

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие

ПЕНЗА 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

Электроника

Учебно-методическое пособие

Составители:
В. В. Пащенко, К. И. Никишин

Пенза
Издательство ПГУ
2022

УДК 621.38
Э45

Р е ц е н з е н т

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Математическое обеспечение и применение ЭВМ»
Пензенского государственного университета
П. П. Макарычев

Э45 **Электроника** : учеб.-метод. пособие / сост.: В. В. Пащенко,
К. И. Никишин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. – 36 с.

Рассматриваются принципы функционирования основных узлов и элементов электроники. Представлена методика выполнения лабораторных работ, целью которых является практическое знакомство с транзисторами, операционными усилителями, фильтрами, а также выработка практических навыков инженерного проектирования и наладки устройств на микросхемах малой и средней интеграции.

Издание подготовлено на кафедрах «Вычислительная техника», «Автоматика и телемеханика» ПГУ и предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 27.03.04 «Управление в технических системах» и специальности 09.05.01 «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения».

УДК 621.38

© Пензенский государственный
университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Лабораторная работа № 1. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА В УСИЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ	5
Лабораторная работа № 2. РАБОТА ТРАНЗИСТОРА В УСИЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ	11
Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ВОЗМОЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ.....	19
Лабораторная работа № 4. ФИЛЬТРЫ.....	28
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения принципов функционирования и применения основных функциональных узлов аналоговой электроники, реализуемых на дискретных элементах и микросхемах.

Лабораторные работы по дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника» в части «Электроника» выполняются с использованием программ моделирования электронных схем, используемых для сквозного проектирования электронных устройств.

Программы моделирования используются не только для обучения, но и успешно применяются в инженерной практике, заменяя длительный и трудоемкий процесс макетирования и отладки разрабатываемого электронного оборудования. Поэтому получение навыков работы с программами моделирования является неотъемлемой частью изучения предмета.

Лабораторные работы были апробированы в дистанционном режиме обучения и могут использоваться студентами, обучающимися заочно.

При проведении лабораторных работ следует руководствоваться следующими положениями:

1) лабораторные занятия проводятся фронтально во всей группе. Объем задания определяет ведущий преподаватель;

2) к каждой лабораторной работе необходима самостоятельная подготовка, включающая:

а) изучение теоретического материала, предложенного в лабораторной работе и в рекомендуемых преподавателем учебниках и методических материалах;

б) выполнение необходимых расчетов изучаемых в работе схем, чтобы не тратить время в процессе работы в лаборатории;

в) изучение всех пунктов задания, которое необходимо выполнить в процессе работы в лаборатории.

Лабораторная работа № 1

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА В УСИЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Цель работы: исследование режимов работы усилителей и типовых схем подачи смещения на базы транзисторов.

Общие сведения

Транзистор является нелинейным прибором. Различают два основных режима работы транзистора: ключевой и усилительный. При работе в ключевом режиме транзистор находится либо в закрытом, либо в насыщенном состоянии. Усилительный режим работы транзистора характеризуется тем, что транзистор всегда открыт (рабочая точка задана), а при подаче сигнала на базу транзистора рабочий ток транзистора изменяется под действием этого сигнала.

Чтобы перевести транзистор в усилительный режим необходимо включить $n-p-n$ -транзистор так, чтобы переход эмиттер-база был открыт, а переход коллектор-база закрыт.

Для задания рабочей точки используются типовые схемы подачи смещения на базу транзистора. Наиболее простым вариантом задания рабочей точки является типовая схема включения транзистора в усилительный режим с помощью базового резистора (рис. 1.1). В этой схеме рабочая точка может меняться при помощи переменного резистора R .

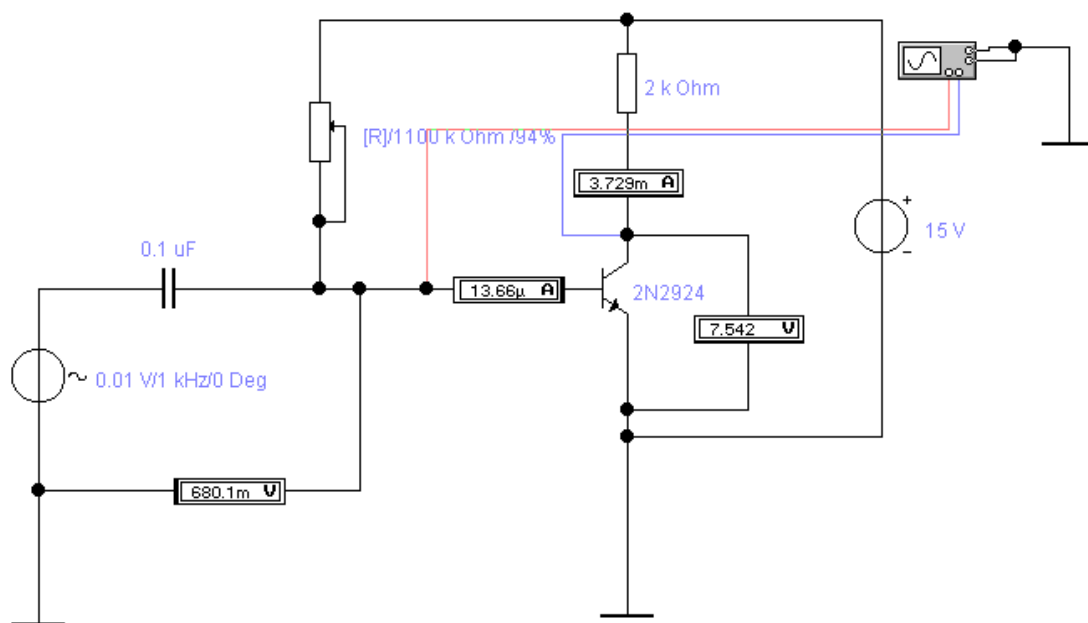


Рис. 1.1. Компьютерная модель работы транзистора в усилительном режиме с помощью базового резистора

Осциллограмма работы транзистора показана на рис. 1.2.

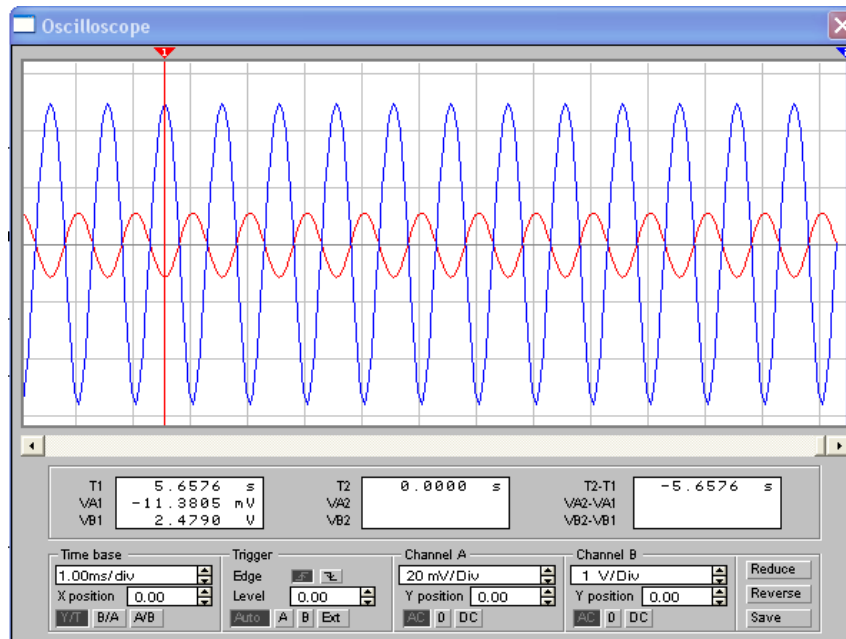


Рис. 1.2. Результат моделирования работы транзистора в усилительном режиме

На рис. 1.3 изображена схема, в которой рабочая точка задана при помощи базового делителя и резистора в эмиттерной цепи, на рис. 1.4 – осциллограмма его работы. Эмиттерный резистор стабилизирует режим работы схемы и может быть использован для задания или изменения рабочей точки.

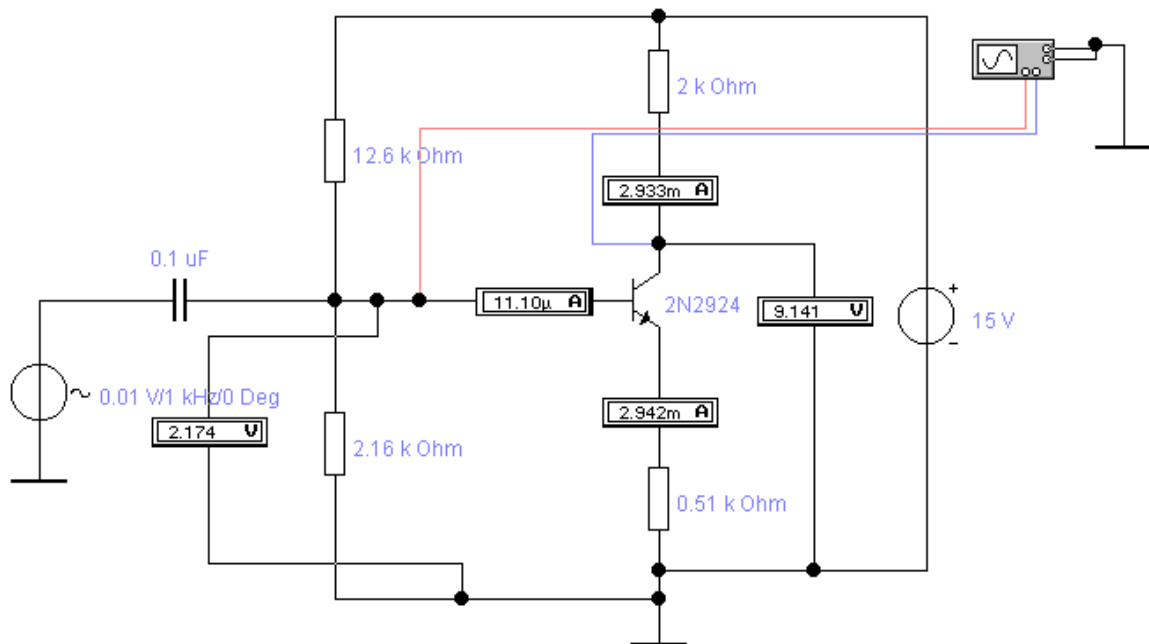


Рис. 1.3. Компьютерная модель транзистора с базовым делителем и резистором в эмиттерной цепи

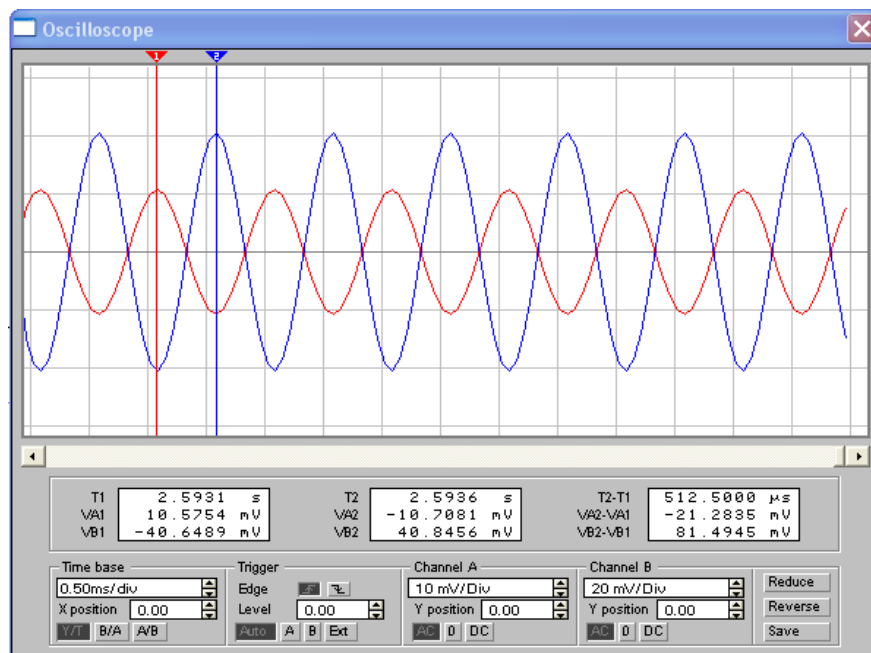


Рис. 1.4. Результат моделирования работы транзистора с базовым делителем и резистором в эмиттерной цепи

Третий способ задания рабочей точки представлен на рис. 1.5 и на рис. 1.6 – осциллограмма работы транзистора.

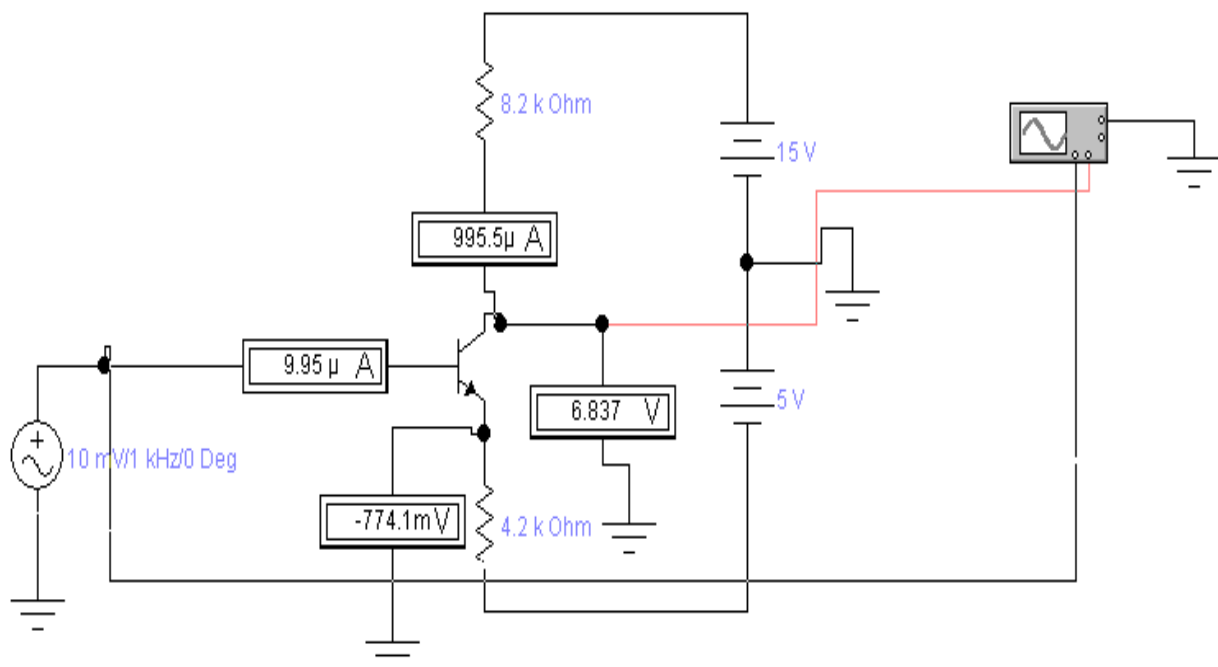


Рис. 1.5. Компьютерная модель работы транзистора от двух источников питания

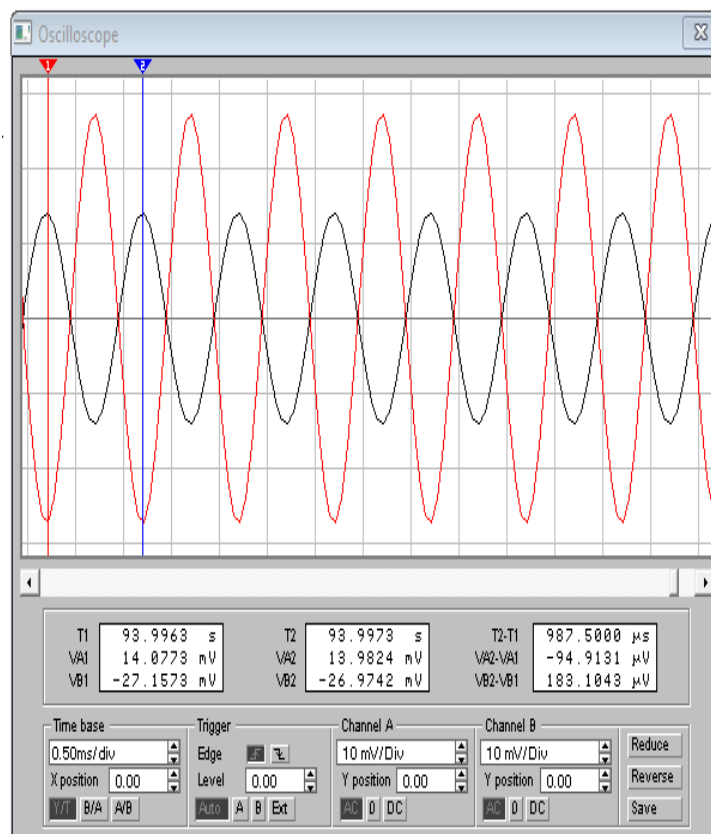


Рис. 1.6. Результат моделирования работы транзистора от двух источников питания

Отличительной особенностью схемы является то, что усилительный каскад питается от двух последовательно включенных источников питания, средняя точка которых заземлена.

С положением рабочей точки на нагрузочной прямой связан динамический диапазон схемы, который определяется отношением максимального для данной схемы неискаженного по форме выходного сигнала к выходному шуму. Чем ближе положение рабочей точки к середине нагрузочной прямой, тем больше выходной сигнал схемы.

1. Схема с питанием от одного источника напряжения с базовым резистором.
2. Схема с питанием от одного источника с базовым делителем и обратной связью на эмиттерном резисторе.
3. Схема с питанием от двух источников.

Порядок выполнения работы

1. Исследование схемы усилительного каскада с заданием рабочей точки при помощи базового резистора

Соберите схему усилительного каскада. Подключите амперметры и вольтметры в режиме измерения постоянного тока для измерения

базового и коллекторного токов, напряжений на базе и на коллекторе транзистора. На вход схемы подайте синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и амплитудой 10 мВ от генератора. Для наблюдения входного и выходного сигналов схемы подключите к ней осциллограф.

1.1. Определение параметров рабочей точки

Включите моделирование и определите постоянные базовый и коллекторный токи, текущие через транзистор, а также напряжение между базой и эмиттером транзистора и между коллектором и эмиттером транзистора.

Изобразите входную и выходные характеристики транзистора и нанесите на них определенные в эксперименте параметры рабочей точки на входной ($U_{БЭ}$, I_B) и выходных ($U_{КЭ}$, I_K) характеристиках транзистора.

Определите коэффициент усиления представленной схемы по току

$$K_I = I_K / I_B.$$

1.2. Изменение параметров рабочей точки

Измените сопротивление базового резистора сначала в сторону увеличения на 10 %, а затем – в сторону уменьшения на 10 %. Измерьте изменившиеся напряжения и токи в исследуемой схеме, отметьте новые положения рабочей точки на характеристиках транзистора. Постарайтесь связать произошедшие изменения с понятиями «транзистор подзакрывается» и «транзистор приоткрывается».

1.3. Оценка динамического диапазона усилительного каскада

Для определения максимального размаха выходного сигнала схемы при выбранном положении рабочей точки подайте на вход схемы такой сигнал, который дает максимальный неискаженный сигнал на выходе. Определите максимальный сигнал на выходе при трех заданных ранее положениях рабочей точки. Объясните изменения уровня максимального сигнала исследуемой схемы.

2. Исследование схем с базовым делителем

Повторите исследования, проведенные в пунктах 1.1–1.3 для схемы, изображенной на рис. 1.3.

Обратите внимание на то, что в схеме с обратной связью положение рабочей точки можно задавать путем изменения сопротивления эмиттерного резистора.

3. Исследование схемы с двумя источниками питания

Повторите исследования, проведенные в пунктах 1.1 и 1.3 для схемы, изображенной на рис. 1.5.

Меняйте положение рабочей точки путем изменения сопротивления эмиттерного резистора на 10 %.

Как при этом будет меняться нагрузочная прямая?

В отчете для каждой из схем приведите модель и результаты моделирования по каждому из пунктов программы. Приведите расчет коэффициента усиления, постройте нагрузочную прямую и отметьте положение рабочих точек на ней. Определите с помощью осциллографа и запишите в отчет максимальный сигнал для каждого положения рабочей точки. Сделайте вывод о связи положения рабочей точки и величины максимального неискаженного сигнала в схеме.

Контрольные вопросы

1. Что такое выходные характеристики транзистора?
2. Как построить нагрузочную прямую транзистора?
3. Как рассчитывается коэффициент усиления по току транзисторного каскада?
4. Как определяется оптимальное положение рабочей точки?
5. Какие элементы схемы определяют максимальный ток транзисторного каскада?

Лабораторная работа № 2

РАБОТА ТРАНЗИСТОРА В УСИЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Цель работы: определение вторичных параметров усилителя с общим эмиттером и эмиттерного повторителя, исследование частотных характеристик усилителей на транзисторах, исследование источника тока на биполярном транзисторе.

Общие сведения

Транзистор является трехполюсником и может быть включен с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) и общей базой (ОБ). Основными вторичными параметрами усилителей являются коэффициент усиления по напряжению, коэффициент усиления по току, входное сопротивление, выходное сопротивление. Усилитель с ОЭ, схема которого приведена на рис. 2.1, является основной усилительной схемой, а на рис. 2.2 показана осциллограмма его работы.

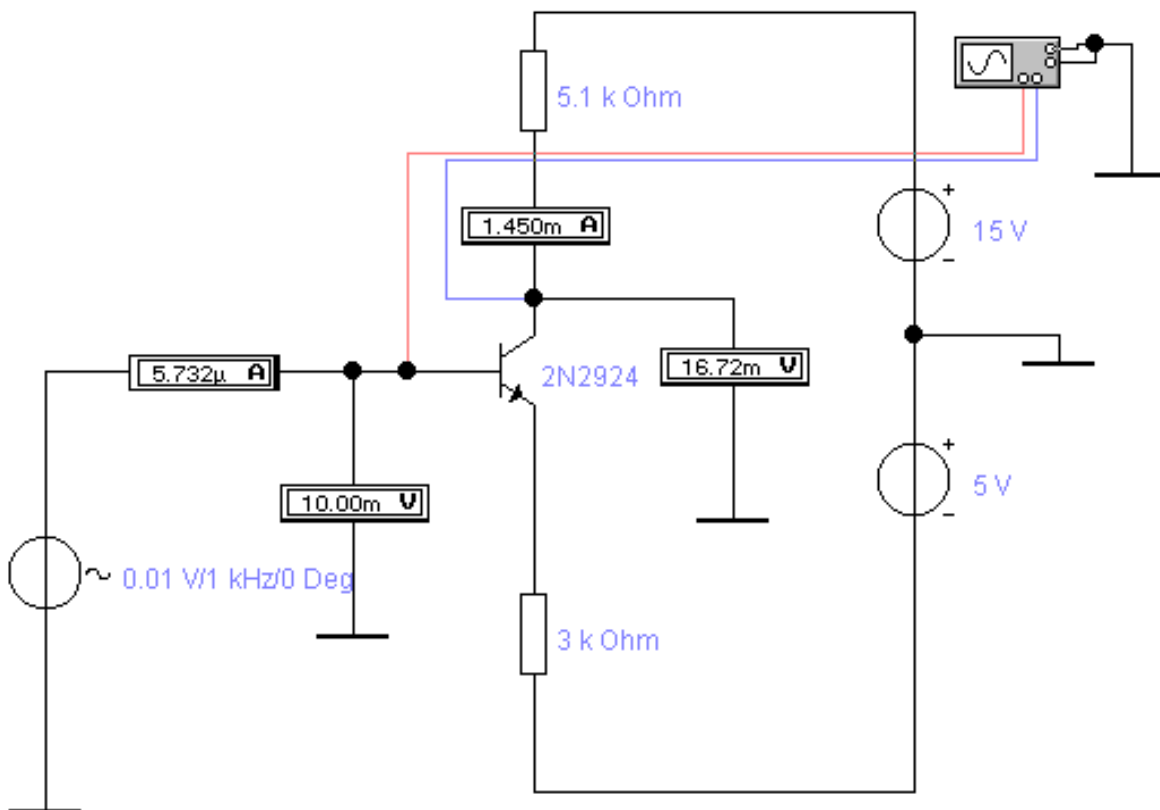


Рис. 2.1. Компьютерная модель усилителя с ОЭ

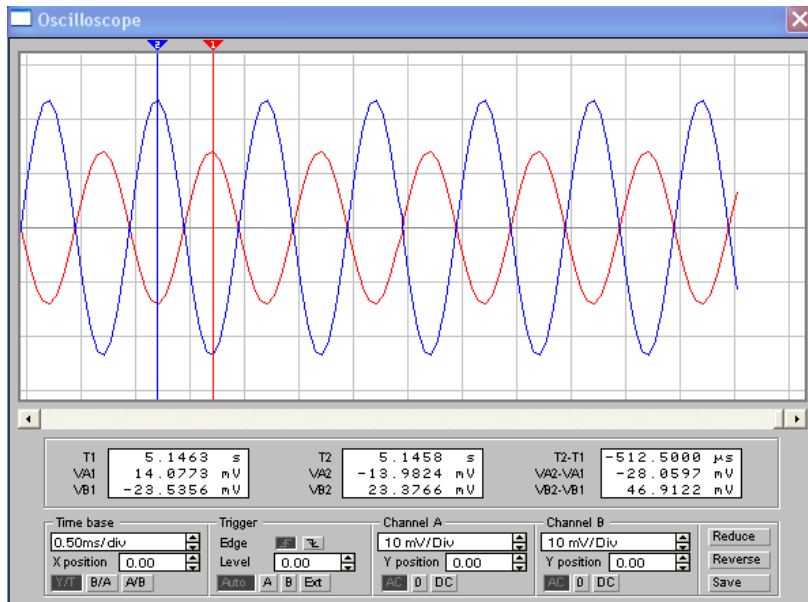


Рис. 2.2. Результат моделирования работы усилителя с ОЭ

Он обладает высоким коэффициентом усиления по напряжению, большим входным сопротивлением и сравнительно высоким выходным сопротивлением

$$K = -\beta R_H / R_{BX}, R_{BX} = r_B + r_E(1 + \beta), R_{ВЫХ} \approx R_K.$$

В случае введения ООС с помощью эмиттерного резистора параметры схемы меняются

$$K \approx -R_H / R_E, R_{BX} \approx \beta R_E, R_{ВЫХ} \approx R_K.$$

Эмиттерный повторитель (схема с ОК), компьютерные модели которого показаны на рис. 2.3 и 2.5 и осциллограммы их работы на рис. 2.4 и 2.6, обладает близким к единице коэффициентом усиления, большим входным и малым выходным сопротивлениями

$$K \approx 1, R_{BX} = \beta R_H, R_{ВЫХ} = R_S / \beta.$$

Схема источника тока представлена на рис. 2.7. Идеальный источник тока обладает бесконечным выходным сопротивлением. Поскольку выходное сопротивление транзистора составляет 10 кОм и более, то включая нагрузку в коллекторную цепь транзистора, проектируют источники тока.

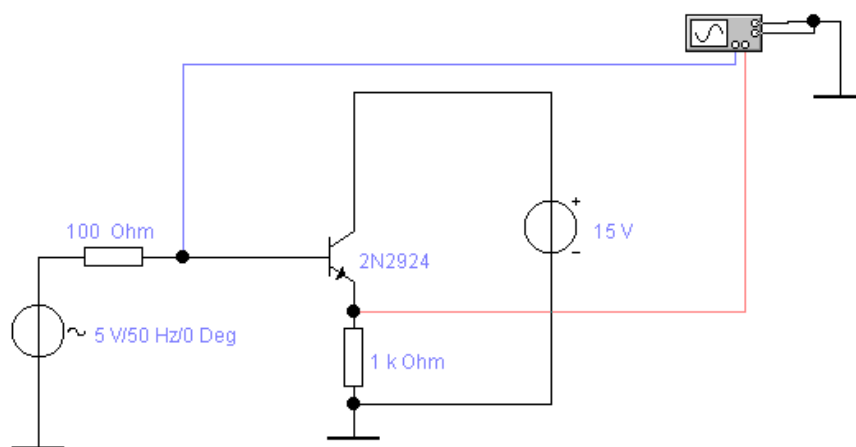


Рис. 2.3. Компьютерная модель эмиттерного повторителя в нелинейном режиме

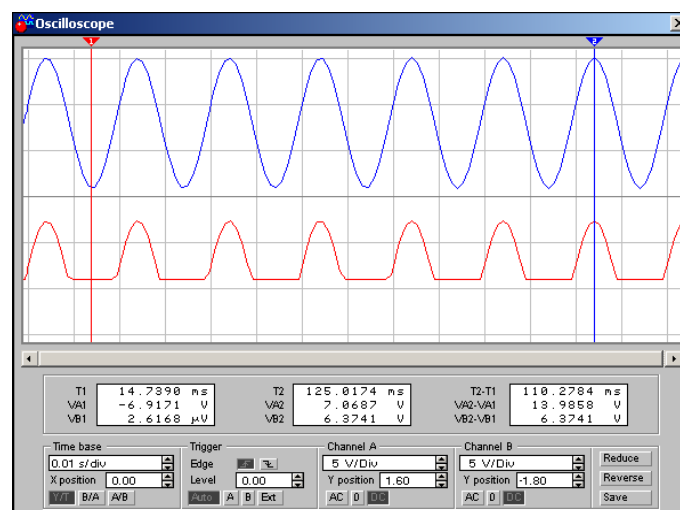


Рис. 2.4. Результат моделирования работы эмиттерного повторителя в нелинейном режиме

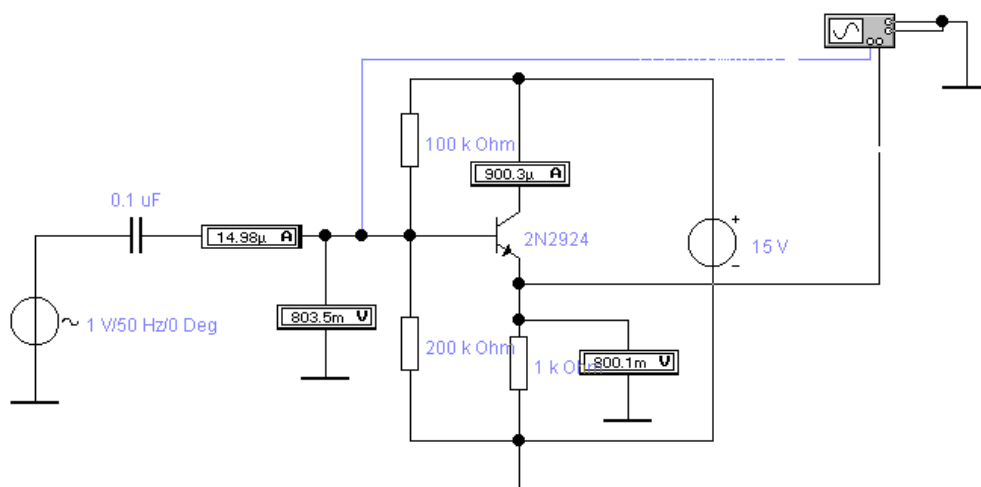


Рис. 2.5. Компьютерная модель эмиттерного повторителя в линейном режиме

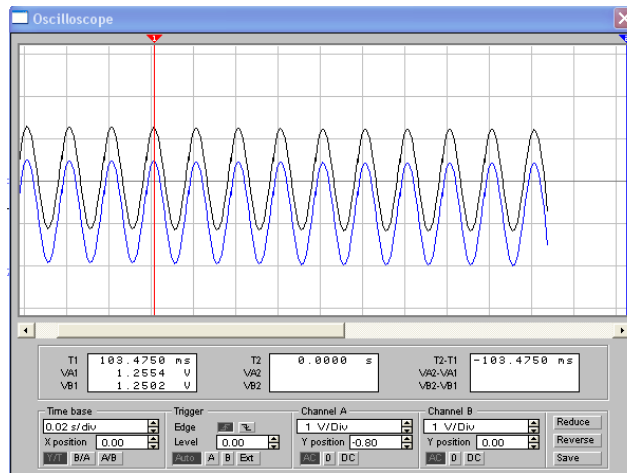


Рис. 2.6. Результат моделирования работы эмиттерного повторителя в линейном режиме

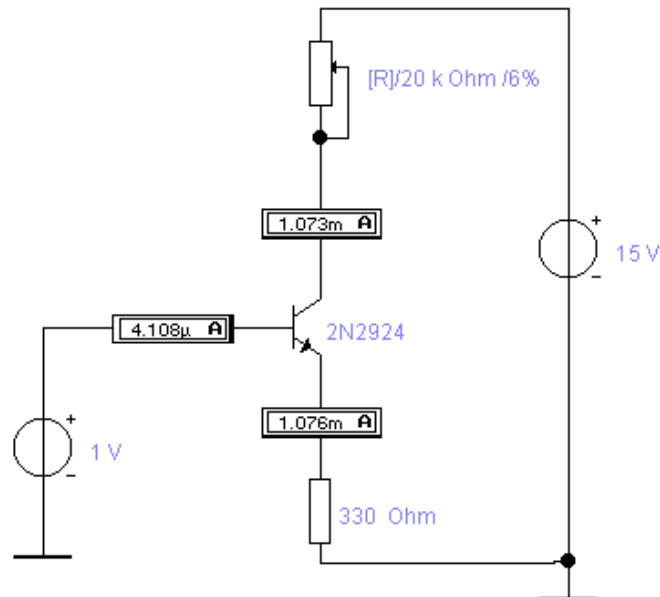


Рис. 2.7. Компьютерная модель схемы источника тока

Ток такого источника задается с помощью напряжения на базе и эмиттерного резистора

$$I_H = \frac{U_B - U_{БЭ}}{R_Э}.$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя представляет собой зависимость модуля коэффициента усиления от частоты. Схема для исследования частотных свойств усилителя представлена на рис. 2.8. На рис. 2.9 представлен результат моделирования АЧХ, усиления на низких частотах, осциллограмма на низких частотах – на рис. 2.10, на рис. 2.11 и 2.12 исследовано на средних частотах.

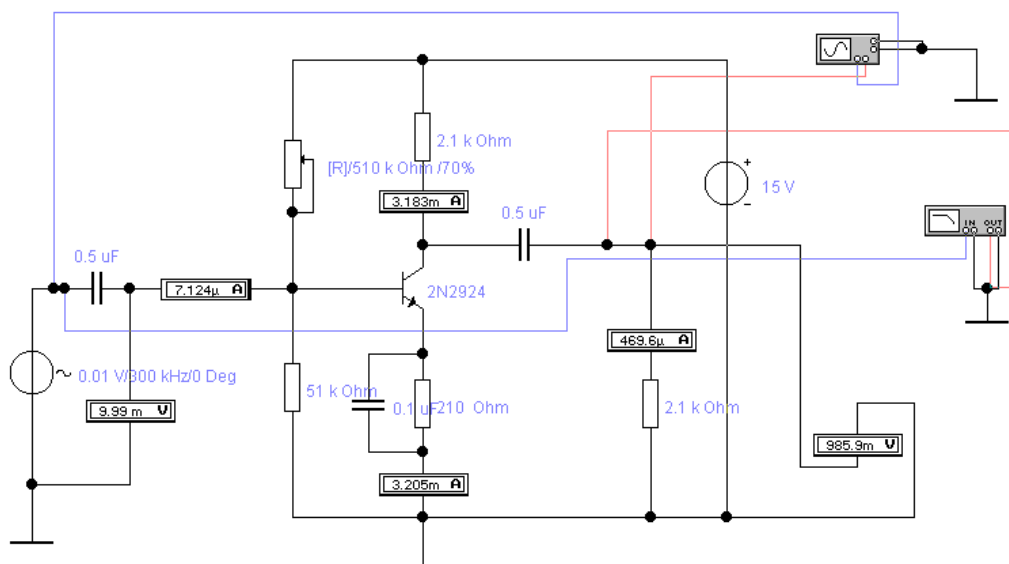


Рис. 2.8. Компьютерная модель усилителя для исследования АЧХ

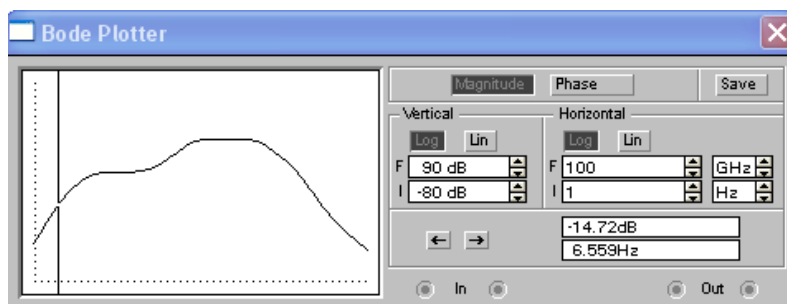


Рис. 2.9. Результат моделирования АЧХ, усиление на низких частотах

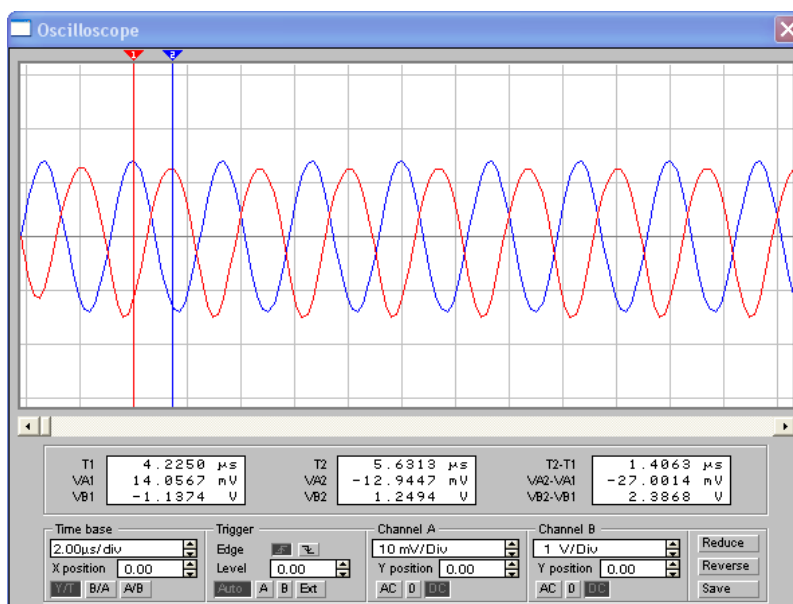


Рис. 2.10. Осциллограмма на низких частотах

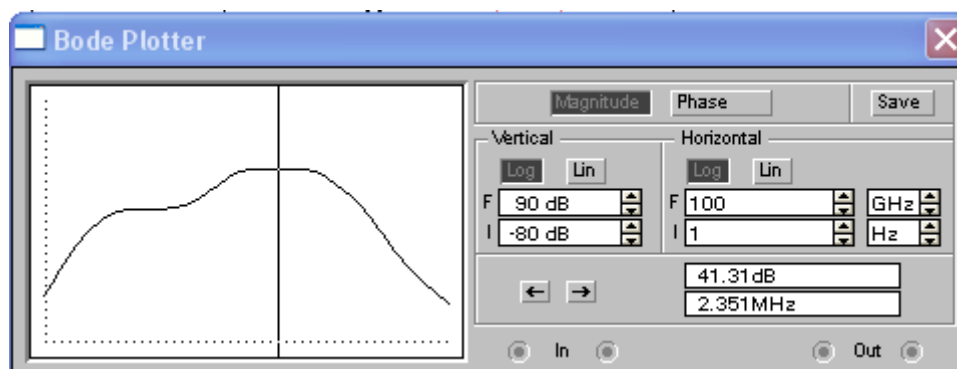


Рис. 2.11. Результат моделирования АЧХ, усиление на средних частотах

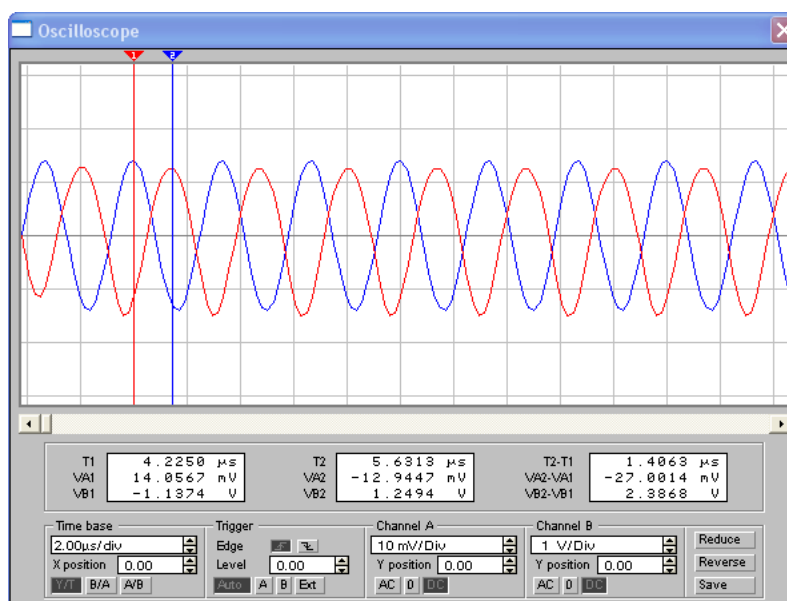


Рис. 2.12. Осциллограмма на средних частотах

Перечень схем моделирования в лабораторной работе:

- 1) усилитель с общим эмиттером;
- 2) эмиттерный повторитель в нелинейном и линейном режимах;
- 3) частотные свойства усилителей АЧХ. Работа транзистора на низких, средних и высоких частотах;
- 4) источник тока на биполярных транзисторах.

Порядок выполнения работы

1. Исследование усилителя с ОЭ

Создание компьютерной модели для исследования усилителя с ОЭ. Для определения вторичных параметров усилителя с ОЭ соберите схему, изображенную на рис. 2.1. Включите вольтметры и амперметры в режим измерения переменного тока, осциллограф также должен быть

настроен на отображение переменной составляющей выходного напряжения (АС).

Определение вторичных параметров усилителя с ОЭ. Созданная компьютерная модель является усилителем с отрицательной обратной связью. Определите по формулам для данной модели вторичные параметры усилителя. Затем включите моделирование и убедитесь с помощью осциллографа в том, что в выходном сигнале нет нелинейных искажений. В случае если выходной сигнал не является синусоидальным, уменьшите входной сигнал. Для измерения коэффициента усиления усилителя по напряжению воспользуйтесь показаниями вольтметров на входе и на выходе усилителя $K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$. Коэффициент усиления схемы по току вы определите по показаниям амперметров $K_i = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$. Входное сопротивление определяется как отношение входного напряжения к входному току $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$. Сравните расчетные значения вторичных параметров схемы с параметрами, полученными в результате эксперимента.

2. Исследование эмиттерного повторителя

2.1. Исследование эмиттерного повторителя в нелинейном режиме. Для исследования эмиттерного повторителя в нелинейном режиме соберите компьютерную модель схемы, изображенную на рис. 2.3. Включите моделирование и получите осциллограммы входного и выходного сигналов. Уменьшите входной сигнал до уровня меньше 0,6 В. Почему отсутствует выходной сигнал? Что нужно сделать в схеме, чтобы схема усиливала не только положительный, но и отрицательный сигнал?

2.2. Определение вторичных параметров эмиттерного повторителя. Обратитесь к компьютерной модели эмиттерного повторителя в линейном режиме, изображенной на рис. 2.5. Повторите все измерения, которые были проделаны для определения вторичных параметров усилителя с общим эмиттером п. 1.2.

3. Исследование АЧХ усилителя

Для определения АЧХ усилителя обратитесь к схеме усилителя с общим эмиттером, изображенной на рис. 2.7. Определите коэффициент усиления усилителя на низких (10 Гц), средних (100 МГц), высоких частотах (1 ГГц) с помощью осциллографа. Задавайте частоту входного сигнала на генераторе. Затем подключите к усилителю измеритель АЧХ,

как показано на схеме. Установите частотный диапазон измерителя АЧХ от 1 Гц до 100 ГГц в логарифмическом режиме, а диапазон для коэффициента усиления от -80 дБ до $+90$ дБ. С помощью визира измерьте коэффициент усиления на тех же частотах, на которых были проведены измерения с помощью осциллографа. Сравните полученные с помощью разных приборов результаты. Поясните характер поведения АЧХ.

4. Источник тока на биполярном транзисторе

Соберите компьютерную модель источника тока по схеме, изображенной на рис. 2.12.

4.1. Определения рабочего диапазона источника тока. Снимите зависимость тока в нагрузке от сопротивления нагрузки. Для этого меняйте сопротивление нагрузки от 0 до 100 %. При каком значении сопротивления нагрузки начнет меняться ток?

4.2. Задание тока нагрузки. Измените ток нагрузки до уровня 2 мА путем изменения сопротивления эмиттерного резистора. Найдите выражение для расчета этого сопротивления с учетом источника входного напряжения и требуемого тока.

Контрольные вопросы

1. Постройте эквивалентную схему усилителя по источнику сигнала на рис. 2.1. Какие вторичные параметры усилителя можно определить с использованием эквивалентной схемы? Где в эквивалентной схеме течет ток 1,45 мА?

2. Какие из элементов схемы на рис. 2.1 влияют на коэффициент усиления?

3. По рис. 2.3 приведите ВАХ транзистора, постройте нагрузочную прямую и укажите рабочую точку.

4. Поясните работу схемы на рис. 2.3, почему усиливается только положительная полуволна входного сигнала?

5. Что будет на выходе эмиттерного повторителя (см. рис. 2.3), если входной сигнал снизить до 0,5 В? Почему в схеме повторителя в линейном режиме (см. рис. 2.5) результат будет иным?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И ВОЗМОЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение основных параметров и возможных применений операционных усилителей.

Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) – это усилитель постоянного тока, имеющий весьма большой коэффициент усиления по напряжению k_u , приспособленный к работе с цепями отрицательной обратной связи. Отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления. На рис. 3.1 приведены условные обозначения ОУ без цепей питания (а) и с цепями питания (б).

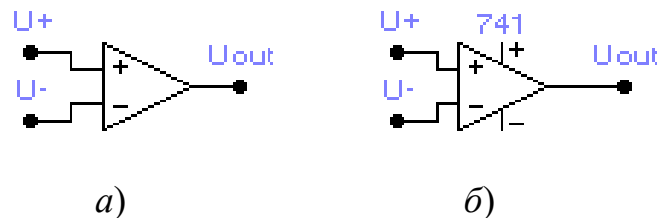


Рис. 3.1. Условные обозначения операционного усилителя в программах моделирования

Основное уравнение, описывающее поведение ОУ, следующее:

$$U_{out} = k_u \cdot (U_+ - U_-),$$

где U_{out} – выходное напряжение усилителя относительно общего провода, имеющего нулевой потенциал; k_u – коэффициент усиления по напряжению ОУ (обычно более 50 000); U_+ – напряжение на прямом входе; U_- – напряжение на инвертирующем (полярность!) входе.

Если напряжение двухполярного питания ОУ равно 15 В (см. рис. 3.1, б), то выходное напряжение не может выходить за этот диапазон и при сохранении заданного коэффициента усиления может лежать в диапазоне от $-U_{min} > -15$ В до $+U_{max} < 15$ В.

При использовании операционных усилителей с цепями отрицательной обратной связи для расчета схемы можно пользоваться двумя простыми правилами:

– входное сопротивление усилителя чрезвычайно велико, что позволяет не учитывать входной ток;

– усилитель за счет отрицательной обратной связи всегда обеспечивает равенство напряжений на своих входах:

$$U_- = U_+.$$

Предложенная на рис. 3.2 схема на выходе повторяет входной сигнал без всяких изменений, т.е. $U_{out} = U_{in}$. Но она имеет высокое входное сопротивление и низкое выходное, что позволяет ее использовать при приеме сигнала от высокоомного источника и при низкоомной нагрузке.

На рис. 3.3 представлен синусоидальный входной сигнал усилителя, а на рис. 3.4 – прямоугольный входной сигнал.

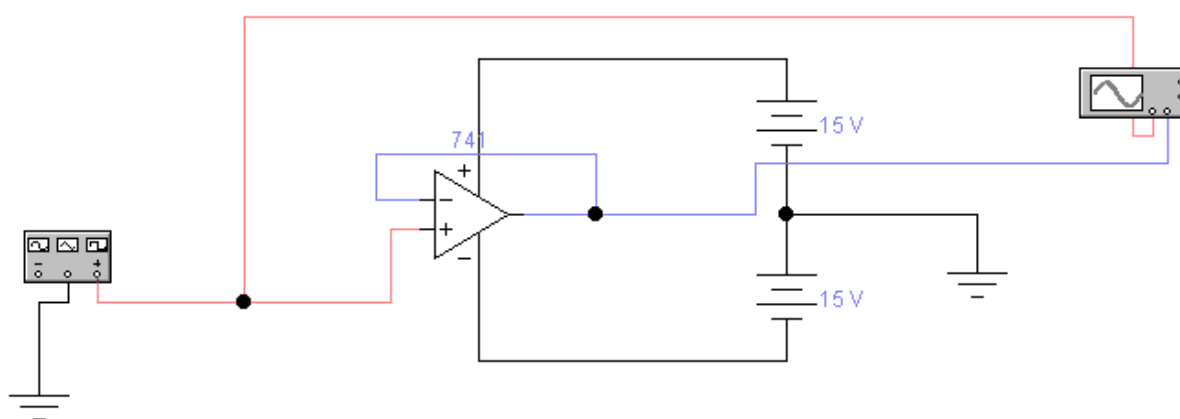


Рис. 3.2. Компьютерная модель повторителя

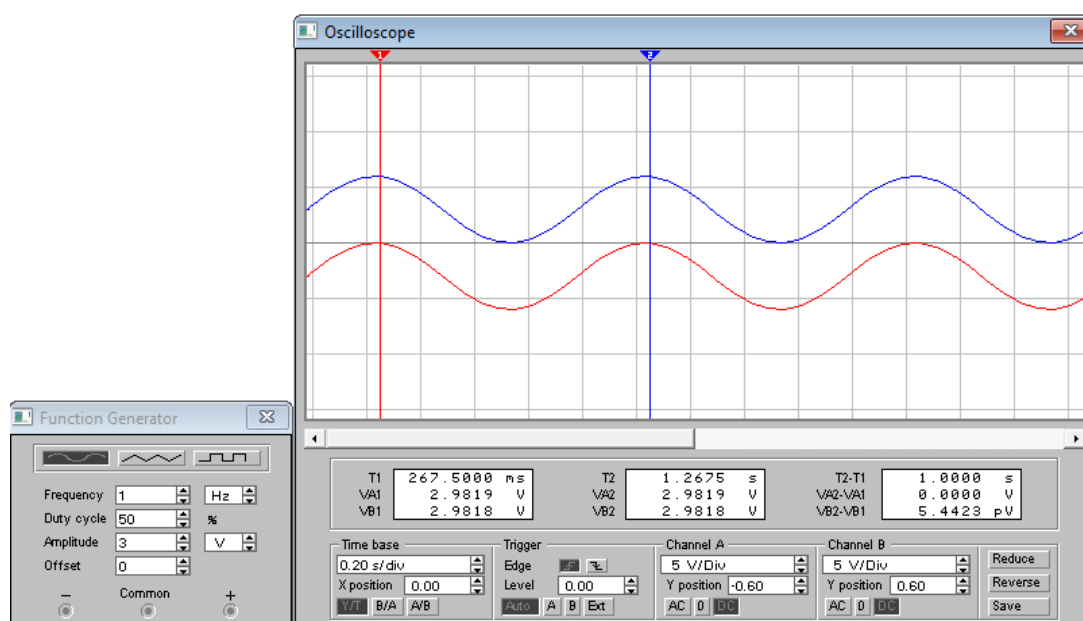


Рис. 3.3. Результат моделирования повторителя при подаче синусоидального входного сигнала

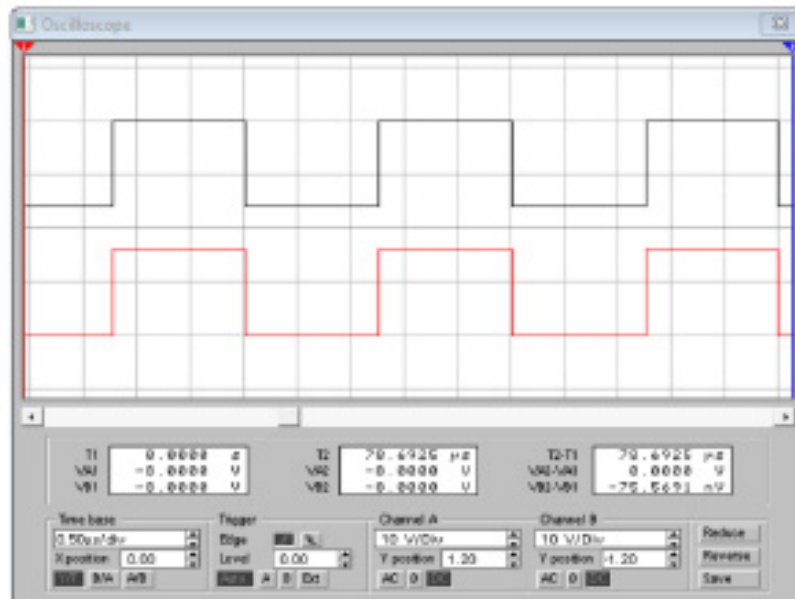


Рис. 3.4. Результат моделирования повторителя при подаче прямоугольного входного сигнала

Суммирующий усилитель представлен на рис. 3.5.

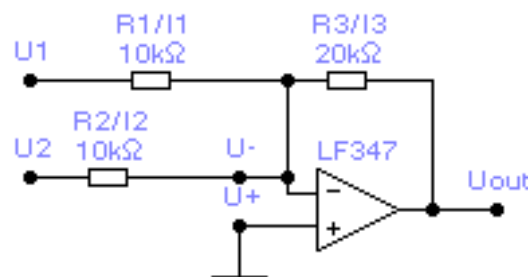


Рис. 3.5. Суммирующий усилитель

С учетом первого правила расчета схем для инвертирующего входа ОУ справедливо равенство

$$I_1 + I_2 = I_3,$$

где I_1 , I_2 , I_3 – токи через соответствующие резисторы.

Учитывая тот факт, что $U_+ = 0$ и второе правило расчета, при котором инвертирующий вход усилителя оказывается потенциально заземленной точкой ($U_- = U_+ = 0$), можно составить уравнение

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = -\frac{U_{out}}{R_3}.$$

Из этого уравнения следует

$$U_{out} = -\frac{R3}{R1}U1 - \frac{R3}{R2}U2 = -\left(\frac{R3}{R1}U1 + \frac{R3}{R2}U2\right).$$

Каждое входное напряжение умножается на свой масштабный коэффициент, выходное напряжение равно сумме входных взвешенных напряжений со знаком минус. Входное сопротивление предложенной схемы по каждому источнику сигналов определяется сопротивлениями входных резисторов: $R1, R2$.

Рассмотрим еще две схемы, представляющие интерес рис. 3.6.

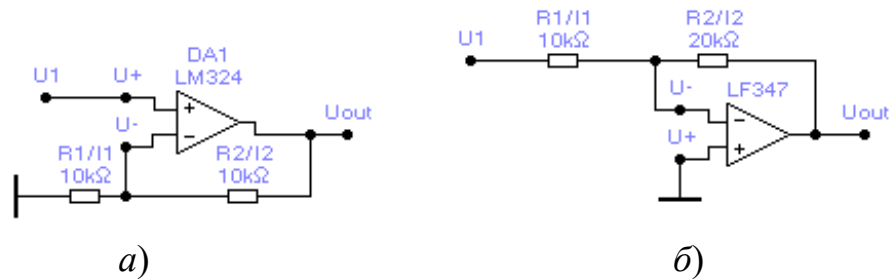


Рис. 3.6. Не инвертирующий полярность (а) и инвертирующий полярность (б) масштабирующие усилители

Для не инвертирующего полярность усилителя (рис. 3.6,а) справедливы равенства

$$U_- = U1;$$

$$\frac{U_{out} - U_-}{R2} = \frac{U_-}{R1}.$$

Второе равенство составлено из тех соображений, что токи резисторов $R1, R2$ равны.

Из этих равенств можно вывести следующее уравнение:

$$U_{out} = \frac{R1 + R2}{R1} \cdot U1,$$

т.е. данная схема, обладая высоким входным сопротивлением, имеет коэффициент усиления, равный k :

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

Для инвертирующего полярность усилителя (рис. 3.6,б) справедливы равенства

$$U_- = U_+ = 0;$$

$$-\frac{U_{out}}{R2} = \frac{U1}{R1}.$$

Из этих равенств следует

$$U_{out} = -\left(\frac{R2}{R1}\right) \cdot U1,$$

т.е. коэффициент усиления этого усилителя равен $k = -\frac{R2}{R1}$.

Модель не инвертирующего масштабирующего усилителя представлена на рис. 3.7, а результаты моделирования усилителя – на рис. 3.8.

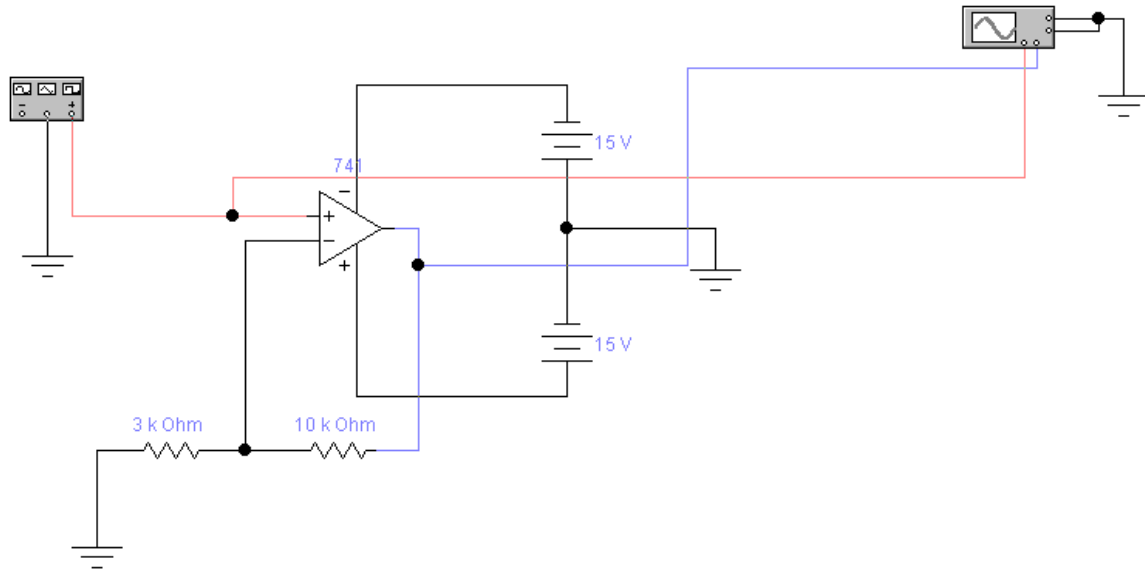


Рис. 3.7. Компьютерная модель не инвертирующего масштабирующего усилителя

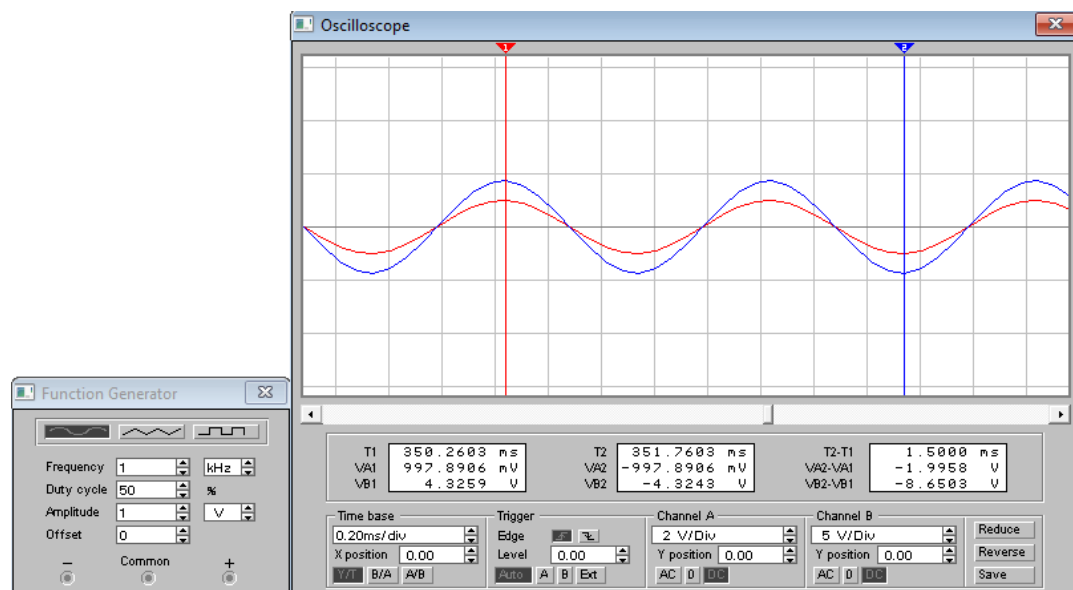


Рис. 3.8. Результаты моделирования не инвертирующего масштабирующего усилителя

Модель инвертирующего масштабирующего усилителя представлена на рис. 3.9, а результаты работы усилителя – на рис. 3.10.

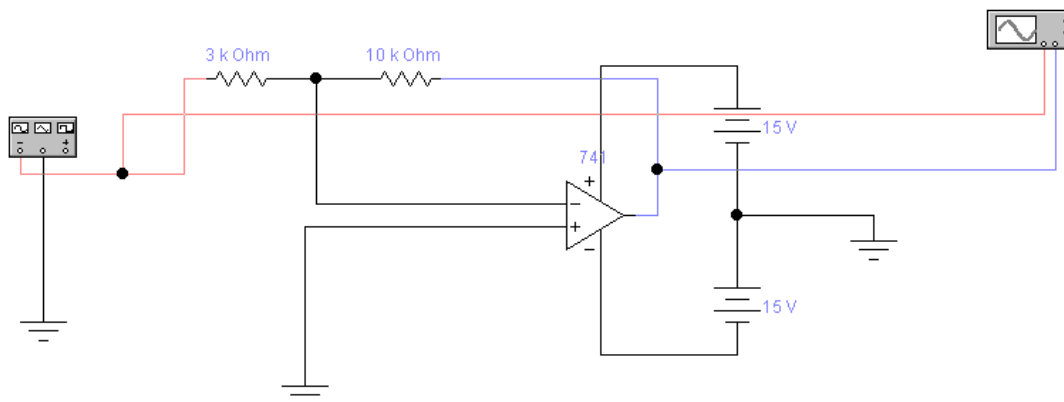


Рис. 3.9. Компьютерная модель инвертирующего масштабирующего усилителя

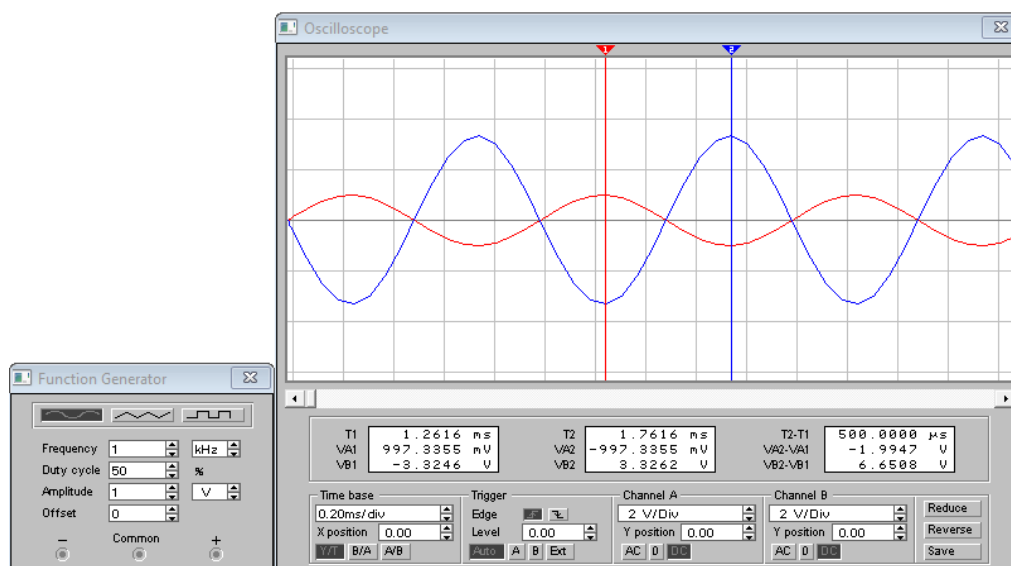


Рис. 3.10. Результаты моделирования инвертирующего масштабирующего усилителя

Операционные усилители находят широкое применение в аналоговых фильтрах, осуществляющих спектральное преобразование сигнала. Находят они применение и для нелинейных преобразований аналогового сигнала.

Порядок выполнения работы

1. Изучение особенностей работы повторителя

1.1. Изучение работы повторителя в линейном режиме работы

Соберите схему повторителя (см. рис. 3.2) и подайте на его вход синусоидальный сигнал с генератора. По осциллографу убедитесь, что повторитель выполняет свою функцию и при изменении частоты

и амплитуды входного сигнала. Измерьте период, частоту и амплитуду входного и выходного сигналов. Занесите результаты измерения и схему в отчет, сделайте выводы по наблюдаемым результатам.

1.2. Измерение временных интервалов нарастания и спада по выходному сигналу операционного усилителя

Подайте на вход повторителя прямоугольные импульсы с разной частотой. Наблюдайте на осциллографе работу повторителя. Фронты выходного сигнала окажутся пилообразными. Измерьте разность выходных уровней ΔU и временные интервалы нарастания и спада. Занесите результаты измерения и расчета в отчет, сделайте выводы по наблюдаемым результатам.

2. Изучение особенностей работы масштабирующих усилителей

Соберите усилитель по схеме рис. 3.7. Сопротивления резисторов выберите с учетом номера бригады из табл. 3.1.

Таблица 3.1

Варианты заданий для моделирования

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R1$, кОм	10	5,1	3	3	1,5	5,1	5,1	1,5	1	1,5
$R2$, кОм	20	10	5,1	10	5,1	20	13	6,1	5,1	3

Подключите каналы осциллографа к входу и выходу усилителя.

Подайте на вход усилителя гармонический сигнал с амплитудой, при которой не наблюдаются амплитудные искажения выходного сигнала (примерно 1 В), частоту выберите в диапазоне от 500 Гц до 5 кГц. Измерьте амплитуды входного и выходного сигналов и рассчитайте коэффициент усиления по напряжению собранной схемы. С учетом используемых резисторов рассчитайте теоретический коэффициент усиления и сравните результаты. Занесите результаты измерения, схему, временные диаграммы сигналов и расчета в отчет, сделайте выводы по наблюдаемым результатам. Обратите внимание на отсутствие инвертирования полярности сигнала усилителем.

Соберите усилитель по схеме рис. 3.9 и повторите измерения, выполненные в предыдущем пункте при примерно той же амплитуде входного сигнала и частоте. Обратите внимание на инвертирование полярности сигнала усилителем.

3. Изучение некоторых применений операционных усилителей

Соберите схему, предложенную на рис. 3.11.

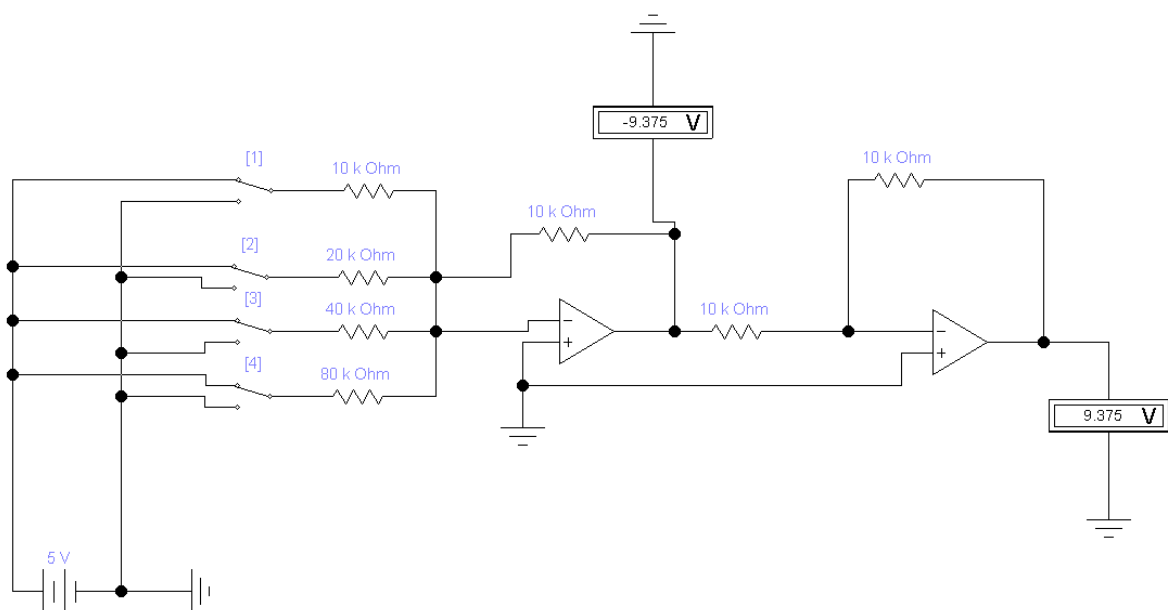


Рис. 3.11. Возможное схемное решение цифроаналогового преобразователя

Схема основана на применении резисторов, сопротивления которых взвешены по двоичному закону, на которые с помощью ключей [1]...[4] подается напряжение с общего провода (логический ноль) или с источника опорного напряжения $V_{ref} = 5\text{ В}$ (логическая единица).

В результате на выходе второго усилителя формируется пропорциональное двоичному коду, задаваемому положением ключей, выходное напряжение положительной полярности. Одновременно на выходе первого усилителя формируется равное этому напряжение с противоположной полярностью.

Определите, какой ключ коммутирует старший разряд и, перебирая все возможные состояния входных ключей, как это делается при составлении таблицы истинности булевой функции, снимите зависимость выходных напряжений от состояний ключей. Определите величину кванта и запишите в аналитическом виде полученную зависимость аналогового напряжения на выходе от формируемого кода, от состояний ключей, рассчитайте по полученной формуле выходное напряжение для каждого ключа.

Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель?
2. Что такое обратная связь?
3. Какими свойствами обладает отрицательная обратная связь?
4. Сколько входов у операционного усилителя, и чем они отличаются?

5. От чего зависит выходной сигнал операционного усилителя?
6. Какова величина коэффициента усиления ОУ?
7. В чем смысл применения повторителя сигнала, и какова его схема?
8. Каковы правила расчета линейных схем на ОУ?
9. Какие арифметические операции над входными аналоговыми сигналами могут выполнять предложенные схемы усилителей на ОУ?

Лабораторная работа № 4

ФИЛЬТРЫ

Цель работы: исследование схем пассивных и активных фильтров.

Общие сведения

Идеальный фильтр – это устройство, имеющее амплитудно-частотную характеристику, постоянную в определенной полосе пропускания, а в полосе подавления обеспечивается нулевой выходной сигнал (рис. 4.1).

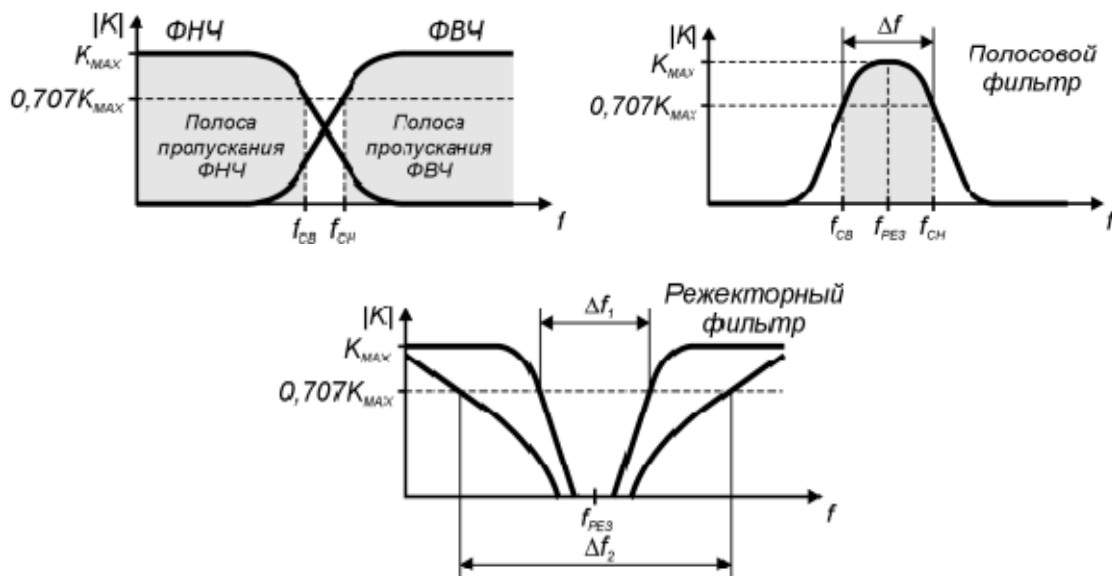


Рис. 4.1. Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ

Пассивные фильтры строятся на пассивных R , L , C элементах. Активные фильтры, помимо этого, содержат усилитель. Активные фильтры по сравнению с пассивными имеют ряд преимуществ.

1. В активном фильтре максимальный коэффициент передачи может быть больше единицы.

2. Передаточная характеристика активного фильтра практически не зависит от нагрузки, на которую работает фильтр, и от сопротивления источника входного сигнала.

По применению фильтры делятся на фильтры нижних частот (ФНЧ), (пропускают нижние частоты), фильтры верхних частот (ФВЧ) (пропускают верхние частоты), полосовые (ПФ) и режекторные фильтры (РФ).

Фильтры характеризуются следующими параметрами:

– f_c – частота среза, определяется на уровне $0,707 K_{max}$;

– f_p – резонансная частота;
– $\Delta f = (f_v - f_n)$ – полоса пропускаемых или вырезаемых частот, определяется на уровне 0,707 K_{max} .

Добротность $Q = f_p / \Delta f$ характеризует крутизну характеристики фильтра.

Фильтры бывают 1, 2, 3, 4 и т.д. порядков. Порядок фильтра определяется порядком дифференциального уравнения, которым описывается фильтр, или наличием реактивных элементов (два конденсатора в RC-фильтре – фильтр второго порядка).

Фильтрам предъявляются требования по равномерности усиления в полосе пропускания и к крутизне спада вне полосы пропускания.

На рис. 4.2 приведена модель схемы для исследования пассивного ПФ, которая носит название моста Вина.

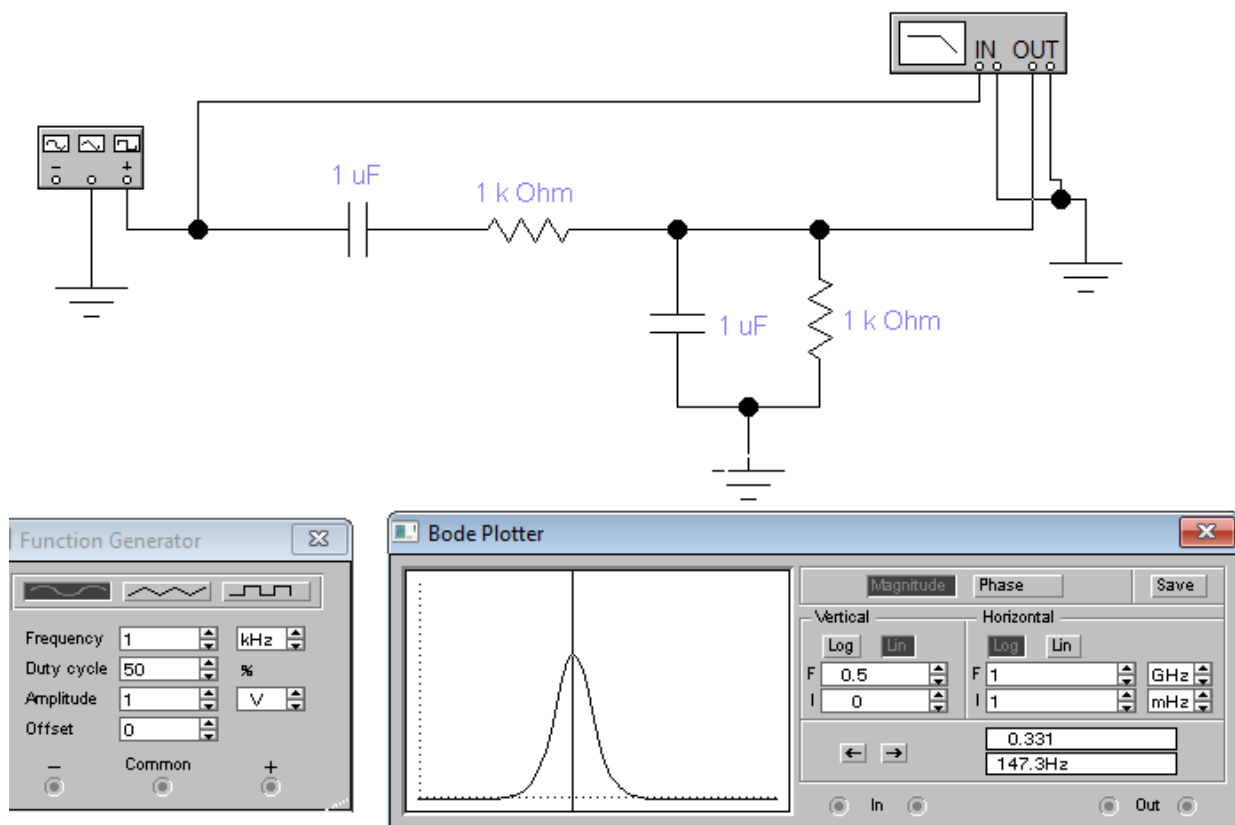


Рис. 4.2. Модель и АЧХ моста Вина

При $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, $f_{рез} = 1/2\pi RC$.

На рис. 4.3 приведена модель схемы для исследования режекторного фильтра-пробки с двойным T -контуром. Вырезаемая частота $f_0 = 1/2\pi RC$ при соотношениях $C_1 = C_2 = C$ и $C_3 = 2C$ и $R_1 = R_2 = R$ и $R_3 = R/2$.

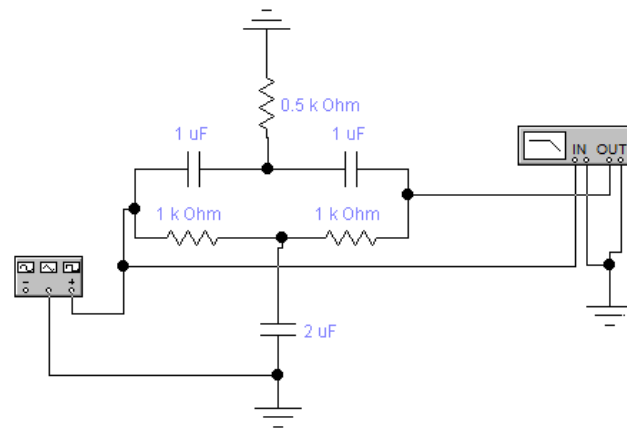
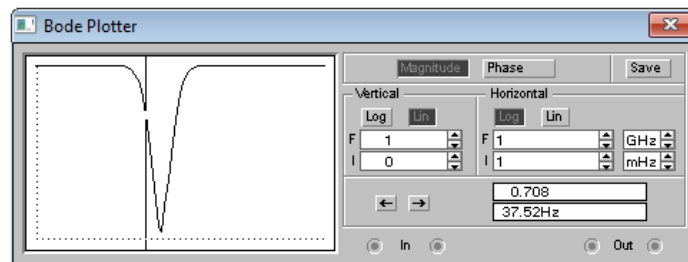


Рис. 4.3. Модель для исследования и АЧХ режекторного фильтра

Модель для исследования активного ФНЧ приведена на рис. 4.4.

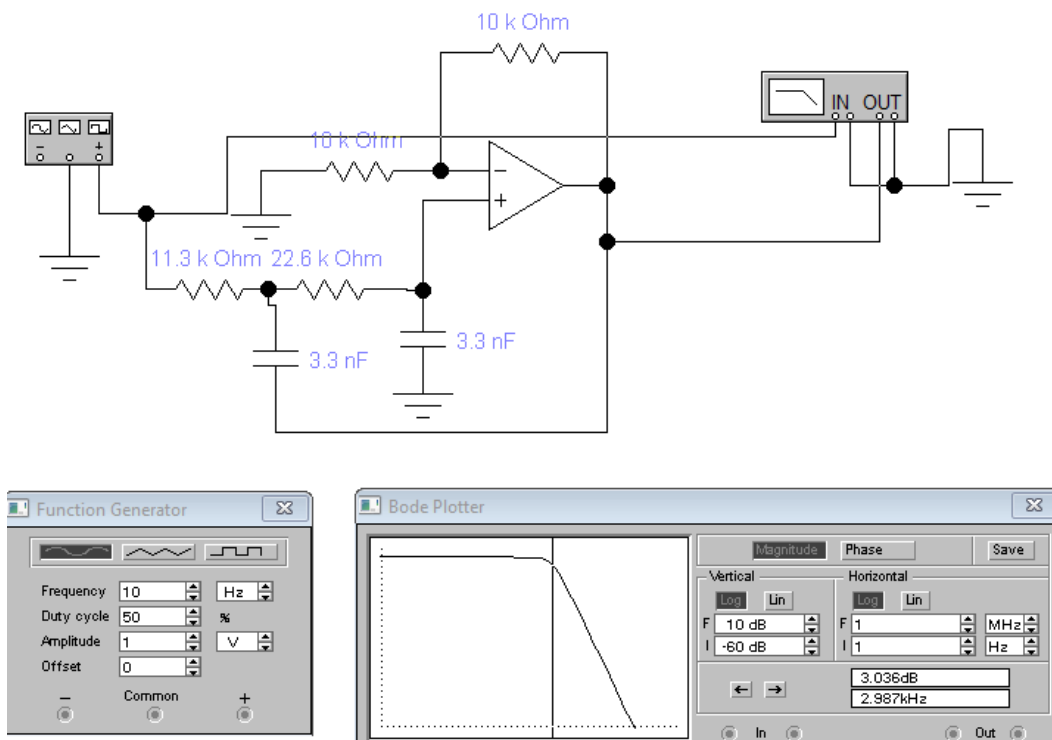


Рис. 4.4. Модель и результаты моделирования активного ФНЧ

Варианты заданий для моделирования пассивных фильтров приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты заданий для моделирования пассивных ПФ и РФ

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C , нФ	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
R , кОм	68	30	47	51	75	20	30	32	33	10

Варианты заданий для моделирования активных фильтров представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Варианты заданий для расчета и моделирования активных ФНЧ и ФВЧ

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_c , кГц	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	1	3	5	10
C , нФ										

При выборе $C_1 = C_2 = C$ емкость конденсатора следует определить по формуле

$$C = 10/f_c,$$

если f_c в [кГц], то C получается в [нФ].

При этом для фильтра Баттерворта, обладающего максимально равномерной характеристикой в полосе пропускания, $R_1 = 1/(1,41 \cdot 2\pi C f_c) = 11,3$ кОм, а $R_2 = 2R_1 = 22,6$ кОм. Коэффициент передачи активного фильтра должен быть равен двум. Для этого резисторы в ООС фильтра нужно выбрать одинаковыми по номиналу.

Порядок выполнения работы

1. Исследование полосового фильтра

Соберите компьютерную модель полосового фильтра, изображенного на рис. 4.2. Задайте номиналы резисторов и конденсатором в соответствии с номером варианта из табл. 4.1. Рассчитайте резонансную частоту фильтра.

Снимите АЧХ фильтра с помощью измерителя АЧХ. Для этого выберите линейный масштаб Lin по оси Y и установите максимальное значение коэффициента передачи $F = 0,5$. Определите резонансную частоту, полосу пропускания фильтра и максимальный коэффициент усиления фильтра с помощью визира (ось Y). Полоса пропускания определяется по уровню падения коэффициента усиления до $0,707 K_m$, где K_m – максимальный коэффициент передачи фильтра при измерении в линейном режиме представления АЧХ.

Не меняя положения визира, перейдите на измерение фазочастотной характеристики фильтра, перейдя из режима *Magnitude* в режим *Phase* для измерения. Определите фазовый сдвиг выходного сигнала на резонансной частоте, на низкой частоте и на высокой частоте.

Сравните расчетное и экспериментальное значение резонансной частоты. Рассчитайте по результатам полученных измерений полосу пропускания и добротность фильтра (в логарифмическом масштабе этот уровень соответствует изменению коэффициента передачи на 3 децибела).

Уменьшите емкости конденсатора фильтра в 2 раза. Сравните АЧХ фильтров и сделайте вывод.

2. Исследование режекторного фильтра

Соберите компьютерную модель режекторного (РФ) фильтра, изображенного на рис. 4.3. Задайте номиналы элементов фильтра в соответствии с табл. 4.1 и рекомендациями по выбору.

Рассчитайте частоту подавления. Снимите АЧХ фильтра в линейном масштабе при $F = 1$. Определите вырезаемую частоту и полосу подавления РФ с помощью визира. Какой коэффициент передачи у фильтра вне полосы подавления?

Снимите ФЧХ режекторного фильтра.

Сравните расчетное и экспериментальное значение резонансной частоты. Рассчитайте по результатам полученных измерений полосу пропускания и добротность фильтра.

Проведите измерение фазочастотной характеристики.

3. Исследование активных фильтров нижних и верхних частот

1. Соберите компьютерную модель ФНЧ второго порядка, изображенную на рис. 4.4. С помощью осциллографа определите коэффициент передачи схемы в полосе пропускания. Сравните его с расчетным. Измерителем АЧХ измерьте полосу пропускания ФНЧ и зависимости коэффициентов передачи исследуемых схем от частоты в логарифмическом (Log) масштабе и поместите результаты измерений в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ и ФВЧ

f , Гц	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
$K_{\text{ФНЧ}}$, дБ							
$K_{\text{ФВЧ}}$, дБ							

Сравните полученные характеристики для фильтров ФНЧ и ФВЧ по полосе пропускания и по крутизне спада АЧХ. Частоту среза АЧХ измерьте в логарифмическом масштабе (в логарифмическом масштабе

она измеряется на уровне, соответствующем изменению коэффициента передачи на 3 дБ ниже коэффициента фильтра в полосе пропускания).

Крутизну изменения логарифмической частотной характеристики в дБ/дек можно определить, измерив коэффициент передачи на линейном участке спада характеристики фильтра, выбрав первую точку в начале изменения частотной характеристики, а затем на частоте в 10 раз больше (меньше – для ФВЧ) первоначальной.

Измените емкости всех конденсаторов в 2 раза. Измерьте АЧХ и сравните их для каждого фильтра. Отметьте в отчете как изменились полосы пропускания фильтров.

Переведите измеритель в режим измерения фазовой характеристики. Измерьте фазовый сдвиг на частоте среза, низкой и высокой частотах.

2. Соберите компьютерную модель ФВЧ, поменяв местами резисторы и конденсаторы. Повторите исследования, проведенные в пункте 1.

Контрольные вопросы

1. На какой частоте мост Вина имеет максимальный коэффициент передачи, и каков он?

2. Каков коэффициент передачи моста Вина на нулевой частоте и при стремлении частоты к бесконечности?

3. На какой частоте двойной Т-образный мост имеет минимальный коэффициент передачи?

4. Каков коэффициент передачи двойного Т-образного моста на нулевой частоте и при стремлении частоты к бесконечности?

5. Каков коэффициент передачи предложенных активных фильтров в полосе пропускания?

6. От каких резисторов зависит граничная частота активных фильтров и коэффициент передачи?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехника, электроника и схемотехника : метод. указания к лабораторным занятиям и самостоятельной работе : в 2 ч. / сост.: Л. А. Брякин, А. С. Бычков. Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. Ч. 2. 64 с.

2. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл ; пер. с англ. М. : Бином, 2014.

Учебное издание

Электроника

Составители:

Пащенко Валентина Васильевна,
Никишин Кирилл Игоревич

Редактор *В. В. Чувашова*
Технический редактор *Н. В. Иванова*
Компьютерная верстка *Н. В. Ивановой*

Подписано в печать 21.07.2022.

Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 2,09.

Тираж 35. Заказ № 416.

Издательство ПГУ

440026, Пенза, Красная, 40.

Тел.: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru

Вниманию авторов!

Издательство ПГУ выпускает учебную, научную и художественную литературу, презентационную и акцидентную продукцию, а также полноцветные юбилейные и мемориальные издания в соответствии с ГОСТ 7.60–2003.

Издательство ПГУ принимает к изданию рукописи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий **2003 и выше**. Формат – А4, основной шрифт – Times New Roman, 14–16 pt через одинарный интервал (минимальный размер шрифта в таблицах и сносках – 12,5 pt). Тип файла в электронном виде – doc, docx.

Работа должна содержать индекс УДК, аннотацию.

Аннотация (ГОСТ 7.86–2003, ГОСТ 7.9–1995) включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели работы и ее результаты. В аннотации указывают, что нового несет в себе данный документ в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению. Аннотация может включать сведения о достоинствах произведения. Текст аннотации начинают фразой, в которой сформулирована главная тема документа. Заканчивается аннотация читательским адресом.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте после ссылки на них (растровые рисунки предоставляются в виде отдельных файлов в формате jpg, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt. Рисунки должны быть доступны для правки!). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями, на все рисунки и таблицы в тексте должны быть ссылки.

Формулы в тексте выполняются только в редакторе формул **MathType версия 5.0** и выше. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования необходимо соблюдать и в рисунках.

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. Требования к оформлению списка литературы на русские и иностранные источники (ГОСТ Р 7.0.5–2008): для книг – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; для журнальных статей, сборников трудов – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, контактные телефоны.

Контакты Издательства ПГУ: т.: (8412) 66-60-49, 66-67-77, e-mail: iic@pnzgu.ru



