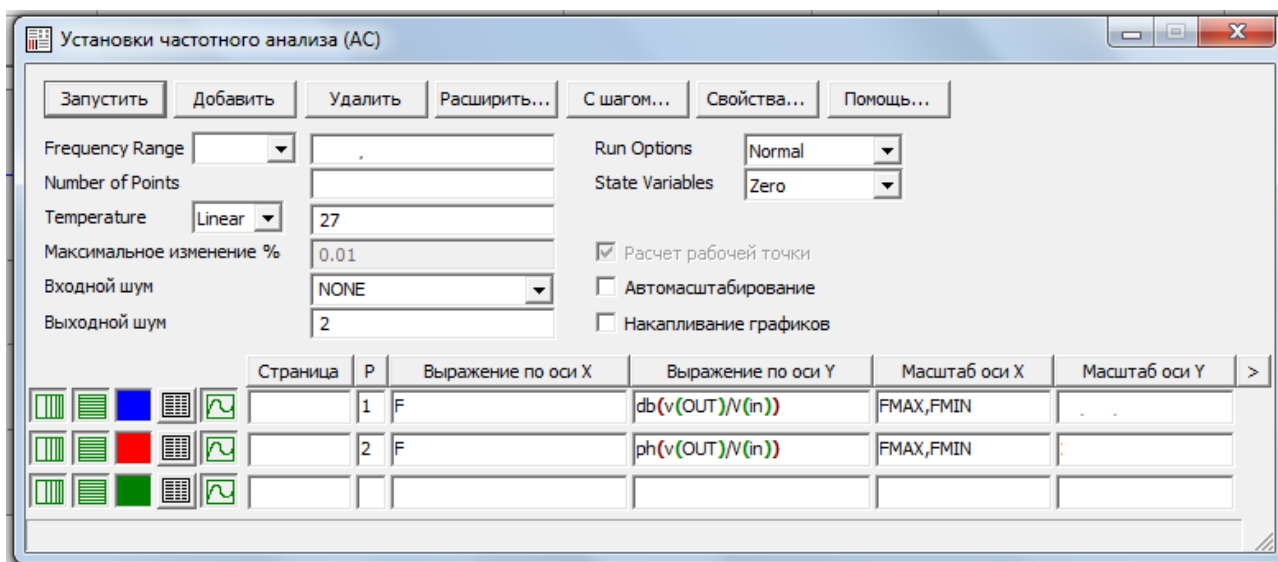


Рис.12. Задание параметров анализа

Остальные параметры оставить заданными по умолчанию. Можете изменить по желанию цвет выводимых графиков.

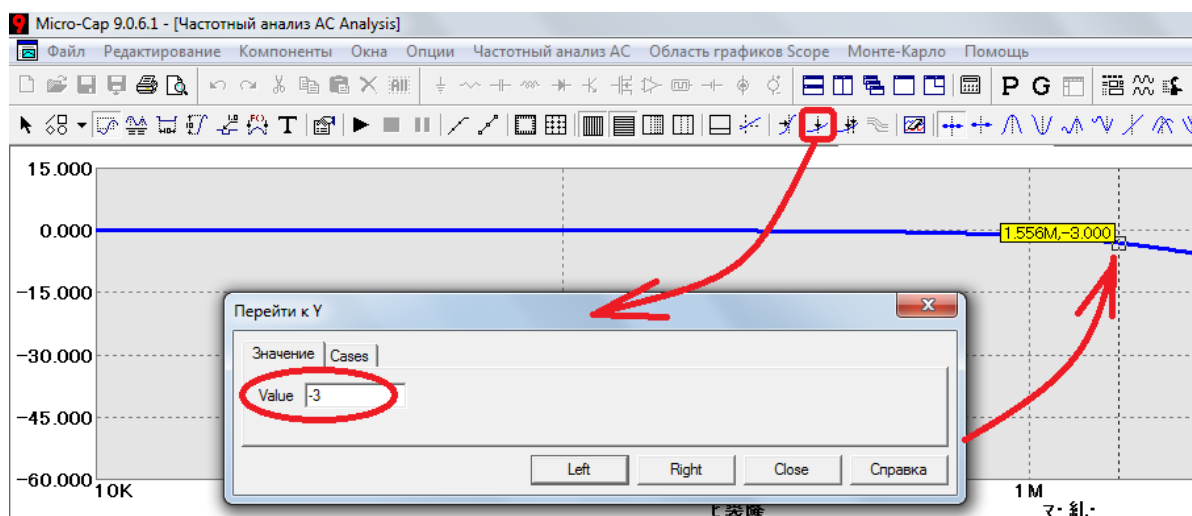


Рис.13. Область графиков: выбор точки с заданной координатой по ОУ

8. На получившейся диаграмме АЧХ измерить полосу пропускания, для чего в меню выбрать кнопку – «Перейти к $Y=...$ » или воспользоваться сочетанием клавиш «Ctrl+Shift+Y» (рис.13). после этого в жёлтом окне появятся координаты точки на диаграмме, зная которые можно вычислить частоту среза и полосу пропускания.

9. Для получившейся диаграммы ФЧХ оценить суммарный сдвиг фаз в заданном диапазоне частот и порядок эквивалентного интегрирующего звена для рассматриваемого операционного усилителя.

ОТЧЕТ О РАБОТЕ

В отчет следует включить результаты выполненных заданий

1. скриншот собранной схемы
2. построенные для каждого задания временные диаграммы с нужными отметками
3. значения измеренных параметров
4. выводы

ПРАВИЛА ОЦЕНИВАНИЯ

Оценки проставляются по следующему правилу:

- отчет выполнен верно, аккуратно, без замечаний и передан преподавателю в срок (до начала следующей ЛР) - 10 баллов,
- отчет выполнен верно с небольшими замечаниями и передан преподавателю в срок: 8 или 9 баллов (в зависимости от важности замечаний),
- отчет выполнен верно, но передан преподавателю с опозданием: 7 баллов,
- отчет выполнен со значительными ошибками – выставляется оценка от 1 до 7 баллов (в зависимости от количества ошибок), необходима защита отчета (исправление ошибок с пояснениями и ответ на вопросы из методических указаний) - оценка по результатам исправления и защиты отчета от 1 до 8 баллов,

Отчет представляется в электронной или бумажной форме. Оформляется один отчет на бригаду студентов (1-3 чел). Отчет высылается на электронную почту преподавателю.

Тема сообщения: БИВ156-Лаб.2_мод_2.

Имя файла: 156-Лаб_2.2-Симонов-Петров

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что исследовалось в ЛР№2?
2. Назначение операционного усилителя.



3. Перечислите основные параметры аналоговых устройств и основные параметры усилителя.
4. Что такое АЧХ?
5. Что такое ФЧХ?
6. Что такое коэффициент усиления?
7. Какими бывают коэффициент усиления?
8. В каких единицах выражаются коэффициенты усиления?
9. Что такое децибелы, и каковы правила их расчета?
10. Что такое полоса пропускания усилителя?
11. Что показывает частота среза АЧХ (ФЧХ)?
12. Что показывает крутизна спада АЧХ (ФЧХ)?

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Цель работы</i>	2
<i>Краткое содержание</i>	2
ОБЩЕЕ ТРЕБОВАНИЕ К ПОСЕТИТЕЛЯМ ЛАБОРАТОРИИ	2
ЗАДАНИЕ	2
КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	3
<i>Частотные параметры аналоговых устройств</i>	3
<i>Коэффициент усиления</i>	3
<i>Полоса пропускания</i>	4
<i>Амплитудно-частотная характеристика</i>	5
<i>Фазо-частотная характеристика</i>	6
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	7
ОТЧЕТ О РАБОТЕ	12
ПРАВИЛА ОЦЕНИВАНИЯ	12
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	12