

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

И. П. Ефимов

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Ульяновск
УлГТУ
2016

УДК 62.001.63:621.37(075)
ББК 30.2-5-05я7
Е 91

Рецензенты:

Кандидат технических наук, начальник расчетно-теоретического отдела ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»

Сорокин М. Ю.;

Начальник научно-исследовательского отдела ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»

Семенов А. В.

Утверждено редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Е 91

Ефимов Иван Петрович

Электроника: учебное пособие / И. П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 195 с.

ISBN 978-5-9795-1

Учебное пособие предназначено для выполнения лабораторных работ бакалаврами в рамках дисциплин «Системы автоматизированного проектирования в приборостроении» и «Системы автоматизированного проектирования» по направлениям «Приборостроение» и «Информационные системы». Изложены основные теоретические сведения, приведены методики проведения экспериментальных исследований и обработки результатов моделирования в среде Micro-Cap, представлены индивидуальные задания для выполнения лабораторных работ.

Приведенный материал может быть использован для закрепления материала лекционных занятий, самостоятельной работы студентов, подготовки к зачетам, экзаменам, а также при написании курсовых и выпускных квалификационных работ.

Подготовлено на кафедре «Измерительно-вычислительные комплексы» УлГТУ.

УДК 62.001.63:621.37(075)
ББК 30.2-5-5я7

ISBN 978-5-9795-1

© Ефимов И. П., 2016
© Оформление. УлГТУ, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ В СИМУЛЯТОРЕ MICRO-CAP	6
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ MICRO-CAP	25
Лабораторная работа №1. Исследование электрических цепей на постоянном токе	25
Лабораторная работа №2. Исследование электрических цепей на переменном токе.....	45
Лабораторная работа №3. Исследование пассивных электронных фильтров	69
Лабораторная работа №4. Исследование полупроводниковых диодов	87
Лабораторная работа №5. Исследование биполярных транзисторов	111
Лабораторная работа №6. Исследование усилительных каскадов с фиксированным смещением на постоянном токе	131
Лабораторная работа №7. Исследование усилительных каскадов с автоматическим смещением на постоянном токе	150
Лабораторная работа №8. Исследование усилителей постоянного тока на ОУ.....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	194
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	195

ВВЕДЕНИЕ

В процессе изучения электроники и схемотехники значительная часть аудиторной нагрузки отводится на выполнение лабораторных и практических работ. В ходе выполнения лабораторных работ студенты собирают различные электронные устройства, проводят их исследования, строят модели электронных схем в программах схемотехнического моделирования и изучают их работу, используя данные симуляторы. Практические работы, как правило, посвящаются расчетам и элементам проектирования электронных устройств или их функциональных узлов.

Настоящее учебное пособие предназначено для методического обеспечения подготовки и выполнения лабораторных работ студентами: второго и третьего курсов направления «Приборостроение» по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»; третьего курса направления «Информационные системы» по дисциплине «Схемотехника».

Лабораторные работы выполняются с использованием программы Micro-Cap. Лабораторные работы, включенные в пособие, ориентируют студентов на: изучение необходимого минимального объема теоретических сведений; построение исследуемых электронных устройств в графическом редакторе симулятора Micro-Cap; выполнение исследований электронных схем и обработку результатов моделирования; аналитический расчет электрических параметров цепей постоянного и переменного тока с использованием приведенной теоретической справки; анализ полученных экспериментальных данных, сравнение расчетных и экспериментальных значений, составление выводов и заключений по результатам проведенных исследований.

Таким образом, лабораторные работы, включенные в пособие, содержат и элементы практических работ в части расчетов электронных схем. В ряде работ имеются задания по настройке и регулировке электронных устройств. Например, в лабораторных работах №6 «Исследование усилительных каскадов с фиксированным смещением на постоянном токе» и №7 «Исследование усилительных каскадов с автоматическим смещением на постоянном токе» предусмотрены задания по регулировке (установке режима по постоянному току) усилительных резисторных каскадов, реализованных на биполярных транзисторах.

В первой главе пособия содержатся необходимые сведения по моделированию электронных схем в программе Micro-Cap: описание интерфейса программы; работа с базовыми моделями электро-радиоэлементов; построение электронных схем в графическом редакторе симулятора; моделирование устройств на постоянном и переменном токе; интерпретация результатов моделирования.

Пособие может быть полезно студентам: третьего курса направления «Приборостроение» при изучении дисциплины «Системы автоматизированного проектирования в приборостроении»; четвертого курса направления «Информационные системы» при изучении дисциплины «Системы автоматизированного проектирования». Также материалы пособия могут оказать помощь студентам обоих направлений при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ В СИМУЛЯТОРЕ MICRO-CAP

1. О программе

Micro-cap – программа компании Spectrums Software для аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей. В данном пособии рассматриваются возможности бесплатной версии Micro-cap 11.0.1.5 Evaluation Version для обучения.

2. Интерфейс редактора

Интерфейс редактора состоит из следующих элементов:

1. Полоса меню;
2. Панель инструментов;
3. Рабочая область.

Элементы отображены на рис. 1.

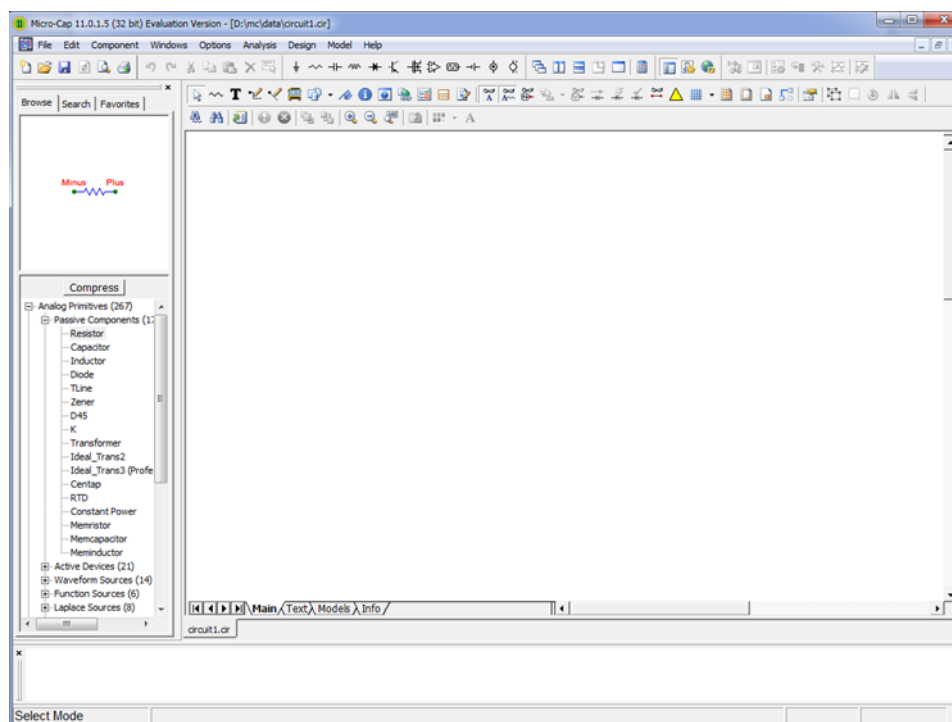


Рис. 1. Основные элементы редактора Micro-Cap

Полоса меню состоит из следующих пунктов:

1. File – меню работы с файлами;
2. Edit – меню редактирования;
3. Component – меню выбора компонентов схемы;
4. Windows – меню работы с окнами;
5. Options – меню настроек программы
6. Analysis – меню анализа схем;
7. Design – меню работы с фильтрами;
8. Model – меню работы с моделями;
9. Help – справка.

Полоса меню отображена на рис. 2.

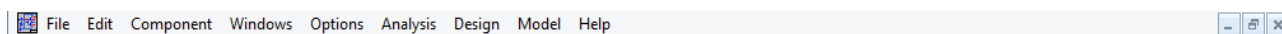


Рис. 2. Полоса меню

Панель инструментов содержит группы наиболее часто используемых пунктов из меню работы с файлами, редактирования, компонентов, работы с окнами, настроек и анализа схем (рис. 3).



Рис. 3. Панель инструментов

Рабочая область состоит из редактора схемы и дерева выбора компонентов.

3. Построение схем

3.1. Основные принципы построения схем

Для добавления элемента на схему необходимо щелчком левой кнопки мыши выбрать его в дереве компонентов, после чего курсор примет внешний вид выбранного элемента, и разместить его в

рабочей области повторным щелчком. Для поворота элемента необходимо при зажатой левой кнопки мыши щелкнуть на правую. После этого отобразится окно выбора параметров элемента (рис. 4). Значение величины элемента указывается в пункте «Value».

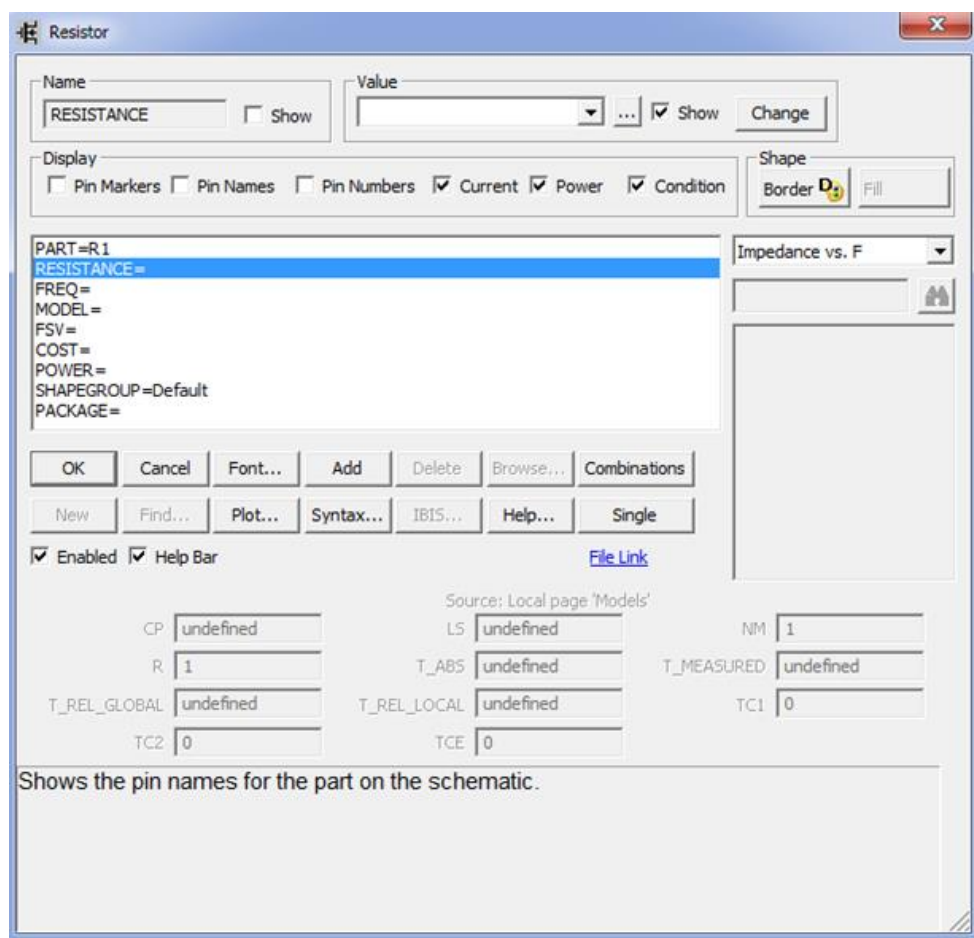


Рис. 4. Окно выбора параметров элемента

Для соединения элементов используются инструменты «Wire Mode» и «Diagonal Wire Mode» (рис. 5).



Рис. 5. Инструменты соединения элементов

Первый инструмент проводит соединения только под прямым углом, второй – по диагонали. Создание соединений осуществляется перемещением курсора по рабочему полю с зажатой левой кнопкой мыши.

3.2. Основные электро-радиоэлементы

3.2.1. Резисторы

Положение резистора (Resistor) в дереве элементов отображено на рис. 6.

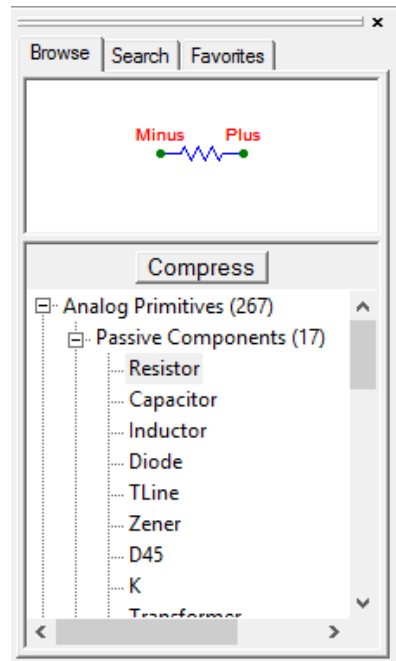


Рис. 6. Выбор резистора в дереве компонентов

Сопротивление резистора задается параметром «RESISTANCE» (рис. 7).

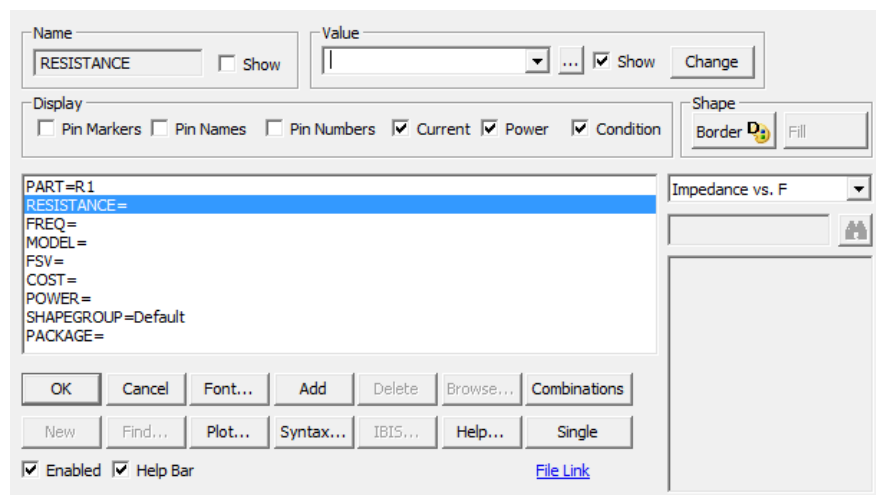


Рис. 7. Задание сопротивления резистора

3.2.2. Конденсаторы

Положение конденсатора (Capacitor) в дереве элементов отображено на рис. 8.

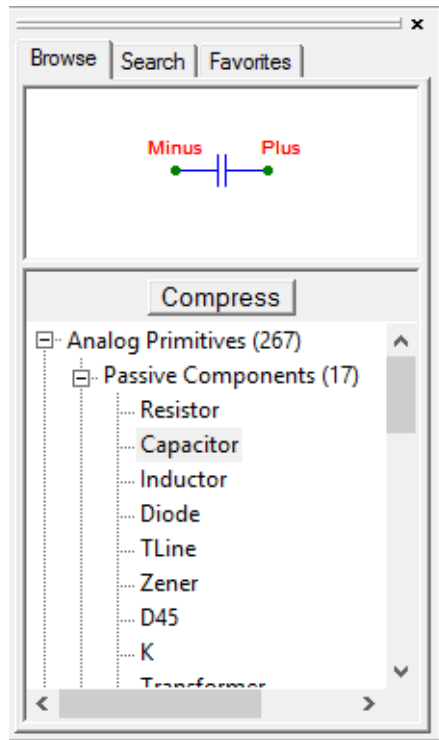


Рис. 8. Выбор конденсатора в дереве компонентов

Емкость конденсатора задается параметром «CAPACITANCE» (рис. 9).

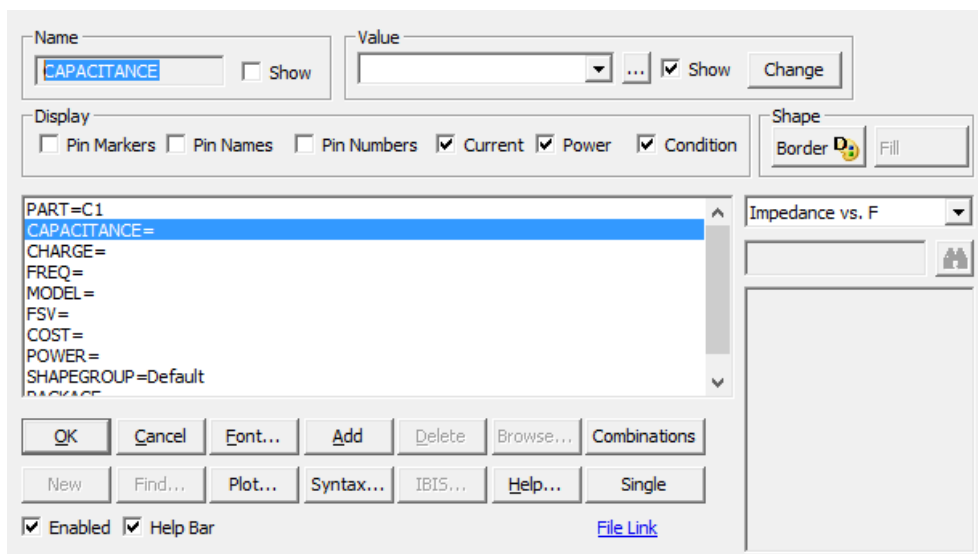


Рис. 9. Задание емкости конденсатора

3.2.3. Катушки индуктивности

Положение катушки индуктивности (Inductor) в дереве элементов отображено на рис. 10.

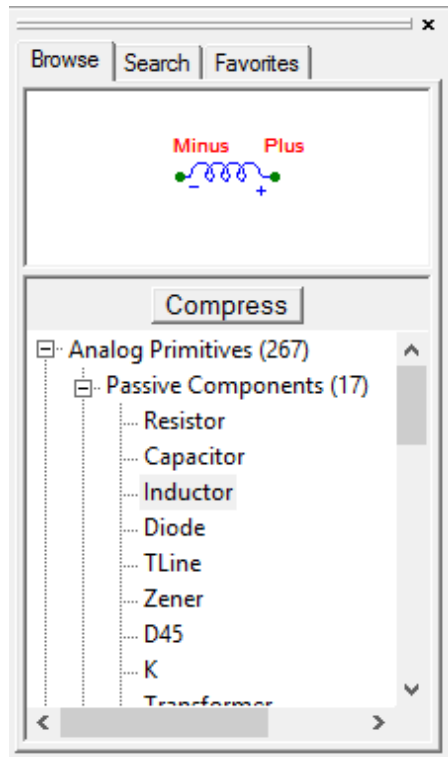


Рис. 10. Выбор катушки индуктивности в дереве компонентов

Индуктивность катушки задается параметром «INDUCTANCE» (рис. 11).

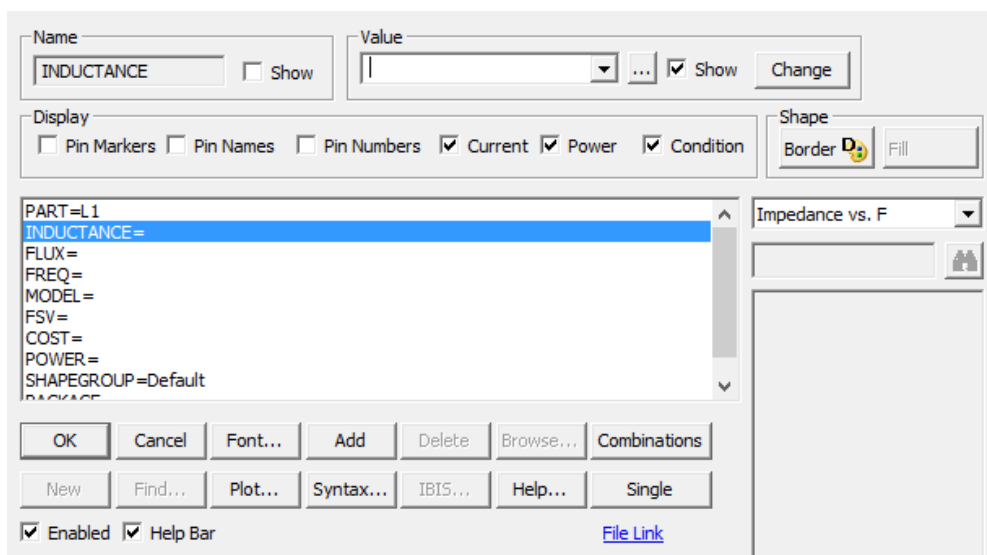


Рис. 11. Задание индуктивности катушки

3.2.4. Диоды

Положение диода (Diode) в дереве элементов отображено на рис. 12.

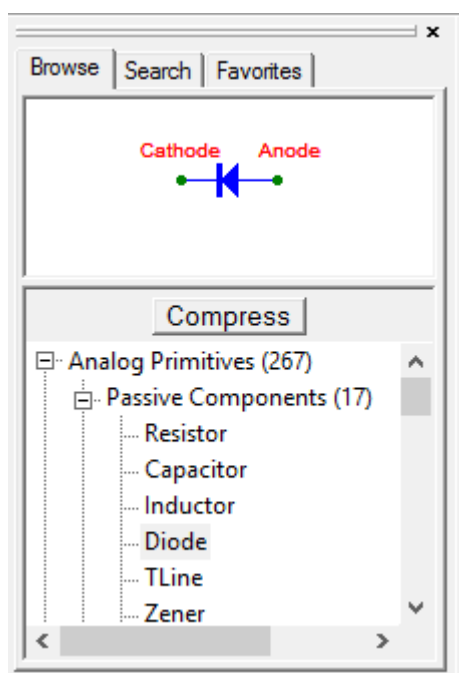


Рис. 12. Выбор диода в дереве компонентов

Модель диода задается параметром «MODEL» (рис. 13).

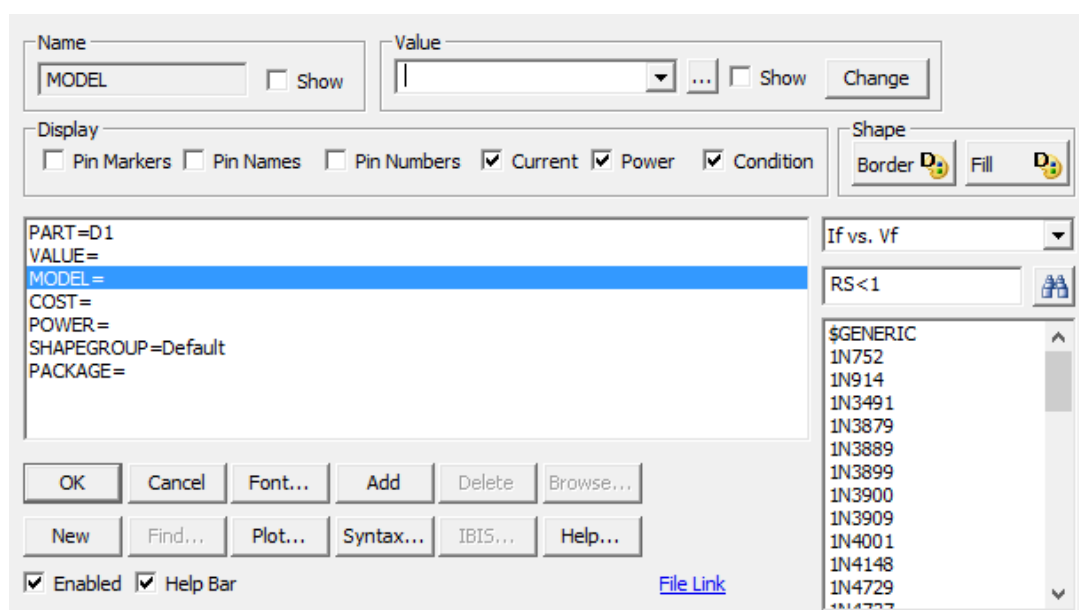


Рис. 13. Задание модели диода

3.2.5. Стабитроны

Положение стабилитрона (Zener) в дереве элементов отображено на рис. 14.

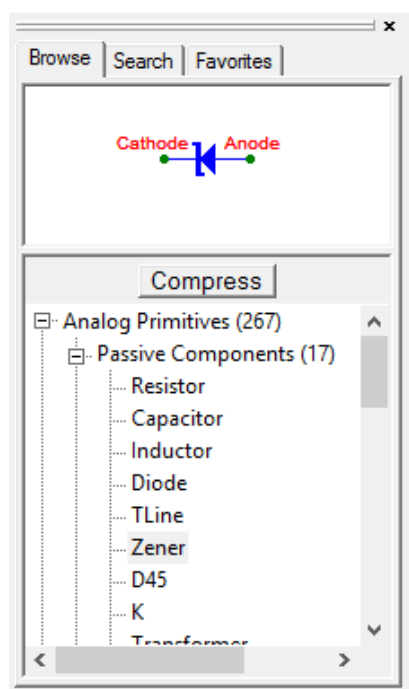


Рис. 14. Выбор стабилитрона в дереве компонентов

Модель стабилитрона задается параметром «MODEL» (рис. 15).

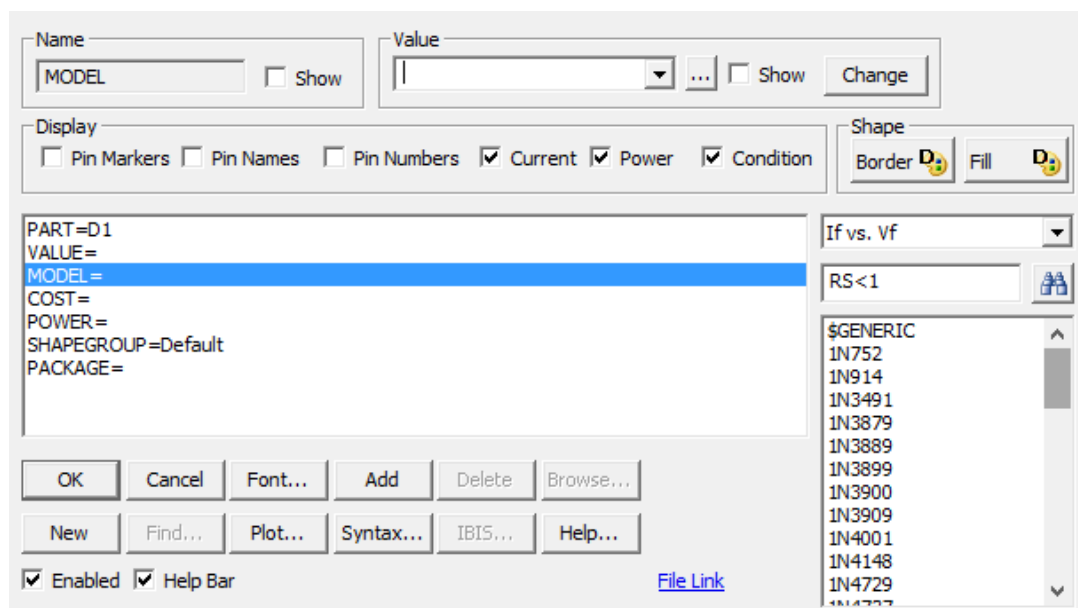


Рис. 15. Задание модели стабилитрона

3.2.6. Транзисторы

Положение транзистора (NPN или PNP) в дереве элементов отображено на рис. 16.

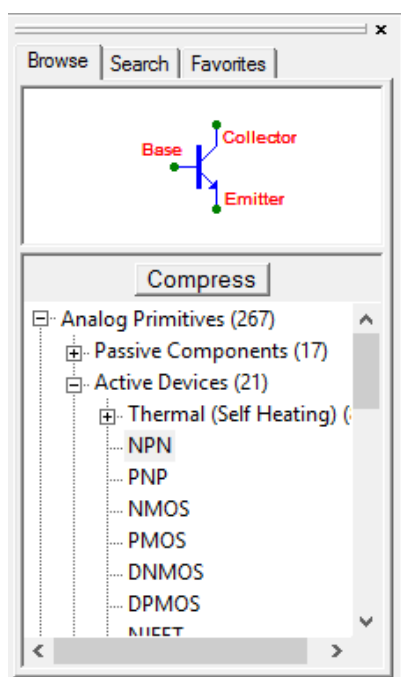


Рис. 16. Выбор транзистора в дереве компонентов

Модель транзистора задается параметром «MODEL» (рис. 17).

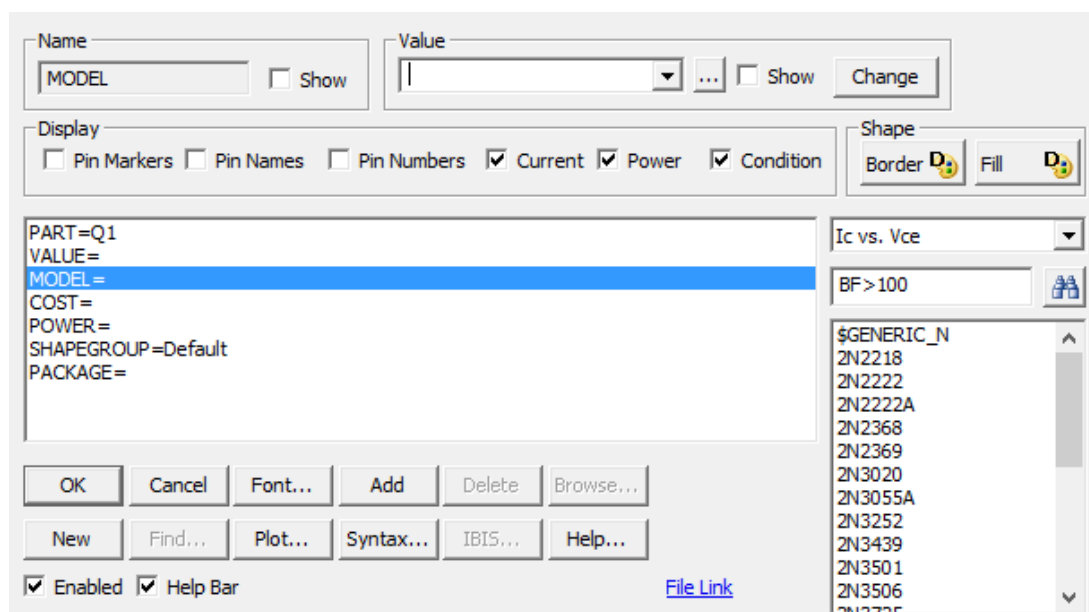


Рис. 17. Задание модели транзистора

3.2.7. Операционные усилители

Положение операционного усилителя (Opamp) в дереве элементов отображено на рис. 18.

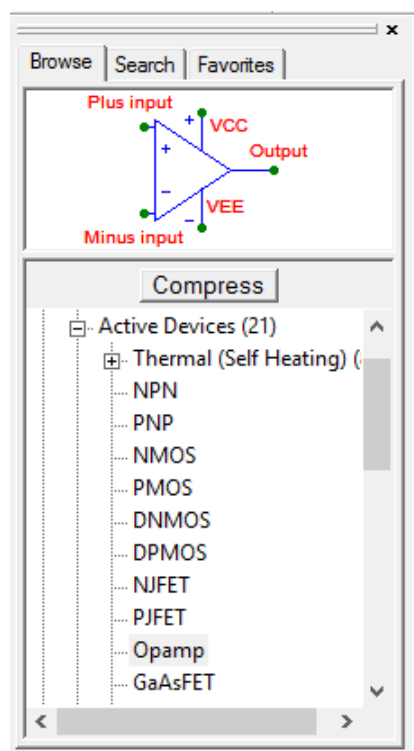


Рис. 18. Выбор операционного усилителя в дереве компонентов

Модель операционного усилителя задается параметром «MODEL» (рис. 19).

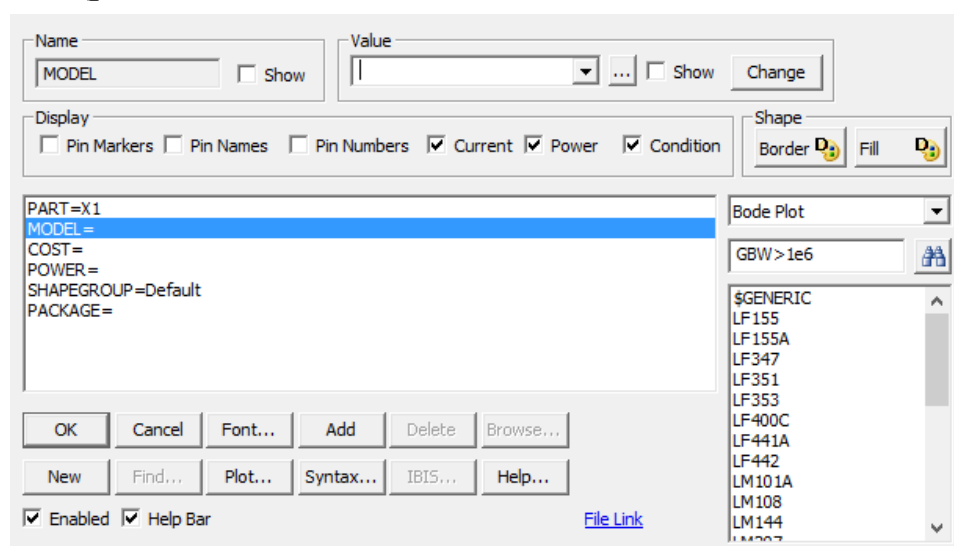


Рис. 19. Задание модели операционного усилителя

3.3. Источники

3.3.1. Источник постоянного напряжения

Положение Источника постоянного напряжения (Battery) в дереве элементов отображено на рис. 20.

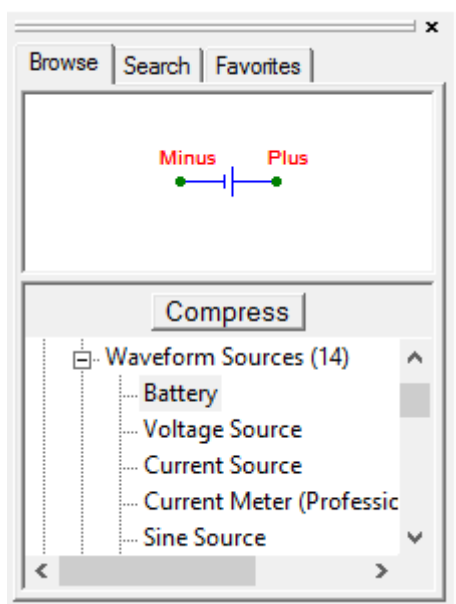


Рис. 20. Выбор источника постоянного напряжения в дереве компонентов

Значение напряжения задается параметром «VALUE» (рис. 21).

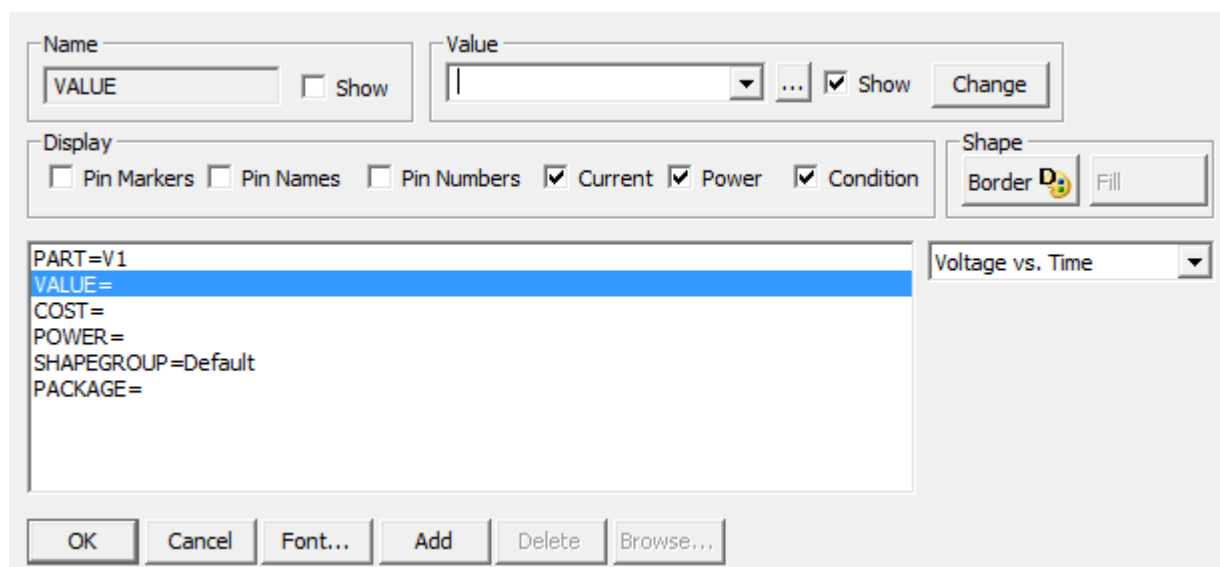


Рис. 21. Задание постоянного напряжения источника

3.3.2. Источник импульсного напряжения

Положение Источника импульсного напряжения (Pulse Source) в дереве элементов отображено на рис. 22.

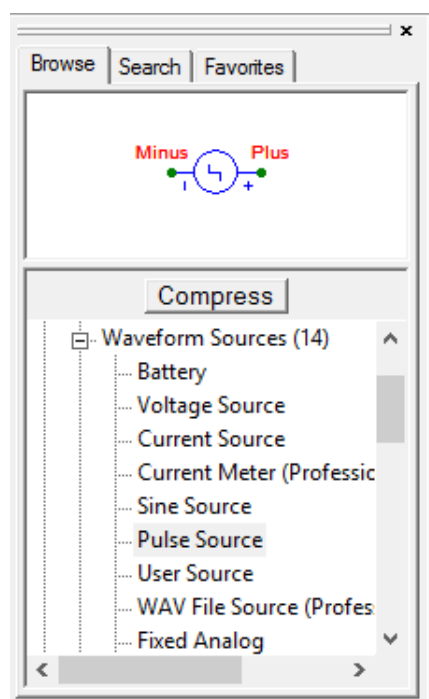


Рис. 22. Выбор импульсного источника напряжения в дереве компонентов

Модель источника напряжения задается параметром «MODEL» (рис. 23).

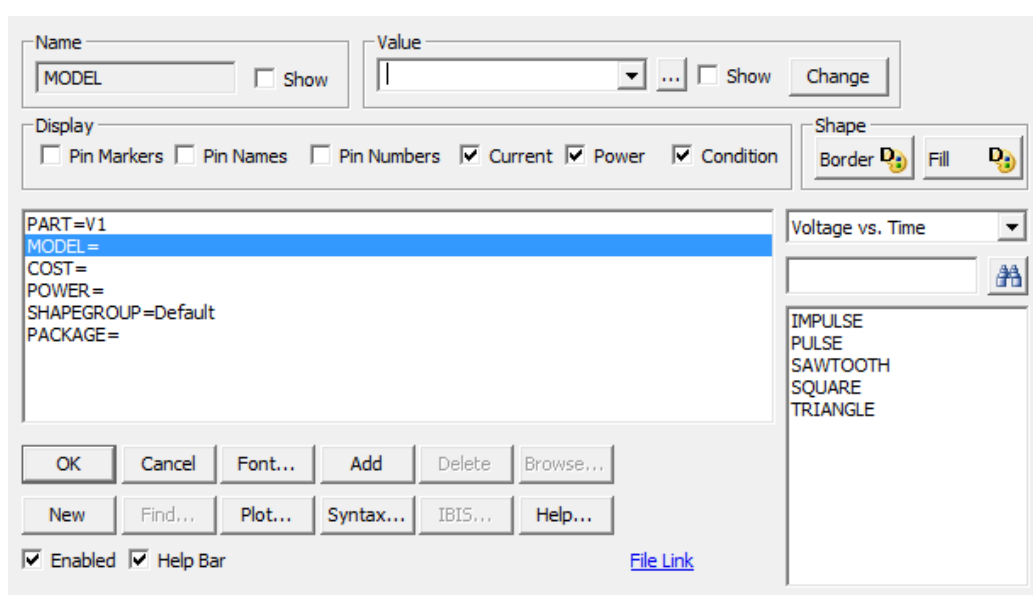


Рис. 23. Задание модели импульсного источника напряжения

3.4. Пример создания схемы

Для создания простейшей схемы необходимо:

1. Вызвать диалоговое окно создания нового файла через меню «File» (рис. 24);

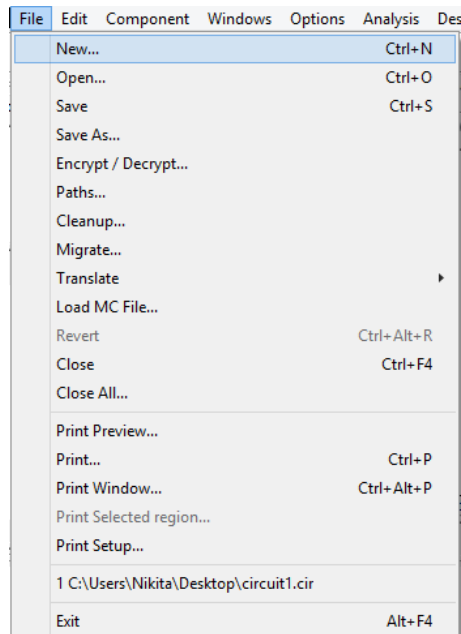


Рис. 24. Вызов диалогового окна создания файла

2. Выбрать пункт файла схемы (Schematic File) с расширением .cir (рис. 25);

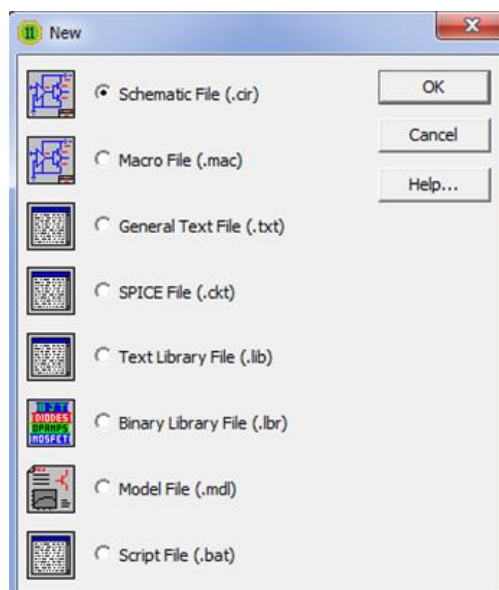


Рис. 25. Диалоговое окно создания файла

3. Разместить на схеме все необходимые элементы (рис. 26);

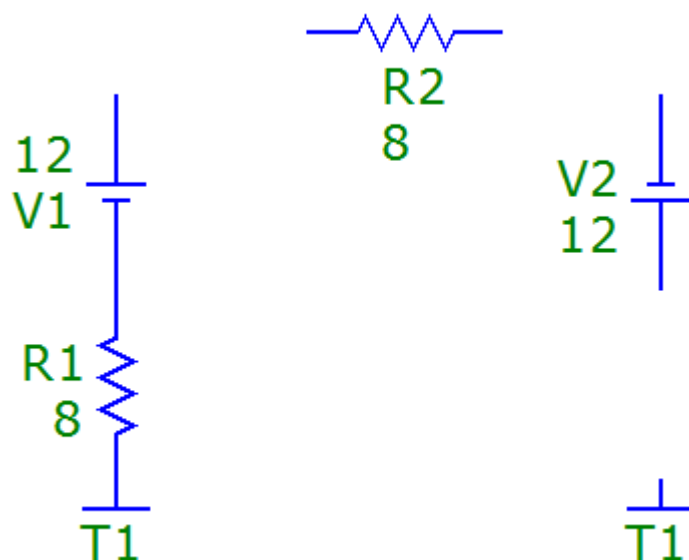


Рис. 26. Элементы на схеме

4. Соединить их инструментом «Wire Mode» (рис. 27);

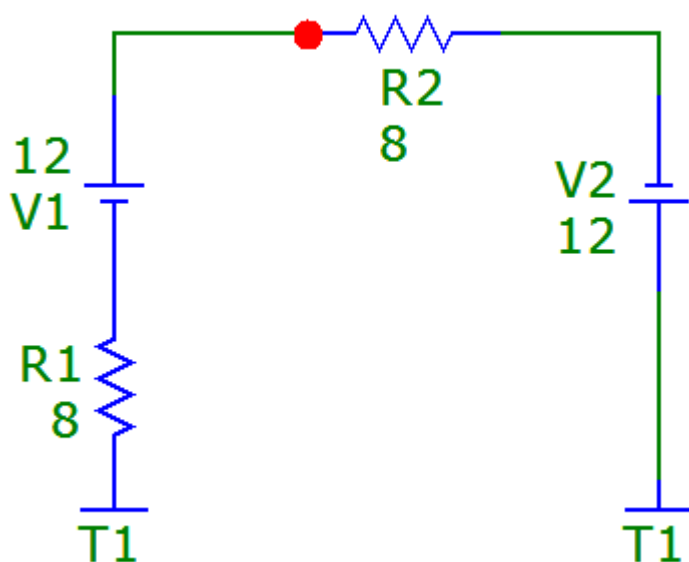


Рис. 27. Готовая схема

5. Для сохранения схемы используйте пункт меню «Save» (рис. 28).

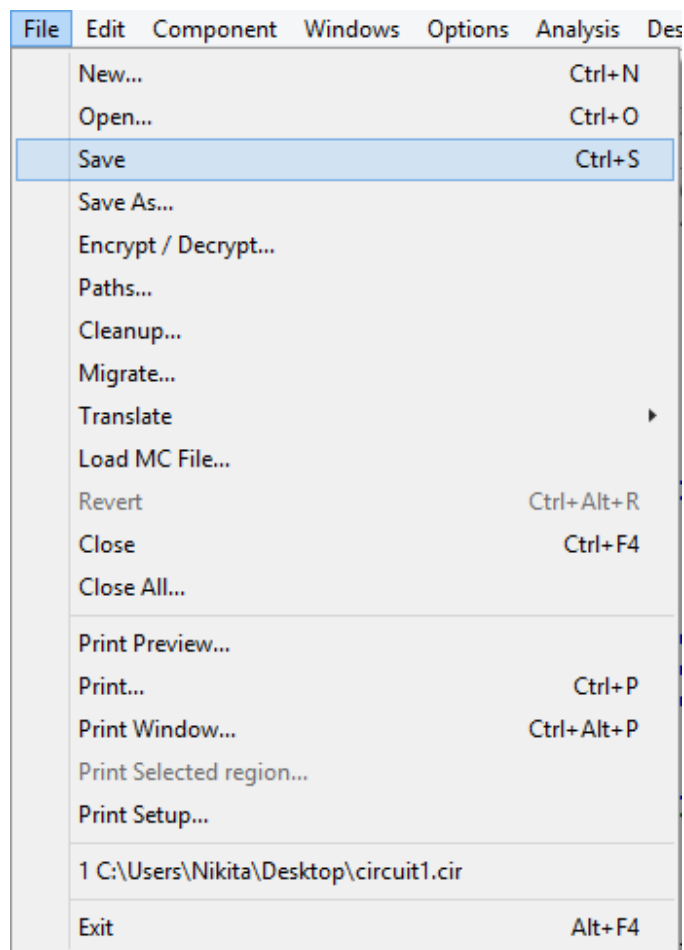


Рис. 28. Сохранение схемы

4. Динамический анализ режима по постоянному току (Dynamic DC)

Анализ Dynamic DC – режим, при котором пользователь может менять характеристики элементов схемы, а система динамически пересчитывает результат и отображает его.

Вы можете запустить этот режим комбинацией «Alt+4» или через полосу меню (рис. 29).

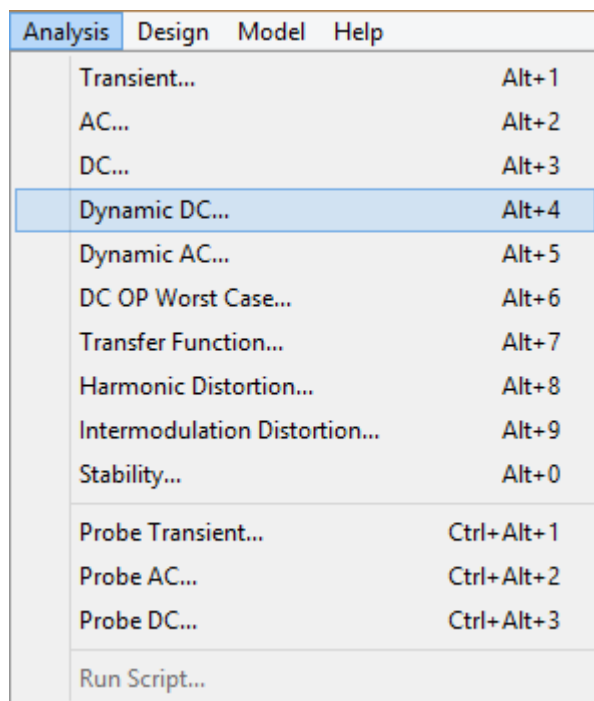


Рис. 29. Пункт Dynamic DC

Для отображения текущих характеристик схемы используются следующие переключатели (рис. 30):

1. Node Voltages – отображение напряжений в узлах схемы;
2. Currents – отображение токов выводов компонентов;
3. Powers – отображение мощностей, рассеиваемых на компонентах;
4. Conditions – отображение состояний полупроводниковых диодов.



Рис. 30. Переключатели отображения характеристик схемы

После запуска режима Dynamic DC появляется окно Dynamic DC Limits, изображенное на рис. 31.

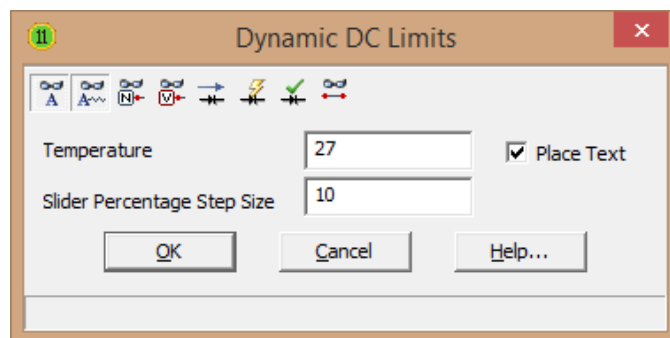


Рис. 31. Окно Dynamic DC Limits

Окно содержит полосу кнопок индикации, отвечающих за отображение текущих характеристик схемы (рис. 32):

1. Показ текста на схеме;
2. Показ позиционных обозначений и номиналов компонентов;
3. Номера узлов;
4. Напряжения аналоговых узлов;
5. Токи выводов компонентов;
6. Мощности, рассеиваемые на компонентах;
7. Состояния полупроводниковых диодов;
8. Показ соединений между выводами компонентов.

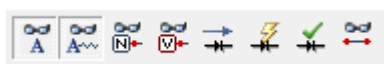


Рис. 32. Полоска кнопок индикации

Также окно содержит текстовые поля, отвечающие за температуру, при которой выполняется анализ и процентное

изменение величины, компонента при нажатии клавиш «Вверх» и «Вниз» (рис. 33):

Temperature	27
Slider Percentage Step Size	10

Рис. 33. Текстовые поля Dynamic DC Limits

После задания вышеперечисленных настроек вы можете отслеживать состояние схемы при динамическом изменении ее характеристик.

5. Динамический анализ режима по переменному току (Dynamic AC)

Режим Dynamic AC позволяет проводить расчет малосигнальных передаточных функций при ряде значений частот и изменении параметров схемы.

После запуска режима Dynamic AC появляется окно Dynamic AC Limits, изображенное на рис. 34.

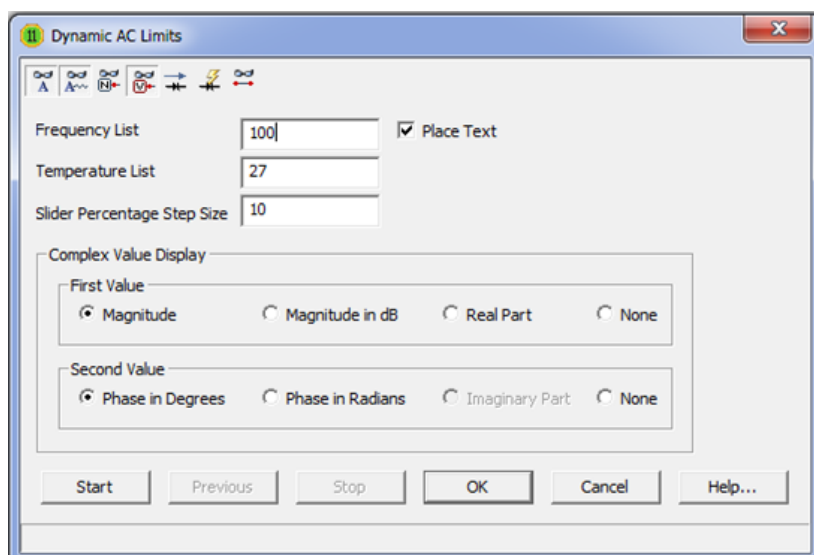


Рис. 34. Окно Dynamic AC Limits

Окно содержит полосу кнопок индикации, отвечающих за отображение текущих характеристик схемы (рис. 35):

1. Показ текста на схеме;
2. Показ позиционных обозначений и номиналов компонентов;
3. Номера узлов;
4. Напряжения аналоговых узлов;
5. Токи выводов компонентов;
6. Мощности, рассеиваемые на компонентах;
7. Состояния полупроводниковых диодов;
8. Показ соединений между выводами компонентов.

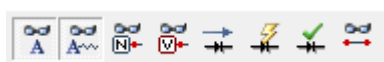


Рис. 35. Полоска кнопок индикации

Также окно содержит три поля ввода, отвечающие за список значений частоты для проведения расчетов схемы по переменному току на малом сигнале (Frequency List), значение температуры, при которой выполняется анализ (Temperature List), и процентное изменение величин компонентов (Slider Percentage Step Size).

Раздел Complex Value Display отвечает за способ индикации величины на схеме. Результаты анализа линеаризованной схемы представляют собой комплексные величины. First Value позволяет выбрать, какую величину выводить на индикацию в качестве первой части комплексного числа, а Second Value – второй (рис. 36).

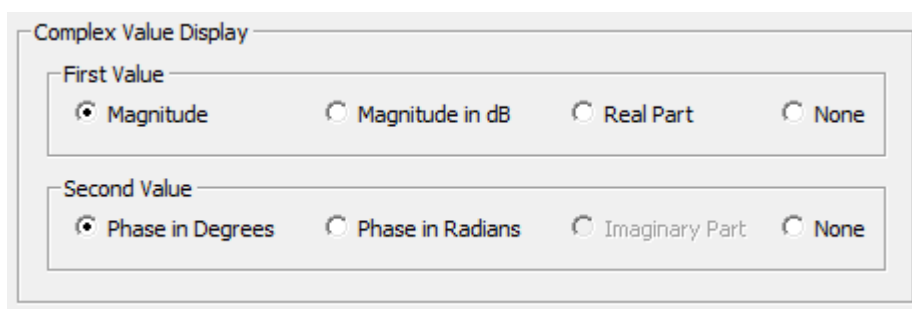


Рис. 36. Раздел Complex Value Display

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ MICRO-CAP

Лабораторная работа №1

Исследование электрических цепей на постоянном токе

1.1. Цель работы:

1. Знакомство с простейшими резистивными электрическими цепями;
2. Изучение законов Ома и Кирхгофа для цепей постоянного тока;
3. Исследование резистивных электрических цепей на постоянном токе.

1.2. Теоретическая справка

1.2.1. Основные понятия и определения

Согласно представлениям современной физики, вся материя состоит из атомов. Данное слово происходит от древнегреческого слова «неразрезанный». В русскоязычной литературе слово «атом» часто соотносят со значением «неделимый». Атомы состоят из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Электроны имеют отрицательный заряд, ядро атома — положительный заряд.

Если в точке А (рис. 1.1) наблюдается избыток электронов в сравнении с точкой В, то между точками А и В существует разность потенциалов (напряжение).

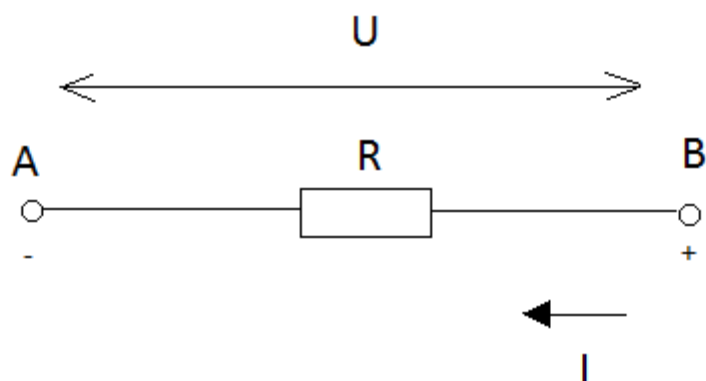


Рис. 1.1. Разность потенциалов и электрический ток

Напряжение $U = U_A - U_B$, где U_A и U_B — потенциалы точек A и B соответственно. Электроны из точки A перетекают в точку B. Этот поток электронов называется электрическим током I . За направление тока принято направление, противоположное направлению движения электронов (рис. 1.1). Элемент R (рис. 1.1) называется резистором. Он оказывает сопротивление электрическому току.

Напряжение U измеряется в вольтах [В], ток I — в амперах [А], сопротивление R — в омах [Ом].

1.2.2. Основные законы электрических цепей

Согласно Закону Ома, сила тока в электрической цепи определяется в соответствии с выражением:

$$I = \frac{U}{R}.$$

На рис. 1.1 представлена очень простая электрическая цепь. Для анализа сложных цепей дополнительно используют Законы Кирхгофа для токов и напряжений. Закон Кирхгофа для токов гласит: сумма

токов втекающих в узел цепи равна сумме токов, вытекающих из узла (рис. 1.2).

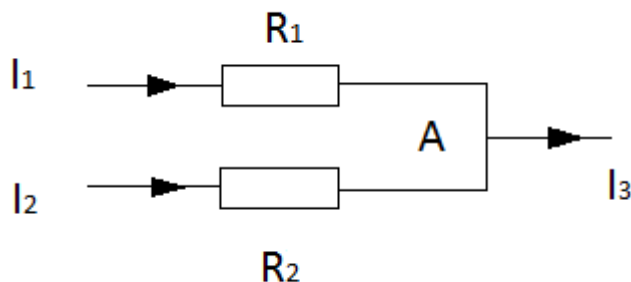


Рис. 1.2. Электрическая цепь, содержащая узел

Токи I_1 , I_2 — втекают в узел А, ток I_3 — вытекает из узла А. Согласно Закону Кирхгофа, $I_3 = I_1 + I_2$.

Закон Кирхгофа для напряжений гласит: сумма напряжений в замкнутом контуре равна нулю (рис. 1.3).

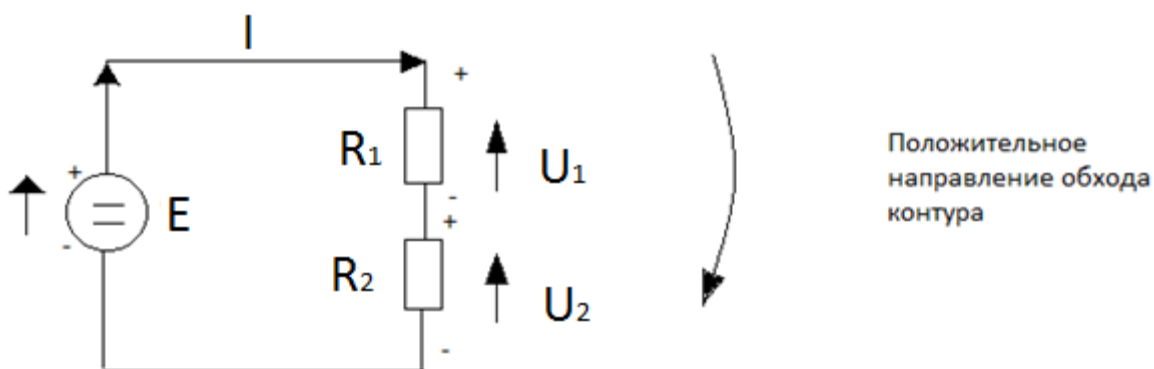


Рис. 1.3. Замкнутый контур электрической цепи

Для выбранного положительного направления обхода контура (рис.1.3): $E - U_1 - U_2 = 0$

Тогда, $E = U_1 + U_2$. Можно принять и обратное положительное направление, тогда: $U_1 + U_2 - E = 0$ и, следовательно, $U_1 + U_2 = E$.

1.2.3. Последовательное, параллельное и смешанное соединения резисторов

Если резисторы соединены последовательно, то их эквивалентное сопротивление равно сумме сопротивлений всех последовательно соединенных резисторов:

$$R_{\text{э}} = \sum_1^n R_j,$$

где n — число резисторов, соединенных последовательно. Так, для цепи (рис. 1.3) общее (эквивалентное) сопротивление $R_{\text{э}} = R_1 + R_2$.

Для параллельно соединенных резисторов справедливо выражение:

$$\frac{1}{R_{\text{э}}} = \sum_1^n \frac{1}{R_i}.$$

Например, для цепи (рис. 1.4.) эквивалентно сопротивление:

$$R_{\text{э}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \cdot 4}{8} = 2 \text{ кОм}.$$

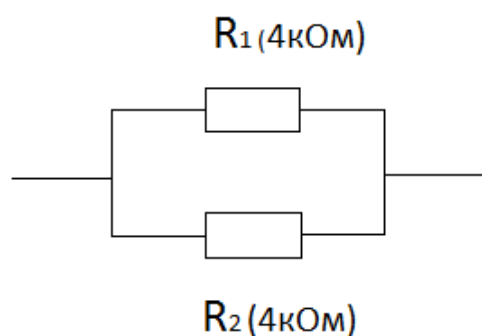


Рис. 1.4. Параллельное соединение резисторов

Для расчета полного сопротивления цепи, содержащей смешанное соединение резисторов, производят последовательное упрощение цепи, заменяя участки с последовательным и параллельным соединением резисторов их эквивалентными сопротивлениями. Рассмотрим пример смешанного соединения резисторов (рис. 1.5).

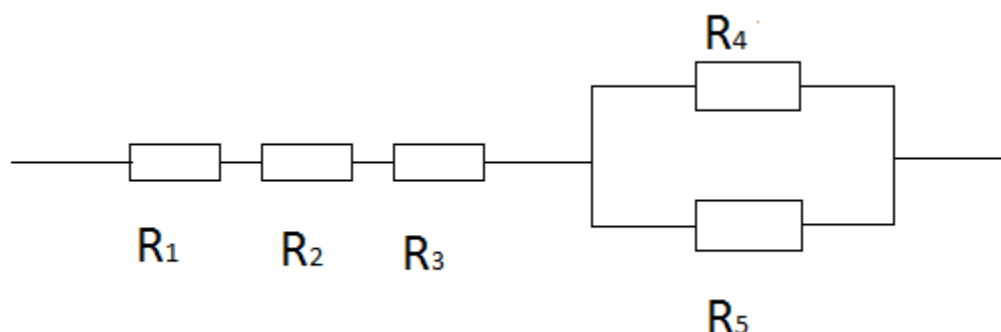


Рис. 1.5. Смешанное соединение резисторов

Заменяя участки последовательного и параллельного соединений эквивалентными сопротивлениями, получим цепь (рис. 1.6).

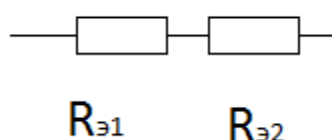


Рис. 1.6. Эквивалент электрической цепи (рис. 1.5)

$$R_{э1} = R_1 + R_2 + R_3;$$

$$R_{э2} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}.$$

Очевидно, что общее сопротивление цепи (рис. 1.5) равно:

$$R_{э} = R_{э1} + R_{э2} = R_1 + R_2 + R_3 + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}.$$

1.2.4. Моделирование электрических цепей

Для моделирования электрических цепей разработан широкий спектр программного обеспечения. Для выполнения лабораторных работ будет использоваться Micro-CAP (студенческая версия). Рассмотрим пример моделирования электрической цепи (рис. 1.7). Схема имеет два заземленных элемента (резистор R_1 и источник напряжения $E_2 = 15\text{ В}$). Напряжение измеряется вольтметром, который имеет два вывода. На рис. 1.7 показаны напряжения в точках схемы. Для измерения этих напряжений один вывод вольтметра должен быть постоянно заземлен, а другой – подключаться к соответствующей точке.

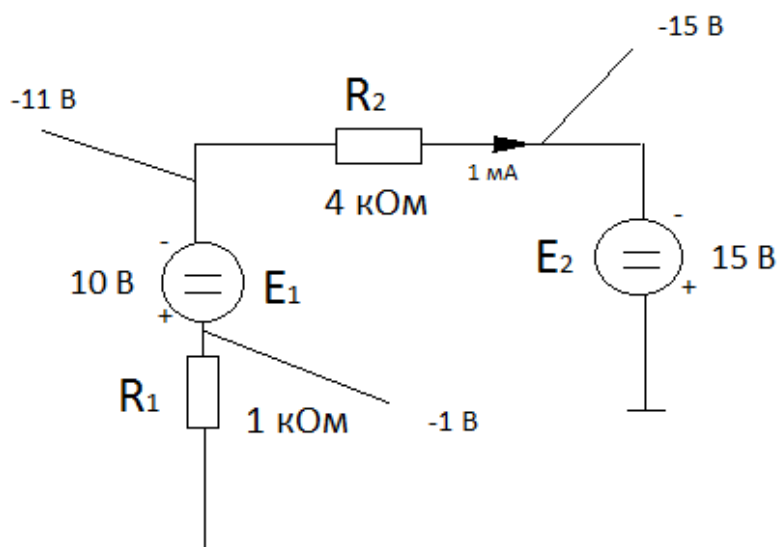


Рис. 1.7. Результаты моделирования электрической цепи

Источники напряжений E_1 и E_2 порождают токи противоположных направлений. Так как напряжение $E_2 > E_1$, то результирующий ток протекает от земли через R_1 , E_1 и R_2 к минусу источника E_2 . Согласно Закону Кирхгофа для напряжений, результирующее значение напряжения в контуре равно

$$E_3 = E_2 - E_1 = 15 - 10 = 5\text{ В}.$$

Согласно Закону Ома сила тока в цепи:

$$I = \frac{5 \text{ В}}{(1 + 4) \text{ кОм}} = 1 \text{ мА}.$$

Определим значение напряжения на резисторе R_1 . Потенциал земли равен нулю. Поэтому $U_{R1} = -1 - 0 = -1 \text{ В}$. Напряжение на резисторе R_2 равно $U_{R2} = -11 - (-15) = 4 \text{ В}$.

1.2.5. Источники напряжения и тока

Любая электрическая цепь включает в себя один или несколько источников электрической энергии. Такими источниками являются источники напряжения и источники тока. На рассмотренных ранее схемах присутствовали идеальные источники напряжения с нулевым значением внутреннего сопротивления $R_{\text{вн}} = 0$. У реального источника напряжения $R_{\text{вн}} > 0$ (рис. 1.8).

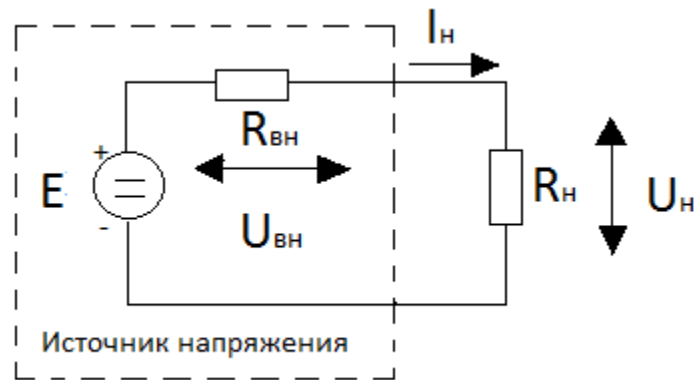


Рис. 1.8. Подключение источника напряжения к нагрузке

При $I_{\text{н}} = 0$, $U_{\text{н}} = E$ (режим холостого хода). В рабочем режиме $U_{\text{н}} = E - R_{\text{вн}} I_{\text{н}}$. Чем меньше $R_{\text{вн}}$, тем ближе схема к идеальному источнику напряжения. Задача источника напряжения заключается в обеспечении требуемого напряжения на нагрузке. В схеме напряжение E разделяется на две части: $E = U_{\text{вн}} + U_{\text{н}} = I_{\text{н}} R_{\text{вн}} + U_{\text{н}}$.

Для схемы (рис. 1.8) должно выполняться условие: $R_{вн} \ll R_{н}$. В противном случае схему следует рассматривать как источник тока. То есть источник тока можно получить из источника напряжения увеличив значение $R_{вн}$.

В источнике тока происходит разделение тока (рис. 1.9):

$$I = I_{вн} + I_{н} = I * \frac{G_{вн}}{G_{вн} + G_{н}} + I * \frac{G_{н}}{G_{вн} + G_{н}}.$$

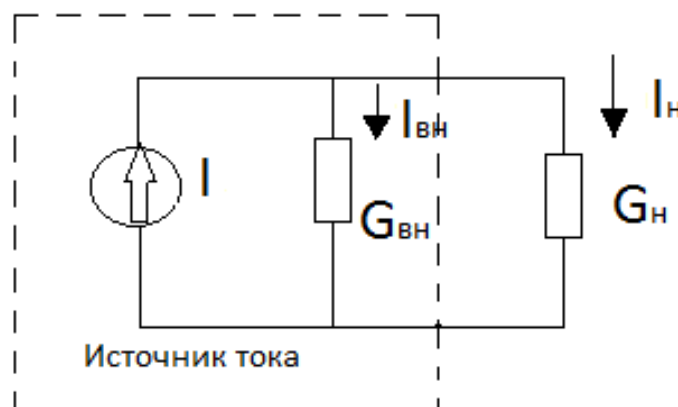


Рис. 1.9. Подключение источника тока к нагрузке

В схеме (рис. 1.9) $G_{вн}$ – внутренняя проводимость источника тока, $G_{н}$ – проводимость нагрузки. Для идеального источника тока $G_{вн} = 0$ (рис. 1.9) или $R_{вн} = \infty$ (рис. 1.8).

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Провести исследование цепи, представленной на рис. 1.7

Номиналы элементов схемы приведены в таблице 1.1.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 1.7);
2. Произвести моделирование цепи, записать значения тока и напряжений в точках схемы;

3. Вычислить падения напряжения на каждом из элементов схемы;

Таблица 1.1

Номиналы элементов схемы (рис. 1.7, 1.10)

Номер варианта	E_1 , В	E_2 , В	R_1 , кОм	R_2 , кОм
1	30	20	1,5	6
2	20	30	1,5	6
3	25	5	7	0,5
4	10	5	13	25
5	8	2	0,8	2,5
6	3	6	1,3	5,7
7	5	9	7,8	10
8	12	18	11	22
9	15	20	12	22
10	25	10	3,6	7,8
11	2,5	5	0,5	1,5
12	7,5	3	1,5	7,1
13	12	9	4,7	6
14	4,5	9	12	5
15	5	15	7	14

4. Произвести расчет цепи используя законы Ома и Кирхгофа;

5. Сравнить результаты расчетов и моделирования, сделать выводы.

Отчет по п. 1.3.1 должен содержать: схему цепи с указанными на ней значениями напряжений и тока; подробный расчет тока цепи и напряжений на резисторах схемы; выводы по результатам исследований.

1.3.2. Провести исследование цепи, представленной на рис. 1.10

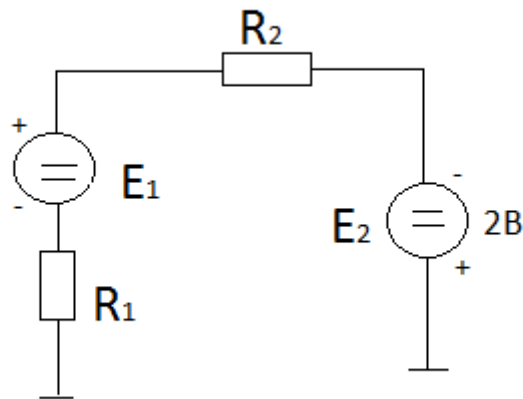


Рис. 1.10. Схема цепи для исследования в соответствии с п. 1.3.2

Номиналы элементов схемы взять из таблицы 1.1.

Порядок выполнения эксперимента и требования к отчету аналогичны п. 1.3.1.

1.3.3. Сравнение результатов исследований п. 1.3.1 и п. 1.3.2

Произвести сравнения результатов исследований по п. 1.3.1 и п. 1.3.2. Сделать выводы.

1.3.4. Исследование цепи на рис. 1.11

Провести исследование цепи, представленной на рисунке 1.11 (варианты 1 – 5), 1.12 (варианты 6 – 10), 1.13 (варианты 11 – 15).

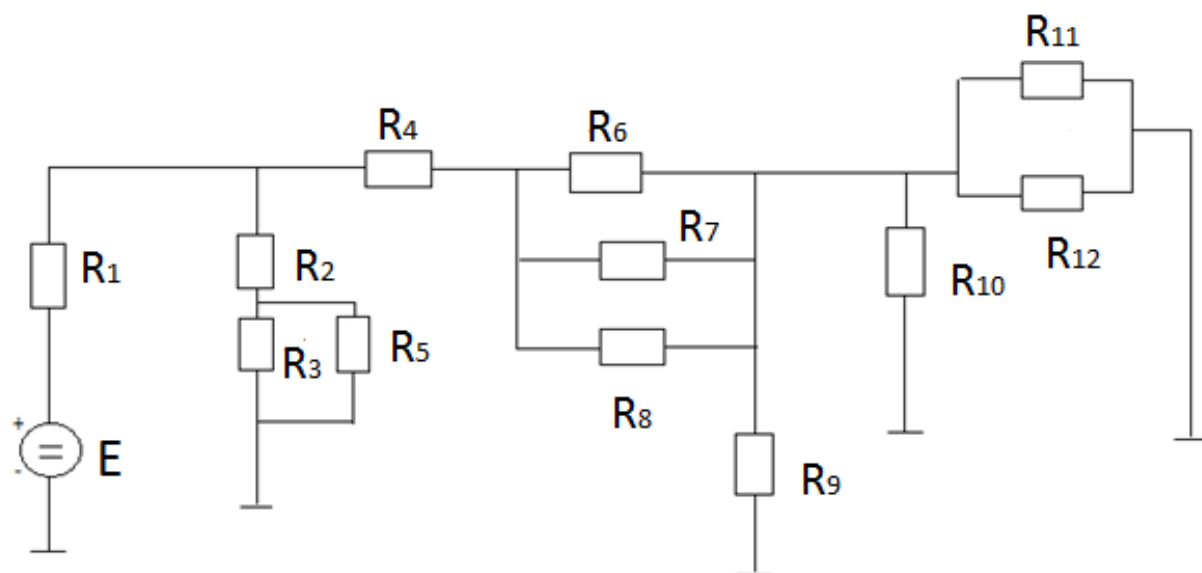


Рис. 1.11. Схема для исследования в соответствии с п.1.3.4 (варианты 1 – 5)

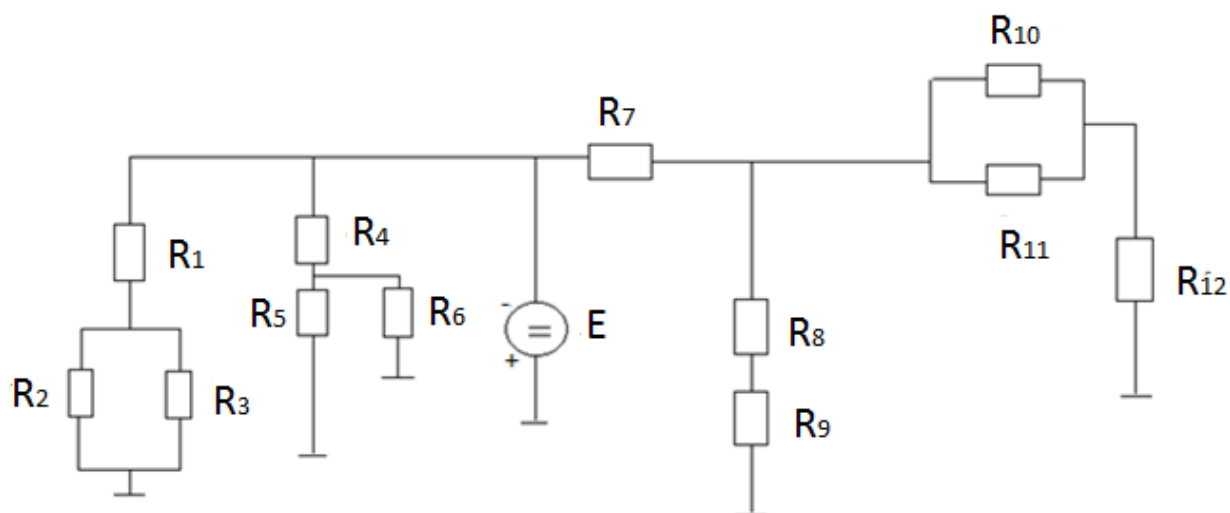


Рис. 1.12. Схема для исследования в соответствии с п.1.3.4 (варианты 6 – 10)

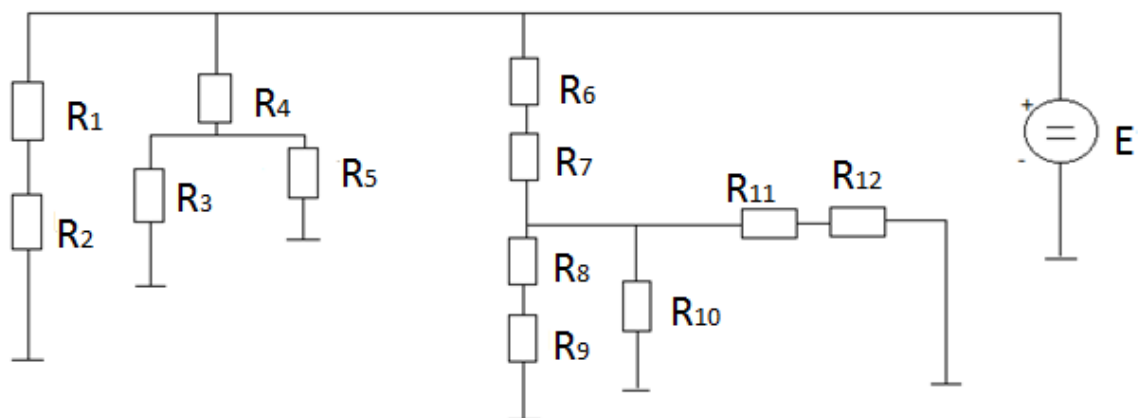


Рис. 1.13. Схема для исследования в соответствии с п.1.3.4 (варианты 11 – 15)

Номиналы элементов схемы приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Номиналы элементов схем (рис. 1.1, 1.12 и 1.13)

Номер варианта	$E, В$	Сопротивление резисторов, кОм											
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}
1,6,11	10	15	10	2	5	8	1	2	3	11	20	3	10
2,7,12	15	20	15	2	5	8	5	2	6	5	10	5	15
3,8,13	20	25	20	4	5	8	3	4	2	2	5	10	10
4,9,14	25	30	25	4	5	8	3	4	5	3	2	8	15
5,10,15	30	35	30	6	5	8	5	5	7	5	1	4	10

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 1.11 – 1.13);
2. Произвести моделирование цепи, записать значения токов и напряжений в точках схемы;

3. Вычислить падения напряжения на каждом из резисторов схемы;

4. Произвести расчет цепи используя Законы Ома и Кирхгофа (рассчитать токи в ветвях схемы и напряжения на каждом из резисторов);

5. Сравнить результаты расчетов и моделирования, сделать выводы.

Отчет по п. 1.3.4 должен содержать: схему цепи с указанными на ней значениями напряжений и токов; подробный расчет токов и напряжений схемы; выводы по результатам исследований.

1.3.5. Подбор номинальных значений сопротивлений резисторов схемы ограничителя тока рис. 1.14

Произвести подбор номинальных значений сопротивлений резисторов схемы ограничителя тока, представленной на рисунках 1.14 (варианты 1 – 5), 1.15 (варианты 6 – 10), 1.16 (варианты 11 – 15).

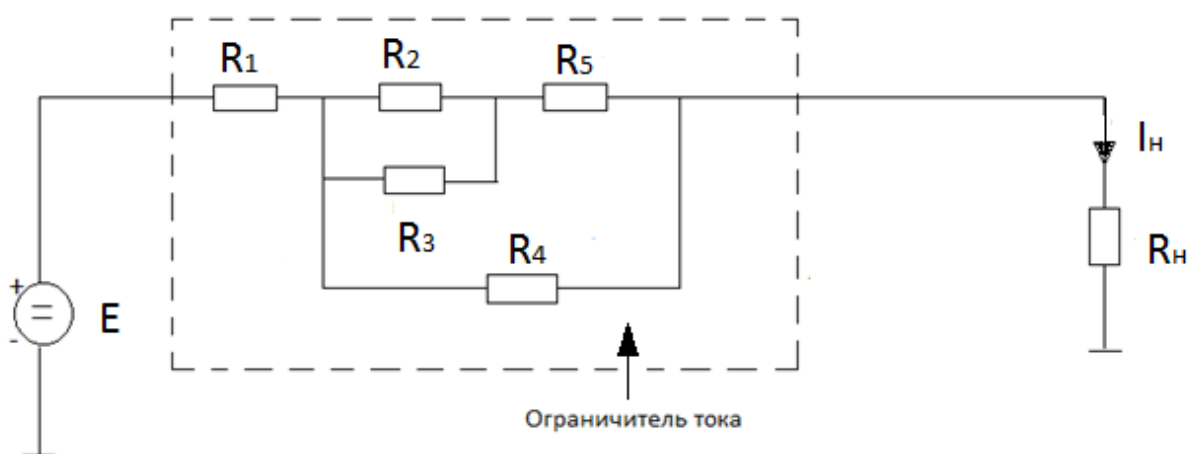


Рис. 1.14. Схемы для исследования в соответствии с п.1.3.5 (варианты 1 – 5)

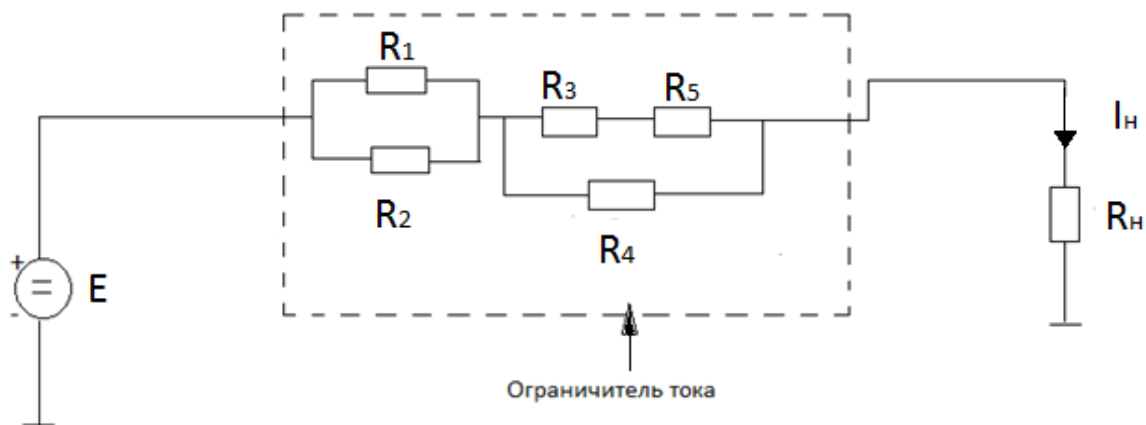


Рис. 1.15. Схема для исследования в соответствии с п.1.3.5 (варианты 6 – 10)

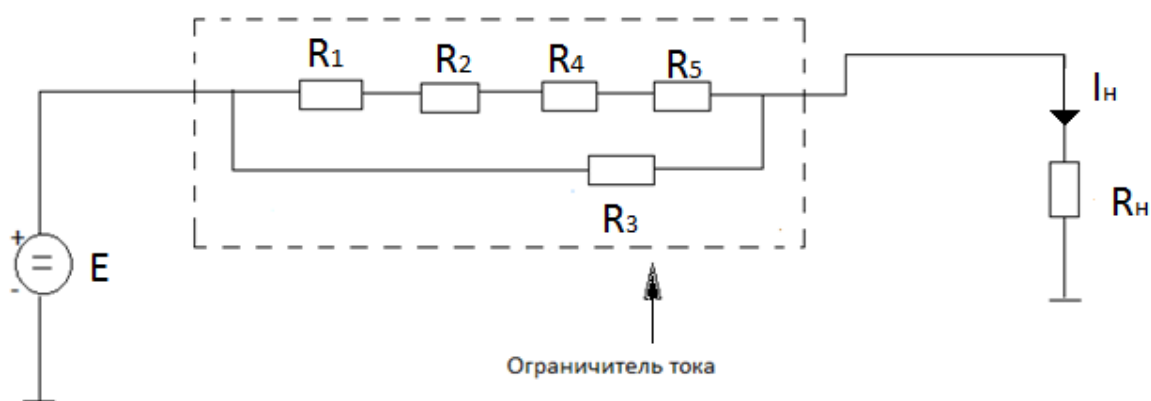


Рис. 1.16. Схема для исследования в соответствии с п.1.3.5 (варианты 11 – 15)

Номиналы элементов схемы приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Номиналы элементов схем (рис. 1.14, 1.15 и 1.16)

Номер варианта	$E, В$	$R_H, Ом$	$I_H, мА$
1,6,11	9	10	10...15
2,7,12	9	20	5...10
3,8,13	12	10	15...20
4,9,14	12	20	20...25
5,10,15	15	30	20...25

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 1.14 – 1.16);
2. Задавшись значениями сопротивлений резисторов $R_1 - R_5$ провести моделирование цепи и определить величину I_H ;
3. Изменяя сопротивления резисторов $R_1 - R_5$ добиться заданного значения тока нагрузки;
4. Выполнить расчет тока нагрузки для полученных значений сопротивлений резисторов $R_1 - R_5$;
5. Сравнить результаты расчетов и моделирования, сделать выводы.

Отчет по п. 1.3.5 должен содержать: схему исследуемой цепи с указанным на ней номиналом элементов ($E, R_H, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$); подробный расчет тока нагрузки; выводы по результатам исследований.

1.3.6. Исследование источника напряжения рис. 1.8

Провести исследование источника напряжения (рис. 1.8). Параметры элементов схемы даны в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Параметры источника напряжения и нагрузки (рис. 1.8)

Номер варианта	$E, В$	$R_{вн}, Ом$	$R_H, Ом$
1	10	1	150...500
2	10	5	300...750
3	10	15	350...800
4	10	20	400...1000
5	10	1	100...400
6	5	5	250...650

Окончание таблицы 1.4

Номер варианта	E, B	$R_{BH}, \text{Ом}$	$R_H, \text{Ом}$
7	5	15	300...800
8	5	20	450...1000
9	5	1	120...600
10	5	5	270...750
11	15	15	340...850
12	15	20	500...1200
13	15	1	75...500
14	15	5	180...850
15	15	15	270...900

Порядок проведения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 1.8);
2. Изменяя сопротивление нагрузки в заданном диапазоне значений (табл. 1.4), заполнить таблицу 1.5;

Таблица 1.5

Результаты исследования источника напряжения (рис. 1.8)

$R_H, \text{Ом}$	$I_H, \text{мА}$	U_H, B	$R_{BH}, \text{Ом}$

3. Построить график зависимости выходного напряжения от тока нагрузки $U_H = \varphi(I_H)$;
4. Оценить по графику $U_H = \varphi(I_H)$ значение тока короткого замыкания источника напряжения $I_{KЗ}$;
5. Определить экспериментальное значение $I_{KЗ}$ и сравнить его с оценочным значением;
6. Определить зависимость $U_H = \varphi(I_H)$ при увеличенном и уменьшенном на 50% значении R_{BH} , результаты занести в табл. 1.5;

7. Построить графики зависимости $U_H = \varphi(I_H)$ для разных $R_{вн}$ (рекомендуется все три зависимости представить совместно на одном рисунке, например для 1 варианта (смотри рис. 1.17);

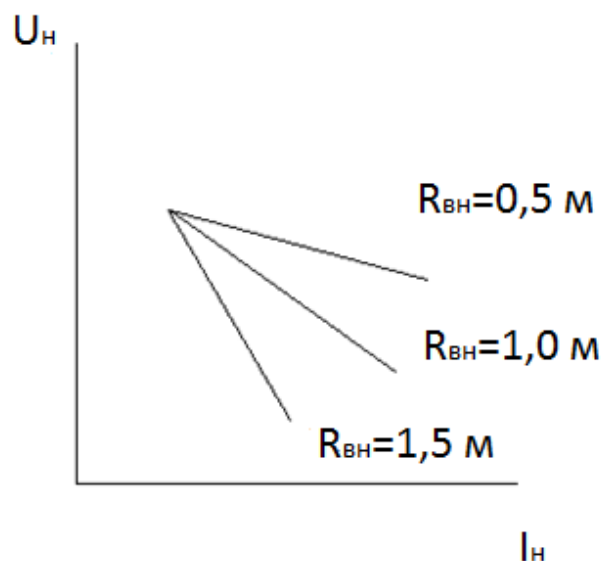


Рис. 1.17. Пример нагрузочной характеристики источника напряжения при разных значениях его внутреннего сопротивления

8. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 1.3.6 должен содержать: схему источника напряжения; заполненную таблицу 1.5 для трех значений $R_{вн}$; графики зависимости $U_H = \varphi(I_H)$ для трех значений $R_{вн}$; сравнение оценочного и фактического значений $I_{кз}$; выводы по результатам исследований.

1.3.7. Исследование источника тока (рис. 1.8)

Провести исследование источника тока (рис. 1.8).

Параметры элементов схемы даны в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Параметры источника тока и нагрузки (рис. 1.8)

Номер варианта	$E, В$	$R_{вн}, кОм$	$R_n, Ом$
1	20	10	50...1200
2	20	15	100...2500
3	20	20	200...4000
4	20	12	70...1500
5	20	18	150...1300
6	30	20	250...4500
7	30	25	400...5500
8	30	30	500...6000
9	30	23	370...4000
10	30	27	450...5000
11	40	30	600...7000
12	40	35	750...8000
13	40	40	800...7500
14	40	33	600...7000
15	40	38	500...7400

Порядок приведения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 1.8);
2. Изменяя сопротивления нагрузки в заданных пределах (табл. 1.6), заполнить таблицу 1.7;

Таблица 1.7

Результаты исследования источника тока (рис.1.8)

$R_n, Ом$	$I_n, мА(мкА)$	$R_{вн}, кОм$

3. Построить график зависимости тока нагрузки от сопротивления нагрузки $I_n = \varphi(R_n)$;
4. Оценить по графику $I_n = \varphi(R_n)$ значение тока короткого замыкания источника тока $I_{кз}$;

5. Определить экспериментальное значение $I_{кз}$ и сравнить его с оценочным значением;

6. Определить зависимость $I_H = \varphi(R_H)$ при увеличенном и уменьшенном на 50% значении $R_{вн}$, результаты занести в таблицу 1.7;

7. Построить графики зависимости $I_H = \varphi(R_H)$ для разных $R_{вн}$ (аналогично источнику напряжения);

Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 1.3.7 должен содержать: схему источника тока; заполненную таблицу 1.7 для трех значений $R_{вн}$; графики зависимости $I_H = \varphi(R_H)$ для трех значений $R_{вн}$; сравнение оценочного и фактического значений $I_{кз}$; выводы по результатам исследований.

1.4. Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток?
2. В каком направлении протекает ток в электрической цепи?
3. Что такое разность потенциалов и как она влияет на силу тока?
4. Сформулируйте Закон Ома для электрической цепи, приведите пример.
5. Сформулируйте Закон Кирхгофа для токов, приведите пример.
6. Сформулируйте Закон Кирхгофа для напряжений, приведите пример.
7. Чему равно эквивалентное сопротивление последовательно соединенных резисторов?

8. Чему равно эквивалентное сопротивление параллельно соединенных резисторов?

1.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку (необходимые понятия, расчетные формулы); отчеты по п. 1.3.1 – 1.3.7, включая выводы по каждому эксперименту; общие выводы по лабораторной работе.

1.6. Защита лабораторной работы

Для защиты работы необходимо: предоставить преподавателю полностью оформленный отчет; ответить на предложенные контрольные вопросы; решить задачу, поставленную преподавателем. В качестве контрольной задачи предлагается выполнить анализ простейшей электрической цепи без использования программ для моделирования схем.

Пример контрольной задачи:

Найти силу тока в цепи и определить напряжение на резисторе R_3 (рис. 1.18).

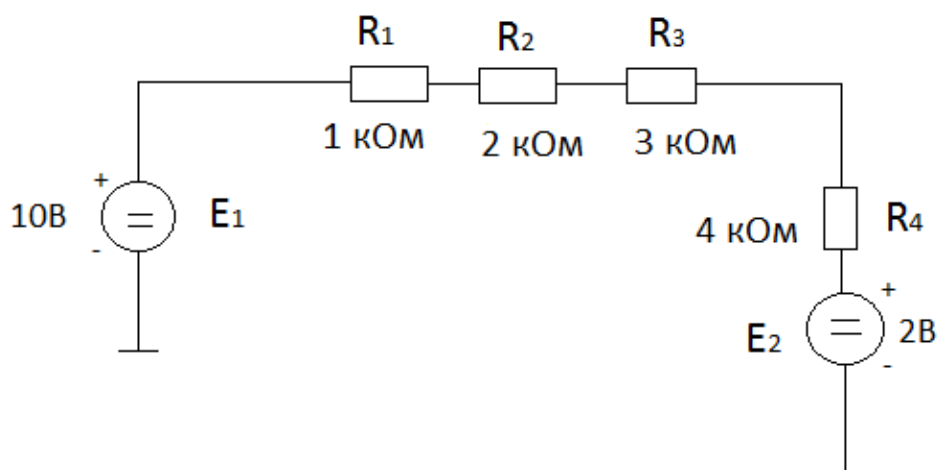


Рис. 1.18. Пример контрольной задачи

Лабораторная работа №2

Исследование электрических цепей на переменном токе

2.1. Цель работы:

1. Знакомство с реактивными элементами;
2. Изучение теоретических основ электрических цепей переменного тока;
3. Исследование электрических цепей переменного тока.

2.2. Теоретическая справка

2.2.1. Переменный электрический ток

Отличие переменного тока от постоянного заключается в том, что он все время изменяет свое направление. Постоянный ток протекает только в одном направлении.

Наиболее распространенной формой переменного тока является синусоидальная (рис. 2.1).

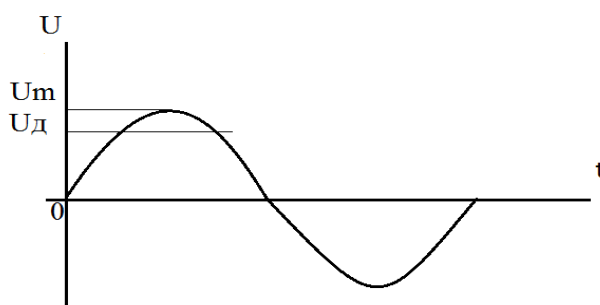


Рис. 2.1. Синусоидальный переменный сигнал

Действующее значение переменного напряжения
 $U_d = 0,707 * U_m$, где U_m — амплитудное значение напряжения.

Именно U_d показывают вольтметры переменного тока, подключенные к участку цепи с переменным током. U_d также называют среднеквадратичным значением напряжения.

2.2.2. Конденсаторы

Конденсаторы способны запасать электрическую энергию и отдавать ее (заряжаться и разряжаться). Емкость конденсатора обозначается буквой C ; измеряется в фарадах [Ф].

Эквивалентная емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме их емкостей.

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i ,$$

где n – число параллельно включенных конденсаторов.

При последовательном соединении конденсаторов

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} ,$$

где n – число последовательно соединенных конденсаторов.

Конденсаторы препятствуют протеканию переменного тока.

Такое сопротивление переменному току называется реактивным сопротивлением X_C .

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} ,$$

где f – частота переменного тока.

Если последовательно с конденсатором включен резистор (рис. 2.2), то результирующее сопротивление определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_X^2}.$$

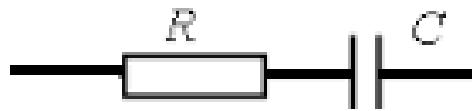


Рис. 2.2. Последовательное соединение конденсатора и резистора

Это объясняется тем, что у конденсатора фазовый сдвиг между током и напряжением равен 90 град. (рисунок 2.3).

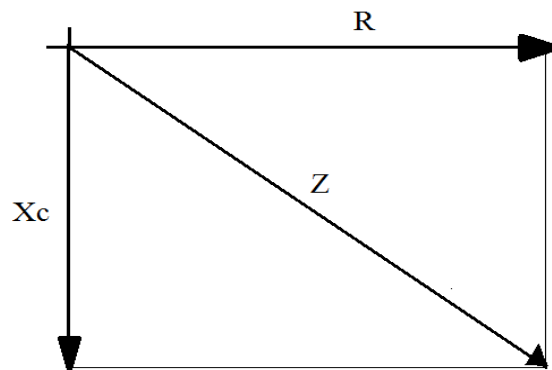


Рис. 2.3. Векторное представление эквивалентного сопротивления цепи (рис. 2.2)

Если последовательно включены несколько конденсаторов и резисторов, то эквивалентное сопротивление:

$$Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{C\Sigma}^2};$$

$$X_{C\Sigma} = \sum_{i=1}^n X_{Ci}; \quad R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m R;$$

где n – число последовательно соединенных конденсаторов; m – число последовательно соединенных резисторов.

2.2.3. Катушки индуктивности

Катушки индуктивности, как и конденсаторы, способны накапливать и отдавать электрическую энергию. Индуктивность катушки обозначается L и измеряется в генри [Гн].

Эквивалентное сопротивление для последовательно соединенных резистора и катушки индуктивности:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Индуктивное сопротивление катушки $X_L = 2\pi fL$.

2.2.4. LC – электрические цепи

Эквивалентное сопротивление цепи (рис. 2.4) равно разности реактивных сопротивлений X_C и X_L (рис. 2.5).

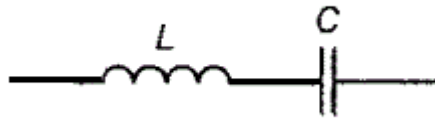


Рис. 2.4. Последовательная LC-цепь

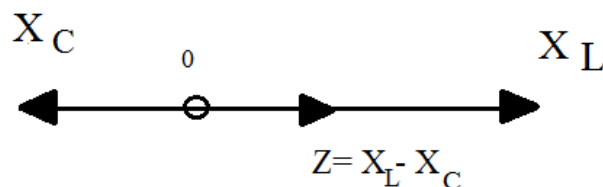


Рис. 2.5. Векторное представление эквивалентного сопротивления цепи (рис. 2.4)

Эквивалентное сопротивление (рис. 2.5) имеет индуктивный характер ($X_L > X_C$).

В случае, когда $X_L < X_C$, эквивалентное сопротивление имеет емкостной характер и $Z = X_C - X_L$.

Более широкое распространение получило использование параллельного включения конденсатора и катушки индуктивности, также известного как параллельный колебательный контур (рис. 2.6).

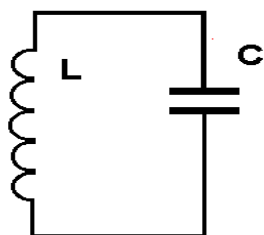


Рис. 2.6. Колебательный контур

Схема (рис. 2.4) также является колебательным контуром – последовательным колебательным контуром.

На рис. 2.7 представлена амплитудно-частотная характеристика параллельного колебательного контура (рис. 2.6).

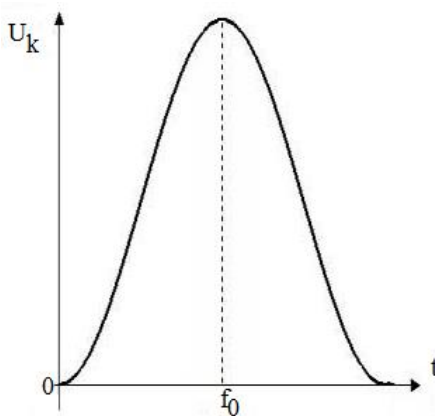


Рис. 2.7 Амплитудно-частотная характеристика колебательного контура

Резонансная (собственная) частота контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Параллельные колебательные контуры используются, например, в радиовещательных или телевизионных приемниках для выделения частоты передающей радиостанции или телевизионного канала.

2.3. Порядок выполнения работы

2.3.1. Исследование электрической цепи рис. 2.9

Провести исследование электрической цепи (рис. 2.9).
 Параметры элементов схемы представлены в табл. 2.1.

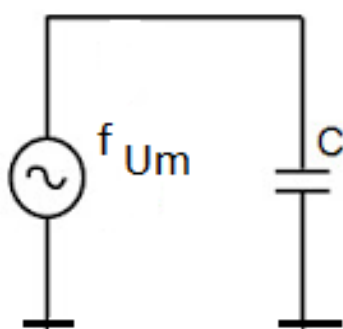


Рис. 2.8. Подключение конденсатора к источнику переменного напряжения

Таблица 2.1

Параметры элементов схемы

Номер варианта	f , Гц	U_m , В	C , мкФ	Диапазон частот, Гц
1	50	1	$3 \pm 10\%$	10...300
2	50	5	$1 \pm 20\%$	10...500
3	100	1	$5 \pm 15\%$	50...200
4	100	10	$0,5 \pm 20\%$	50...700
5	30	4	$10 \pm 10\%$	5...100
6	40	10	$2 \pm 10\%$	5...400
7	60	2	$3 \pm 15\%$	10...300
8	60	7	$0,5 \pm 20\%$	10...500
9	70	10	$1,5 \pm 20\%$	10...400
10	70	15	$0,5 \pm 10\%$	10...400
11	150	5	$0,2 \pm 20\%$	10...1000

Окончание таблицы 2.1

Номер варианта	f, Гц	U _m , В	C, мкФ	Диапазон частот, Гц
12	150	10	0,1±5%	10...1500
13	180	5	0,7±5%	10...600
14	180	7	0,6±5%	10...700
15	200	5	1±10%	10...400

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 2.8);
2. Для заданной частоты f записать значения силы тока в цепи;
3. Определить сопротивление конденсатора по данным эксперимента и сравнить его значения с расчетной величиной;
4. Определить зависимость силы тока в цепи и реактивного сопротивления конденсатора для заданного диапазона частот (не менее пяти точек), результаты испытаний занести в табл. 2.2;

Таблица 2.2

Зависимость сопротивления конденсатора от частоты переменного тока

Частота сигнала f, Гц	Сила тока в цепи, мА	Реактивное сопротивление конденсатора, Ом

5. Построить график зависимости реактивного сопротивления конденсатора X_C от частоты переменного тока: $X_C = \varphi(f)$;
6. Для заданной частоты f (табл. 2.1) определить диапазоны возможных значений силы тока в цепи и реактивного сопротивления

конденсатора с учетом заданного допуска на значение емкости конденсатора (табл. 2.1);

7. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 2.3.1 должен содержать: схему исследуемой цепи; результат сравнения расчетного и экспериментального значения X_C для заданной частоты f заполненную таблицу 2.2; график зависимости $X_C = \varphi(f)$; диапазоны изменений тока и X_C для заданного допускаемого отклонения емкости конденсатора; выводы по результатам исследований.

2.3.2. Исследование схемы (рис. 2.9)

Провести исследование схемы (рис. 2.9). Параметры элементов схемы приведены в табл. 2.3.

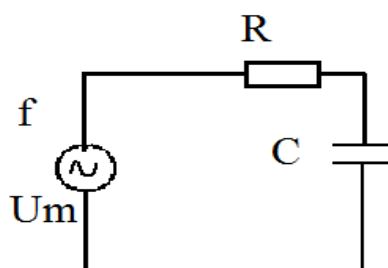


Рис. 2.9. Подключение RC-цепи к источнику переменного напряжения

Таблица 2.3

Параметры элементов схемы (рис. 2.9)

Номер варианта	f , Гц	U_m , В	R , Ом	C , мкФ	Диапазон изменения заданного тока цепи, mA
1	150	10	1000	0.5	10...11
2	400	10	1500	0.2	5...7
3	60	10	2000	1.0	15...17
4	50	10	900	1.2	2...3

Окончание таблицы 2.3

Номер варианта	f, Гц	U _m , В	R, Ом	C, мкФ	Диапазон изменения заданного тока цепи, mA
5	50	10	1200	1.5	6...7
6	100	15	1350	2.0	15...16
7	40	15	750	5.0	18...19
8	50	15	500	10.0	20...22
9	80	15	650	5.0	14...15
10	40	15	450	10.0	16...17
11	90	20	1300	2.0	15...16
12	120	20	850	2.5	17...19
13	110	20	900	3.0	20...21
14	85	20	400	4.0	25...27
15	55	20	700	7.5	30...32

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 2.10);
2. Для заданной частоты f записать значение силы тока в цепи;
3. Определить полное сопротивление цепи по данным эксперимента и сравнить его значение с расчетной величиной;
4. Проверить, попадает ли значение силы тока в заданный диапазон изменения (табл. 2.3);
5. Если значение тока цепи не входит в указанный диапазон, добиться требуемого результата за счет изменения параметров схемы (выполнить регулировку);
6. Записать два-три варианта сочетаний параметров элементов схемы, удовлетворяющих поставленному условию;

7. Определить зависимость полного сопротивления цепи от емкости конденсатора C , используя параметры элементов, представленные в табл. 2.3 и изменяя значение емкости в пределах $\pm 50\%$ от начального значения (не менее пяти точек); результаты занести в табл. 2.4;

Таблица 2.4

Зависимость полного сопротивления цепи (рис. 2.9) от емкости конденсатора

Емкость C , мкФ	Сила тока в цепи, мА	Полное сопротивление цепи, Ом

8. Построить график зависимости полного сопротивления цепи от емкости конденсатора $Z = \varphi(C)$.

Отчет по п. 2.3.2 должен содержать:

1. Схему исследуемой цепи;
2. Расчет полного сопротивления и сравнение его с экспериментальным значением;
3. Результаты регулировки схемы;
4. Заполненную таблицу 2.4; график зависимости $Z = \varphi(C)$;
5. Выводы по результатам исследований.

2.3.3. Исследование электрической цепи (рис. 2.10)

Провести исследование электрической цепи (рис. 2.10).

Параметры элементов схемы даны в табл. 2.5.

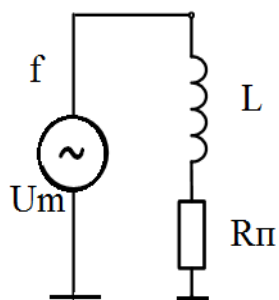


Рис. 2.10. Подключение катушки индуктивности к источнику переменного тока

Таблица 2.5

Параметры элементов схемы (рис. 2.10)

Номер варианта	f, Гц	Um, В	Rп, Ом	L, мГн	Диапазон частот, Гц
1	50	1	5±15%	345±10%	5...400
2	50	2	4±15%	295±10%	5...600
3	75	3	10±15%	620±15%	10...600
4	75	4	6,5±15%	475±15%	10...600
5	100	5	3,5±20%	430±20%	10...650
6	100	1	15±20%	260±20%	20...700
7	125	2	12±20%	800±15%	20...700
8	125	3	9±20%	700±15%	20...700
9	150	4	4,5±10%	565±15%	20...800
10	150	5	15±10%	305±10%	20...800
11	175	1	16±10%	765±20%	25...900
12	175	2	12±10%	635±20%	25...900
13	200	3	14±10%	708±15%	30...900
14	200	4	18±10%	775±20%	30...900
15	225	5	7±15%	900±20%	30...900

Индуктивность L создает индуктивное реактивное сопротивление катушки. Резистор R_{Π} отображает сопротивление провода катушки. Так как значение R_{Π} и L могут изменяться в пределах указанных допусков, сопротивление катушек в каждом из вариантов может колебаться. Наименьшее сопротивление будет у катушки с минимальными значениями R_{Π} и L , наибольшее у катушки с максимальными значениями R_{Π} и L .

Порядок проведения эксперимента:

Построить схему (рис. 2.10);

1. Для заданной частоты f записать значение тока в цепи;
2. Определить сопротивление катушки по данным эксперимента и сравнить его значение с расчетной величиной;
3. Определить зависимость силы тока в цепи и реактивного сопротивления катушки индуктивности от частоты сигнала в диапазоне (табл. 2.5.), результаты занести в табл. 2.6;

Таблица 2.6

Зависимость сопротивления катушки индуктивности от частоты переменного тока

Частота сигнала f , Гц	Сила тока в цепи, мА	Реактивное сопротивление катушки индуктивности, Ом

4. Построить график зависимости реактивного сопротивления катушки индуктивности от частот переменного тока: $X = \varphi(f)$;
5. Для заданной частоты сигнала f (табл. 2.5) определить диапазоны возможных значений силы тока в цепи и реактивного сопротивления катушки с учетом заданных допусков на R_{Π} и L (табл. 2.5);
6. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 2.3.3 должен содержать: схему исследуемой цепи; экспериментальное и расчетное значение сопротивления катушки индуктивности для заданной частоты f ; заполненную табл. 2.6; график зависимости $X = \varphi(f)$; диапазоны изменений тока и X_L для заданных допустимых отклонений R_{Π} и L ; выводы по результатам исследований.

2.3.4. Исследование схемы (рис. 2.11)

Провести исследование схемы (рис. 2.11). Параметры элементов схемы приведены в табл. 2.7.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 2.11);
2. Для заданной частоты f записать значение силы тока в цепи;
3. Определить полное сопротивление цепи и сравнить его значение с расчетной величиной;
4. Проверить, попадает ли значение силы тока в заданный диапазон изменения (табл. 2.7);
5. Если значение тока цепи не входит в указанный диапазон, добиться требуемого результата за счет изменения параметров схемы (выполнить регулировку);
6. Записать два-три варианта сочетаний параметров элементов схемы (рис. 2.12), удовлетворяющих поставленному условию;
7. Для заданной частоты сигнала f (табл. 2.5) определить зависимость полного сопротивления цепи от индуктивности катушки L , используя параметры элементов, представленные в табл. 2.7 и

изменяя значение индуктивности в пределах $\pm 50\%$ от начального значения (не менее пяти точек); результаты занести в табл. 2.8;

Таблица 2.7

Параметры элементов схемы (рис. 2.11)

Номер варианта	f, Гц	U _m , В	R, Ом	R _п , Ом	L, мГн	Диапазоны изменения заданного тока цепи, mA
1	30	1	1000	5	350	6...8
2	30	1	1500	5	500	5...7
3	40	1	2000	6	650	4...5,5
4	40	2	2500	6	620	8...9,5
5	50	2	3000	7	600	10,5...12
6	50	2	3500	7	650	6,5...7,5
7	60	3	4000	8	700	4,5...6,0
8	60	3	1000	8	700	4...6
9	70	3	1500	9	800	6...7,5
10	70	4	2000	9	800	7...9
11	80	4	2500	5	300	10...12
12	80	4	3000	6	400	11,5...12,5
13	90	5	3500	7	450	5...7
14	90	5	4000	8	600	7,5...9
15	100	5	4500	9	820	8...9,5

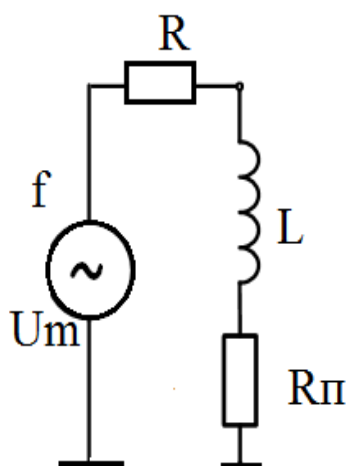


Рис. 2.11. Подключение RL-цепи к источнику переменного тока

Таблица 2.8

Зависимость полного сопротивления цепи (рис. 2.11) от индуктивности катушки

Индуктивность L , мГн	Сила тока в цепи, мА	Полное сопротивление цепи, Ом

8. Построить график зависимости полного сопротивления цепи от индуктивности катушки $Z = \varphi(L)$.

Отчет по п. 2.3.4 должен содержать: схему исследуемой цепи; расчет полного сопротивления и сравнение его с экспериментальными значениями; результаты регулировки схемы; заполненную таблицу 2.8; график зависимости $Z = \varphi(L)$; выводы по результатам исследований.

2.3.5. Исследование последовательного колебательного контура (рис. 2.12)

Провести исследование последовательного колебательного контура (рис. 2.12). Параметры элементов цепи даны в табл. 2.9.

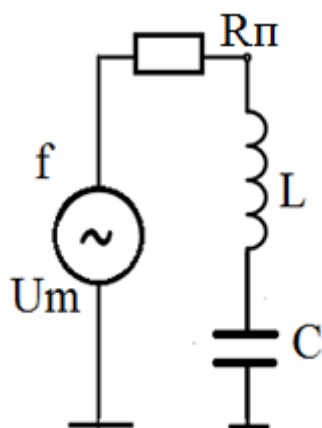


Рис. 2.12. Подключение последовательного колебательного контура к источнику переменного напряжения

С увеличением частоты f сопротивление катушки X_L увеличивается, а сопротивление конденсатора X_C уменьшается. Наименьшее полное сопротивление цепи Z достигается при $X_C = X_L$. При этом по цепи протекает максимальный ток.

Таблица 2.9

Параметры элементов схемы (рис. 2.12)

Номер варианта	f , Гц	U_m , В	R_{Π} , Ом	L , мГн	C , мкФ
1	50	2	4	325	0,05
2	60	3	5	350	0,10
3	100	4	6	375	0,15
4	120	5	4	350	0,20
5	150	6	5	375	0,25
6	180	7	6	400	0,30
7	200	2	4	400	0,35
8	50	3	5	425	0,40
9	60	4	6	450	0,05

Окончание таблицы 2.9

Номер варианта	f, Гц	U _m , В	R _п , Ом	L, мГн	C, мкФ
10	100	5	4	425	0,10
11	120	6	5	450	0,15
12	150	7	6	475	0,20
13	180	2	4	450	0,25
14	20	3	5	475	0,30
15	20	4	6	500	0,35

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 2.12);
2. Определить ток и полное сопротивление цепи для заданной частоты, провести расчет полного сопротивления цепи и сравнить эти значения;
3. Определить зависимость тока и полного сопротивления цепи от частоты f , результаты занести в табл. 2.10 (рекомендуется увеличивать частоту, начиная с единиц Гц, и ограничиться частотой, на которой величина тока упадет до единиц или десятков мкА);

Таблица 2.10

Зависимость тока и полного сопротивления цепи (рис. 2.12) от частоты

Частота сигнала f, Гц	Сила тока в цепи, мА	Полное сопротивление цепи, Ом

4. Построить график зависимостей тока и полного сопротивления цепи от частоты переменного тока $I = \varphi_1(f)$ и $Z = \varphi_2(f)$;

5. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 2.3.5 должен содержать: схему исследуемой цепи; расчетное и экспериментальное значение полного сопротивления цепи; заполненную таблицу 2.10; графики зависимостей $I = \varphi_1(f)$ и $Z = \varphi_2(f)$; выводы по результатам исследований.

2.3.6. Исследование параллельного колебательного контура (рис. 2.13)

Провести исследование параллельного колебательного контура (рис. 2.13). Параметры элементов цепи даны в табл. 2.11.

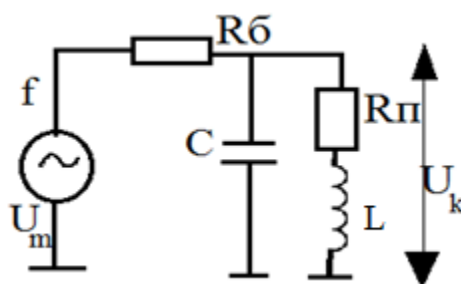


Рис. 2.13. Подключение параллельного колебательного контура к источнику переменного напряжения

Таблица 2.11

Параметры элементов схемы (рис. 2.13)

Номер варианта	U_m , В	$R_б$, Ом	C , мкФ	$R_п$, Ом	L , мГн
1	2	150	0,2	4	300
2	3	150	0,3	5	400
3	4	200	0,4	6	500
4	5	250	0,5	4	325
5	6	300	0,6	5	425
6	7	350	0,7	7	525

Окончание таблицы 2.11

Номер варианта	U_m , В	R_b , Ом	C , мкФ	R_p , Ом	L , мГн
7	2	400	0,2	4	350
8	3	200	0,3	5	450
9	4	200	0,4	6	550
10	5	250	0,5	4	375
11	6	250	0,6	5	475
12	7	300	0,7	6	575
13	2	300	0,2	4	400
14	3	350	0,3	5	500
15	4	400	0,4	6	600

Порядок проведения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 2.13);
2. Определить зависимость полного тока цепи и напряжения на колебательном контуре U_k от частоты f , результаты занести в табл. 2.12 (рекомендуется увеличивать частоту, начиная с единиц Гц, и ограничиться частотой, на которой величина U_k упадет до 0,1...0,2 В);

Таблица 2.12

Зависимость полного тока цепи и напряжения на колебательном контуре от частоты

Частота сигнала f , Гц	Полный ток цепи, мА	Напряжение на колебательном контуре, В

3. Построить графики зависимостей полного тока цепи и напряжения на колебательном контуре от частоты переменного тока $I = \varphi_1(f)$ и $U_k = \varphi_2(f)$;

4. Определить резонансную частоту контура f_0 ;

5. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 2.3.4 должен содержать: схему исследуемой цепи; заполненную табл. 2.12; графики зависимостей $I = \varphi_1(f)$ и $U_k = \varphi_2(f)$; расчет резонансной частоты контура и сравнение расчетного значения с экспериментальным; выводы по результатам исследований.

2.3.7. Определение полного сопротивления электрической цепи на переменном токе

Определить полное сопротивление электрической цепи на переменном токе (варианты 1–5, рис. 2.14; варианты 6–10, рис. 2.15; варианты 11–15, рис. 2.16).

Параметры элементов цепи даны в табл. 2.13 и 2.14. Значение частоты сигнала взять из табл. 2.9.

Примечание: для определения полного сопротивления цепи целесообразно сначала найти ее активное и емкостное эквивалентные сопротивления.

Порядок проведения исследований:

1. Рассчитать полное сопротивление цепи;
2. Построить цепь и определить экспериментальное значение тока цепи и ее полное сопротивление;
3. Сравнить расчетное и экспериментальное значение полного сопротивления цепи;

4. Определить резонансную частоту контура f_0 ;
5. Сделать выводы по результатам исследований.

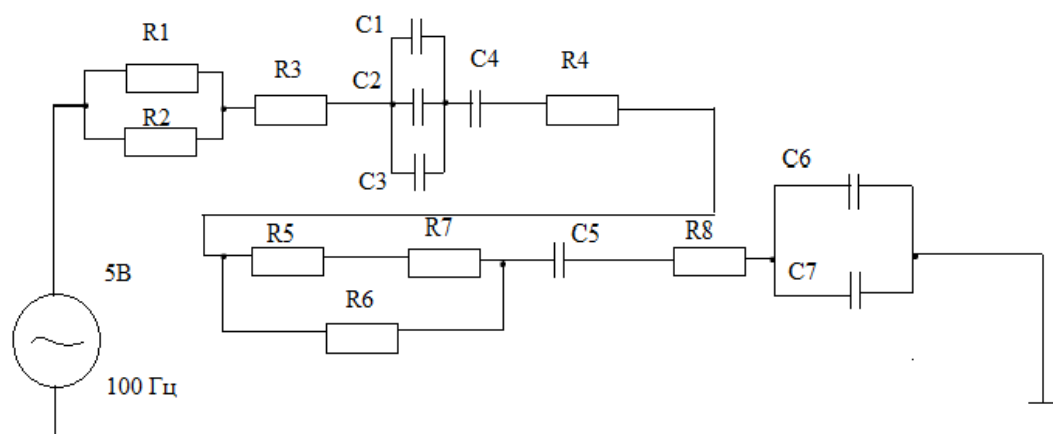


Рис. 2.14. Схема исследуемой цепи (варианты 1–5)

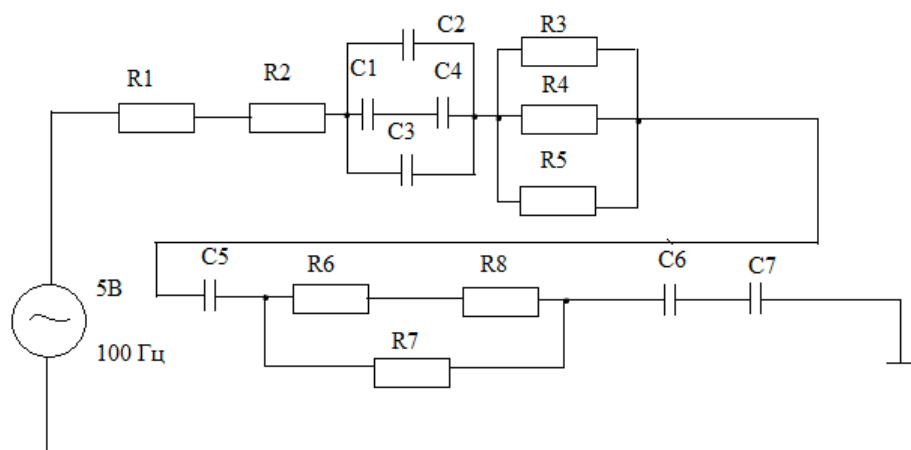


Рис. 2.15. Схема исследуемой цепи (варианты 6–10)

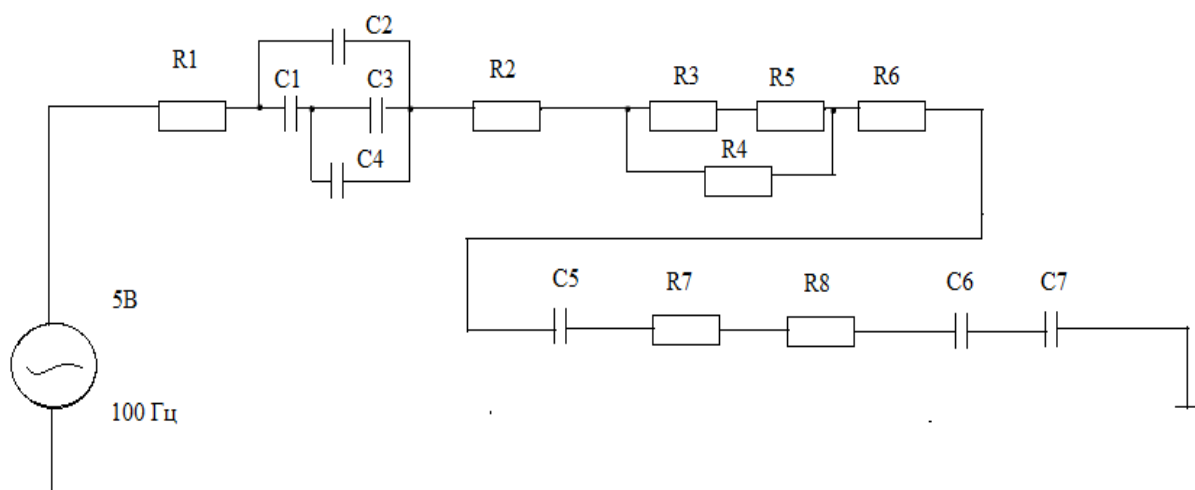


Рис. 2.16. Схема исследуемой цепи (варианты 11–15)

Таблица 2.13

Соппротивления резисторов в схемах (рис. 2.14, 2.15, 2.16)

Номер варианта	Соппротивления резисторов, кОм							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
1	0,5	1,0	0,7	1,0	2,0	1,5	2,2	0,9
2	0,6	1,0	0,8	1,1	2,0	1,6	2,2	0,9
3	0,7	1,0	0,9	1,2	2,0	1,7	2,2	0,9
4	0,8	1,0	1,0	1,3	2,0	1,8	2,2	0,9
5	0,9	1,0	0,7	1,4	2,0	1,9	2,2	0,9
6	1,0	1,5	0,8	1,5	2,3	2,0	2,5	1,0
7	1,1	1,5	0,9	1,0	2,3	1,5	2,5	1,0
8	1,2	1,5	1,0	1,1	2,3	1,6	2,5	1,0
9	1,3	1,5	0,7	1,2	2,3	1,7	2,5	1,0
10	0,5	1,5	0,8	1,3	2,3	1,8	2,5	1,0
11	0,6	2,0	0,9	1,4	2,5	1,9	2,7	1,1
12	0,7	2,0	1,0	1,5	2,5	2,0	2,7	1,1
13	0,8	2,0	0,7	1,4	2,5	1,5	2,7	1,1
14	0,9	2,0	0,8	1,3	2,5	1,6	2,7	1,1
15	1,0	2,0	0,9	1,2	2,5	1,7	2,7	1,1

Таблица 2.14

Емкости конденсаторов в схемах (рис. 2.14, 2.15, 2.16)

Номер варианта	Емкости конденсаторов, мкФ						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1	0,5	0,1	0,15	0,3	0,5	0,2	0,1
2	0,5	0,1	0,20	0,3	0,6	0,25	0,2
3	0,6	0,1	0,25	0,3	0,7	0,3	0,3
4	0,6	0,1	0,15	0,3	0,8	0,35	0,4

Номер варианта	Емкости конденсаторов, мкФ						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
5	0,7	0,1	0,20	0,3	0,9	0,4	0,5
6	0,7	0,2	0,25	0,35	0,5	1,0	1,5
7	0,8	0,2	0,15	0,35	0,6	1,1	1,5
8	0,8	0,2	0,20	0,35	0,7	1,2	1,5
9	0,5	0,2	0,25	0,35	0,8	1,3	1,5
10	0,5	0,2	0,15	0,35	0,9	1,4	1,5
11	0,6	0,3	0,20	0,4	0,5	0,9	1,3
12	0,6	0,3	0,25	0,4	0,6	0,95	1,3
13	0,7	0,3	0,15	0,4	0,7	1,0	1,3
14	0,7	0,3	0,20	0,4	0,8	1,05	1,3
15	0,8	0,3	0,25	0,4	0,9	1,1	1,3

Отчет по п. 2.3.7 должен содержать: схему исследуемой цепи; подробный расчет полного сопротивления цепи; экспериментальное определение значения полного сопротивления; сравнение экспериментального и расчетного значений полного сопротивления цепи; вывод по результатам исследований.

2.4. Контрольные вопросы

1. Чем отличается переменный ток от постоянного?
2. Как связаны между собой действующее и амплитудное значения переменного тока?
3. Как рассчитать эквивалентную емкость последовательно и параллельно соединенных конденсаторов?

4. Как зависит сопротивление конденсатора от его емкости и частоты сигнала?
5. Полное сопротивление электрической цепи, содержащей резисторы и конденсаторы.
6. Как связано сопротивление катушки индуктивности с частотой сигнала и ее индуктивностью?
7. Полное сопротивление цепи, содержащей конденсаторы и катушки индуктивности.
8. Параллельный колебательный контур.
9. Последовательный колебательный контур.

2.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку; отчеты по п. 2.3.1 – 2.3.7; общие выводы по лабораторной работе.

2.6. Порядок защиты лабораторной работы

Для защиты лабораторной работы необходимо: предоставить преподавателю полностью оформленный отчет; ответить на контрольные вопросы; решить контрольную задачу;

В качестве контрольной задачи может быть предложен расчет токов, напряжений или сопротивлений простых (не более 5 – 7 элементов) цепей переменного тока. Расчет должен быть выполнен вручную, без использования программного обеспечения моделирования электронных схем.

Лабораторная работа №3

Исследование пассивных электронных фильтров

3.1. Цель работы:

1. Знакомство с электронными фильтрами состоящими из пассивных ЭРЭ;
2. Изучение параметров и характеристик электронных фильтров;
3. Исследование электронных фильтров.

3.2. Теоретическая справка

Фильтром называется устройство, устанавливаемое между выводами электрической цепи с целью изменения соотношения между частотами составляющими, проходящего через него сигнала.

3.2.1. Фильтр низкой частоты (ФНЧ)

Схема простейшего RC-ФНЧ и его амплитудно-частотная характеристика представлена на рис. 3.1.

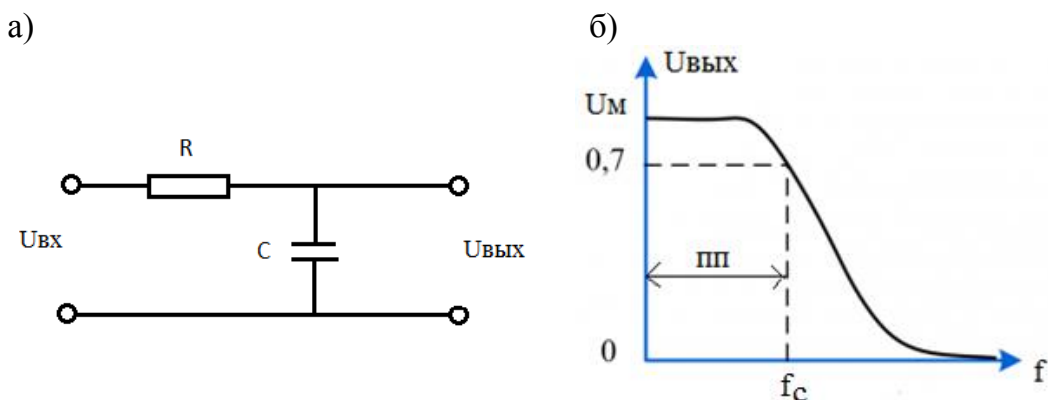


Рис. 3.1. Фильтр низкой частоты:

- а) принципиальная схема;
б) амплитудно-частотная характеристика

ФНЧ можно рассматривать как частотнозависимый делитель напряжения, коэффициент передачи напряжения которого зависит от частоты входного сигнала. По мере увеличения частоты сигнала реактивное сопротивление конденсатора уменьшается и выходное напряжение также уменьшается.

Частота f_c называется частотой среза фильтра, которая определяет границу его полосы пропускания (ПП). Частота среза определяется параметрами R и C:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} . \quad (3.1)$$

Крутизна (угол наклона правого участка) характеристики может быть увеличена за счет каскадного последовательного включения нескольких ФНЧ. В этом случае схема рис. 3.1, а является каскадом более сложного фильтра.

На рис. 3.2 представлена схема трехкаскадного ФНЧ. На вход второго каскада (R_2, C_2) сигнал поступает с выхода первого каскада (R_1, C_1).

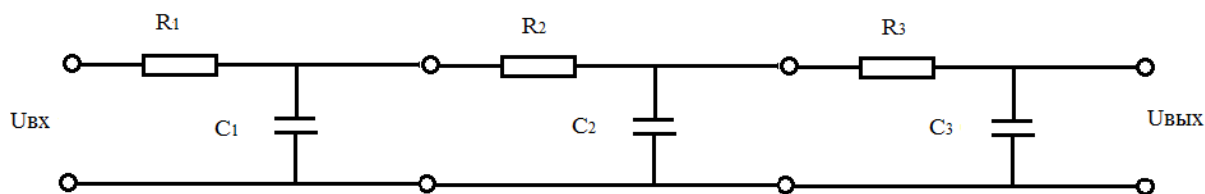


Рис. 3.2. Трехкаскадный фильтр низкой частоты

Выход второго каскада подключен ко входу третьего каскада (R_3, C_3).

3.2.2. Фильтр высокой частоты (ФВЧ)

Схемы простого RC-ФВЧ и его амплитудно-частотная характеристика показаны на рис. 3.3.

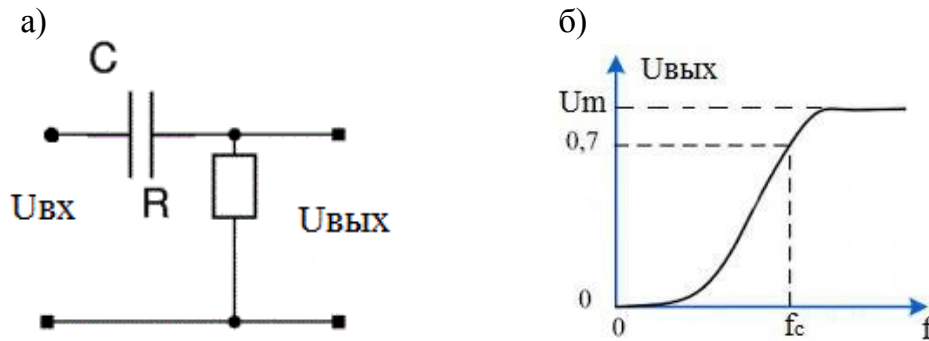


Рис. 3.3. Фильтр высокой частоты:

а) принципиальная схема;

б) амплитудно-частотная характеристика

На низких частотах сопротивление конденсатора большое, ток, протекающий по цепи, мал и падение напряжения на резисторе близко к нулю. По мере увеличения частоты сигнала значение тока, протекающего через резистор, увеличивается, и наблюдается рост выходного напряжения.

Частота среза определяется, как в случае ФНЧ, по формуле (3.1). Крутизна характеристики ФВЧ также может быть увеличена за счет каскадного включения нескольких фильтров (рис. 3.4). Фильтр состоит из двух каскадов.

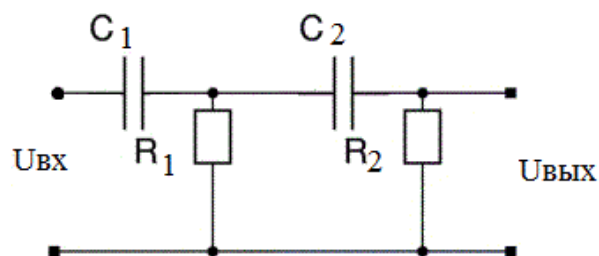


Рис. 3.4. Двухкаскадный фильтр высокой частоты

Выход первого каскада (C_1, R_1) подключается ко входу второго каскада (C_2, R_2).

3.2.3. Полосовой фильтр (ПФ)

Амплитудно-частотная характеристика ПФ представлена на рис. 3.5. Фильтр имеет две частоты среза f_{c1}, f_{c2} . Регулировка ширины полосы пропускания (ПП) может осуществляться за счет изменения значений f_{c1} и f_{c2} .

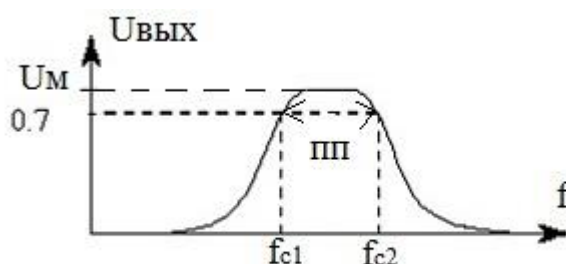


Рис. 3.5. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра

ПФ делятся на две группы: широкополосные ($f_{c2}/f_{c1} > 1,5$) и узкополосные ($f_{c2}/f_{c1} \leq 1,5$).

Широкополосный ПФ можно получить за счет последовательного включения ФНЧ и ФВЧ (рис. 3.6).

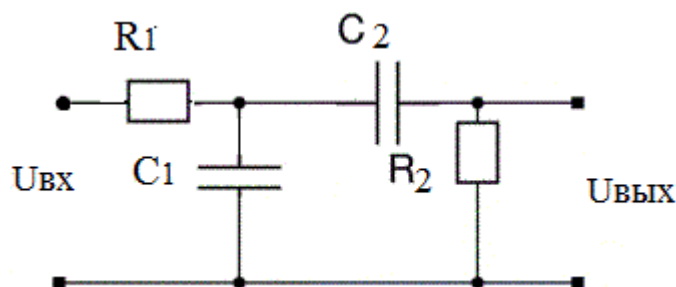


Рис. 3.6. Широкополосный полосовой фильтр

Частота f_{c1} определяется ФВЧ, f_{c2} – ФНЧ.

Для получения узкополосного фильтра может быть использовано последовательное включение параллельных и последовательных колебательных контуров (рис. 3.7).

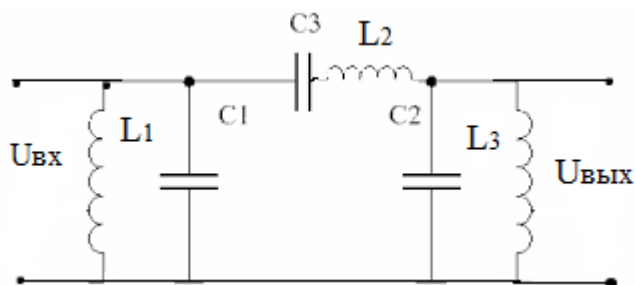


Рис. 3.7. Узкополосный полосовой фильтр

В схеме фильтра присутствуют два параллельных колебательных контура (L_1C_1, L_3C_3) и один последовательный колебательный контур (L_2C_2).

3.2.4. Режекторный фильтр (РФ)

Режекторный фильтр подавляет сигнал в определенной полосе частот (рис. 3.8).

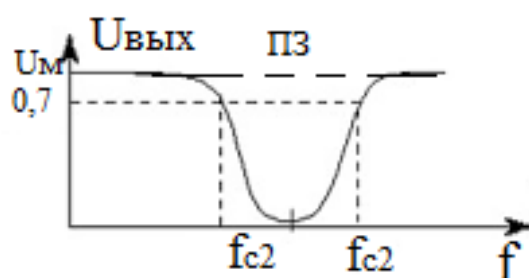


Рис. 3.8. Амплитудно-частотная характеристика режекторного фильтра

Полоса заграждения (ПЗ) сигнала РФ аналогична ПП полосового фильтра (рис. 3.9).

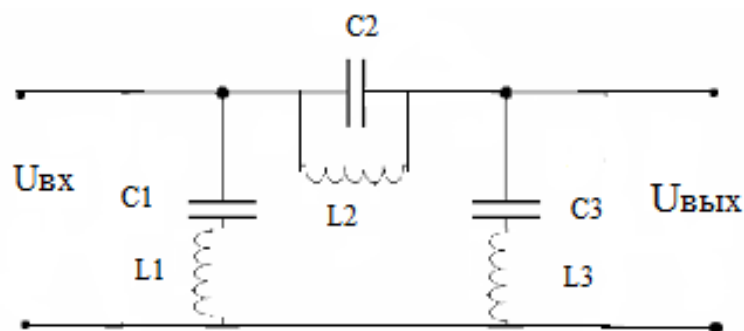


Рис. 3.9. Узкополосный режекторный фильтр

Широкополосный РФ может быть получен за счет суммирования сигналов ФНЧ и ФВЧ, узкополосный РФ – за счет последовательного включения последовательных и параллельных колебательных контуров, но противоположным ПФ образом (рис. 3.9).

3.2.5. Применение электронных фильтров в технике

Рассмотренные фильтры очень широко применяются в технических устройствах. Рассмотрим лишь некоторые примеры.

Пример 1. Сигнал от датчика температуры (термопары) передается к измерительному терминалу с помощью проводной линии связи, которая находится в зоне воздействия электромагнитных колебаний частотой 50 Гц (промышленные помехи). Частота изменения сигнала термопары не превышает долей герца. Поэтому, включив на входе потребителя сигнала ФНЧ, можно избавиться от промышленных помех.

Пример 2. В двухполосной акустической системе установлены два динамика: низкочастотный и высокочастотный. Причем для нормальной работы системы на высокочастотный динамик должны поступать только сигналы высоких частот. Поэтому высокочастотный динамик подключают к выходу ФВЧ.

Пример 3. Система радиуправления, например, подвижной моделью автомобиля может быть реализована на принципе частотного разделения сигналов управления (f_1 – движение вперед, f_2 – движение назад, f_3 – поворот направо, f_4 – поворот налево). Для создания сигналов частот f_1, f_2, f_3 и f_4 применяются генераторы.

На модели автомобиля установлен радиоприемник и четыре ПФ, настроенные на выделение частот f_1, f_2, f_3 и f_4 . Выходные сигналы ПФ используются для управления автомобилем.

Пример 4. РФ может использоваться для подавления помех в виде электрических колебаний фиксированной частоты. Так, в измерительной системе может быть использован РФ для подавления промышленных помех (частота 50 Гц).

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Исследование ФНЧ

Провести исследование ФНЧ (рис. 3.10). Параметры элементов схемы даны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры элементов схемы (рис. 3.10)

Номер варианта	U_m , В	R_g , Ом	R , Ом	C , мкФ	R_n , кОм
1	5	300	1000	0,1	100
2	10	350	800	0,2	150
3	15	400	1200	0,3	200
4	20	450	1500	0,4	250
5	25	500	2000	0,5	300
6	30	300	1700	0,6	350
7	5	350	1800	0,7	400
8	10	400	1000	0,8	100

Номер варианта	U_m , В	R_r , Ом	R , Ом	C , мкФ	R_n , кОм
9	15	450	850	0,9	150
10	20	500	1300	1,0	200
11	25	300	1700	0,9	250
12	30	350	2200	0,8	300
13	5	400	1300	0,7	350
14	10	450	2100	0,6	400
15	15	500	1400	0,5	100

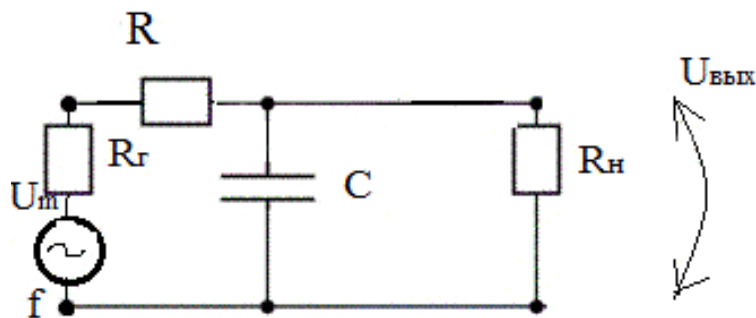


Рис. 3.10. Исследование простого ФНЧ

Фильтр низкой частоты (R , C) подключается к источнику переменного напряжения (генератору) U_m с внутренним сопротивлением R_r и к нагрузке, имеющей сопротивление R_n .

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 3.10);
2. Изменяя частоту сигнала генератора, снять зависимость выходного напряжения от частоты $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$, результаты занести в табл. 3.2.

Результаты исследования схемы (рис. 3.10)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

3. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$, определить по графику частоту среза фильтра f_c ;
4. Рассчитать значение частоты среза и сравнить его значение с экспериментальным значением f_c ;
5. Определить по графику зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$ крутизну характеристики фильтра $S_1 = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta f}$, изменение частоты Δf выбрать на падающем участке характеристики;
6. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 3.3.1 должен содержать: схему (рис. 3.10); заполненную таблицу 3.2; график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$; расчет f_0 ; сравнение экспериментального и расчетного значения частоты среза; экспериментальное значение крутизны характеристики фильтра S_1 ; выводы по результатам исследований.

3.3.2. Исследование двухкаскадного ФНЧ

Провести исследование двухкаскадного ФНЧ (рис. 3.11).

Параметры элементов схемы взять из табл. 3.1.

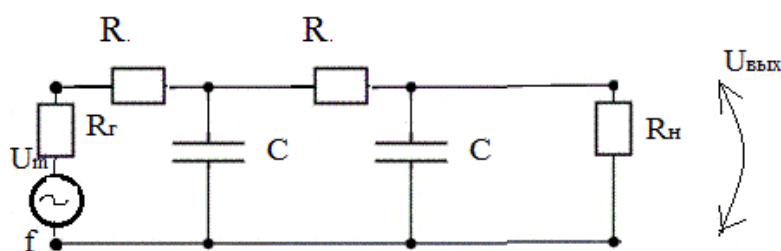


Рис. 3.11. Двухкаскадный ФНЧ

Порядок проведения эксперимента:

Построить схему (рис. 3.11);

1. Изменяя частоту сигнала генератора, снять зависимость выходного напряжения от частоты $U_{\text{вых}}=\varphi(f)$, результат занести в табл. 3.3;

Таблица 3.3

Результаты исследования схемы (рис. 3.11)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

2. Построить график зависимости $U_{\text{вых}}=\varphi(f)$;

3. Определить по графику зависимости $U_{\text{вых}}=\varphi(f)$ крутизну характеристики фильтра S_2 (аналогично п. 3.3.1);

4. Сравнить значения S_1 и S_2 ;

5. Сделать выводы по результатам исследования.

Отчет по п. 3.3.2 должен содержать: схему (рис. 3.11); заполненную таблицу 3.3; график зависимости $U_{\text{вых}}=\varphi(f)$; экспериментальное значение крутизны характеристики S_2 и сравнение его с S_1 ; выводы по результатам исследований.

3.3.3. Исследование трехкаскадного ФНЧ

Провести исследование трехкаскадного ФНЧ (рис. 3.12). Параметры элементов взять из табл. 3.1.

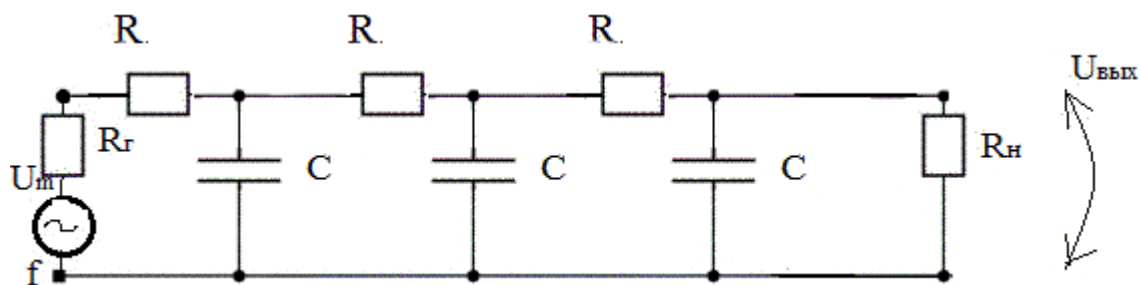


Рис. 3.12. Трехкаскадный ФНЧ

Порядок проведения эксперимента аналогичен п. 3.3.2. Результаты исследования занести в табл. 3.4. По графику зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$ определить крутизну характеристики фильтра S_3 и сравнить все три значения (S_1, S_2 и S_3) между собой. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 3.3.3 должен содержать: схему (рис. 3.12.); заполненную таблицу 3.4; график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$; экспериментальное значение крутизны характеристики S_3 и сравнение его с S_1 и S_2 ; выводы по результатам исследований.

Таблица 3.4

Результаты исследования схемы (рис. 3.12)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

3.3.4. Исследование простого ФВЧ

Провести исследование простого ФВЧ (рис. 3.13). Параметры элементов взять из табл. 3.1.

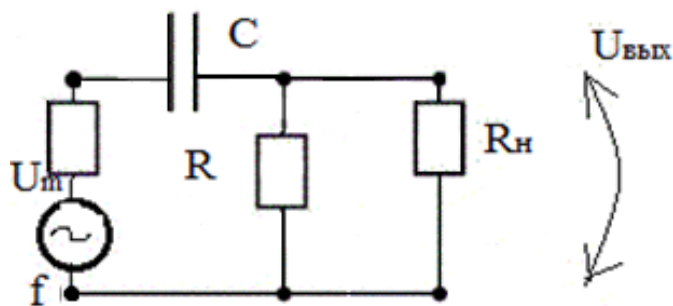


Рис. 3.13. Исследование простого ФВЧ

Порядок проведения исследований и требования к отчету аналогичны п. 3.3.1. Результаты исследований занести в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Результаты исследования схемы (рис. 3.13)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

3.3.5. Исследование двухкаскадного ФВЧ

Провести исследование двухкаскадного ФВЧ (рис. 3.14). Параметры элементов взять из табл. 3.1.

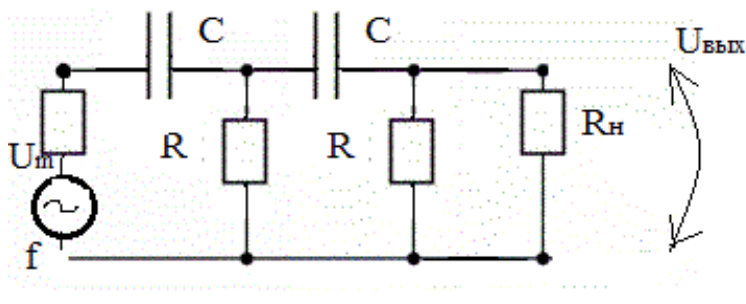


Рис. 3.14. Двухкаскадный ФВЧ

Порядок проведения исследований и требования к отчету аналогичны п. 3.3.2. Результаты исследований занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Результаты исследования схемы (рис. 3.14)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

3.3.6. Исследование трехкаскадного ФВЧ

Провести исследование трехкаскадного ФВЧ (рис. 3.15). Параметры схемы взять из табл. 3.1.

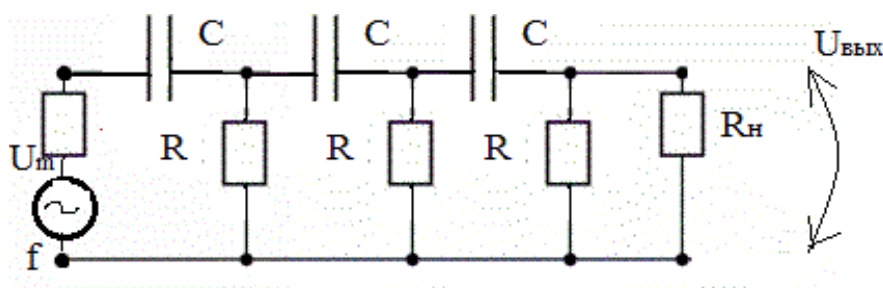


Рис. 3.15. Трехкаскадный ФВЧ

Порядок проведения исследований и требования к отчету аналогичны п. 3.3.2. Результаты исследований занести в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Результаты исследования схемы (рис. 3.15)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

3.3.7. Исследование широкополосного ПФ

Провести исследование широкополосного ПФ (рис. 3.16).
Параметры элементов схемы даны в табл. 3.8.

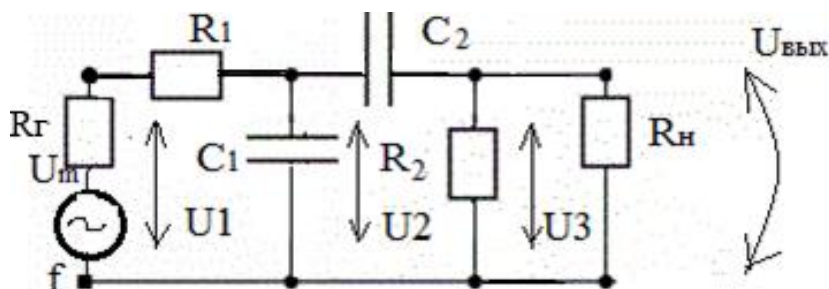


Рис. 3.16. Широкополосный ПФ

Таблица 3.8

Параметры элементов схемы (рис. 3.16)

Номер варианта	$U_m, \text{В}$	$R_r, \text{Ом}$	$R_1, \text{кОм}$	$C_1, \text{мкФ}$	$C_2, \text{мкФ}$	$R_2, \text{кОм}$	$R_n, \text{кОм}$
1	1	200	1	0,2	0,8	1	100
2	5	600	1,5	0,15	0,75	1,2	150
3	2	2500	0,8	0,22	0,75	1,1	200
4	3	400	1,2	0,18	0,65	0,9	250
5	4	650	1,1	0,19	0,6	0,95	300
6	8	350	0,75	0,35	1,1	1	350
7	6	450	0,85	0,3	1,2	1,3	400
8	5	300	0,7	0,37	1,4	1,15	450
9	3	650	1,3	0,15	0,9	1,25	500
10	10	800	1,4	0,14	0,85	0,93	100
11	7	750	1,35	0,15	0,95	0,87	200
12	9	350	1,45	0,13	0,75	0,85	300
13	2	800	1,55	0,12	0,8	0,91	400
14	1	850	1,6	0,1	0,65	1,15	500
15	10	400	1,75	0,17	0,82	1,18	600

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 3.16);
2. Снять зависимость напряжений $U_1, U_2, U_3 = U_{\text{вых}}$ от частоты сигнала генератора $U_1 = \varphi_1(f), U_2 = \varphi_2(f), U_3 = \varphi_3(f)$; результаты занести в табл. 3.9;

Таблица 3.9

Результаты исследований схемы (рис. 3.16)

f, Гц	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	K_1	K_2	K_Φ

3. Определить коэффициенты передачи напряжений
ФНЧ –

$$K_1 = U_2 / U_1;$$

ФВЧ –

$$K_2 = U_3 / U_2;$$

Исследуемого ПФ –

$$K_\Phi = K_1 * K_2;$$

4. Для трех произвольно выбранных значений f (табл. 3.9) рассчитать $U_1, U_2, U_3, K_1, K_2, K_\Phi$, результаты занести в табл. 3.10;

Таблица 3.10

Результаты расчета передаточных функций схемы (рис. 3.16)

f, Гц	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	K_1	K_2	K_Φ
f_1						
f_2						
f_3						

5. Сравнить расчетные и экспериментальные значения, сделать выводы;

6. Построить графики зависимостей $K_1 = \varphi_1(f)$, $K_2 = \varphi_2(f)$, $K_\phi = \varphi_3(f)$; результаты представить на одном рисунке;

7. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi_4(f)$;

8. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет должен содержать схему (рис. 3.16); заполненные табл. 3.9, 3.10; подробный расчет $U_1, U_2, U_3, K_1, K_2, K_\phi$; графики зависимостей $K_1 = \varphi_1(f)$, $K_2 = \varphi_2(f)$, $K_\phi = \varphi_3(f)$, $U_{\text{вых}} = \varphi_4(f)$; выводы по результатам исследований.

3.3.8. Исследование узкополосного ПФ

Провести исследование узкополосного ПФ (рис. 3.17).

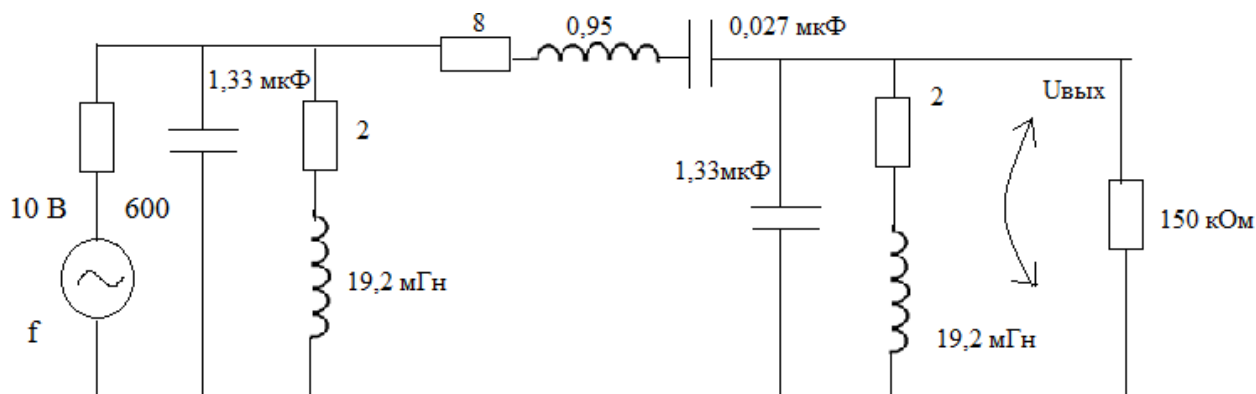


Рис. 3.17. Узкополосный ПФ

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 3.17);
2. Изменяя частоту генератора, снять зависимость выходного напряжения от частоты $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$, результат занести в табл. 3.11;

Таблица 3.11

Результаты исследования схемы (рис. 3.17)

Частота сигнала f , Гц	Выходное напряжение фильтра $U_{\text{вых}}$, В

3. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$;
4. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 3.3.8 должен содержать: схему (рис. 3.17); заполненную таблицу 3.11; график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$; выводы по результатам эксперимента.

3.3.9. Исследование узкополосного РФ

Провести исследование узкополосного РФ (рис. 3.18).

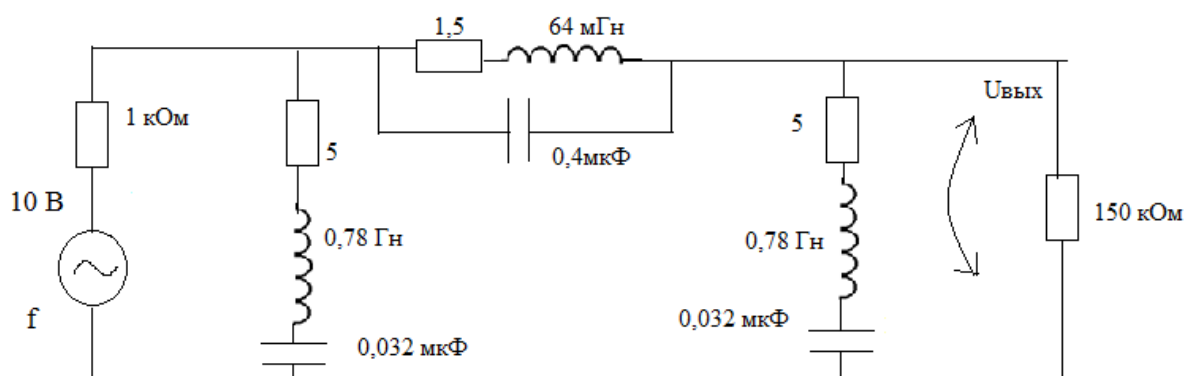


Рис. 3.18. Узкополосный РФ

Порядок проведения исследований и требования к отчету аналогичны п. 3.3.8.

3.4. Контрольные вопросы

1. Что такое электронный фильтр?
2. Схема простейшего ФНЧ.

3. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ.
4. Что такое частоты среза и полосы пропускания фильтра?
5. Формула для расчета частоты среза ФНЧ.
6. От чего зависит крутизна характеристики фильтра?
7. Схема простейшего ФВЧ.
8. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ.
9. Схема широкополосного ПФ.
10. Амплитудно-частотная характеристика ПФ.
11. Узкополосный ПФ.
12. Режекторный фильтр.
13. Амплитудно-частотная характеристика РФ.
14. Приведите примеры использования в технике электронных фильтров.

3.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку; отчеты по п. 3.3.1 – 3.3.9; общие выводы по лабораторной работе.

3.6. Порядок защиты лабораторной работы

Для защиты зачета по лабораторной работе необходимо предоставить преподавателю полностью оформленный ответ, ответить на контрольные вопросы, выполнить контрольное задание.

В качестве контрольного задания может быть предложен расчет простейшей RC-цепи на переменном токе.

Лабораторная работа №4

Исследование полупроводниковых диодов

4.1. Цель работы:

1. Знакомство с полупроводниковыми диодами, их параметрами и характеристиками;
2. Изучение теоретических основ полупроводниковых диодов;
3. Исследование полупроводниковых диодов.

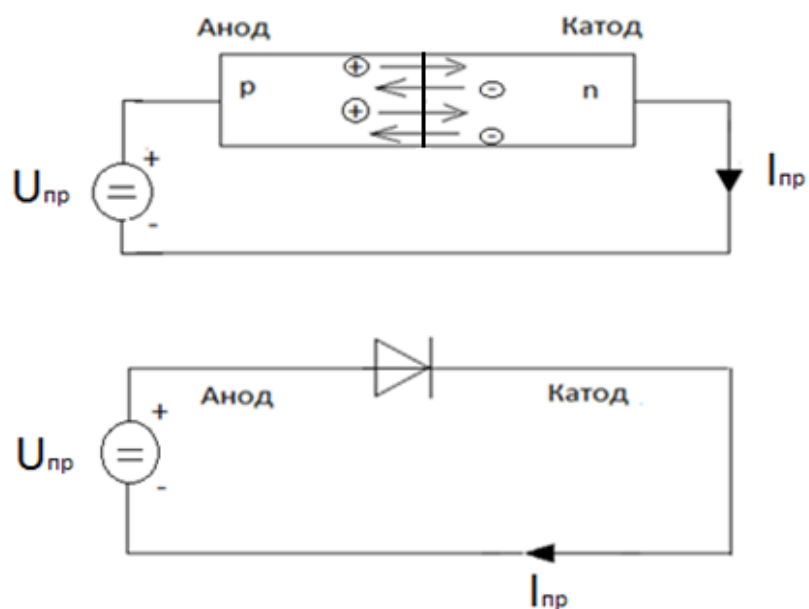
4.2. Теоретическая справка

4.2.1. P-n-переход

Диод – это полупроводниковый прибор, проводящий ток только в одном направлении – от анода к катоду.

Согласно представлениям современной физики, односторонняя проводимость диода объясняется следующим образом (рис. 4.1):

а)



б)

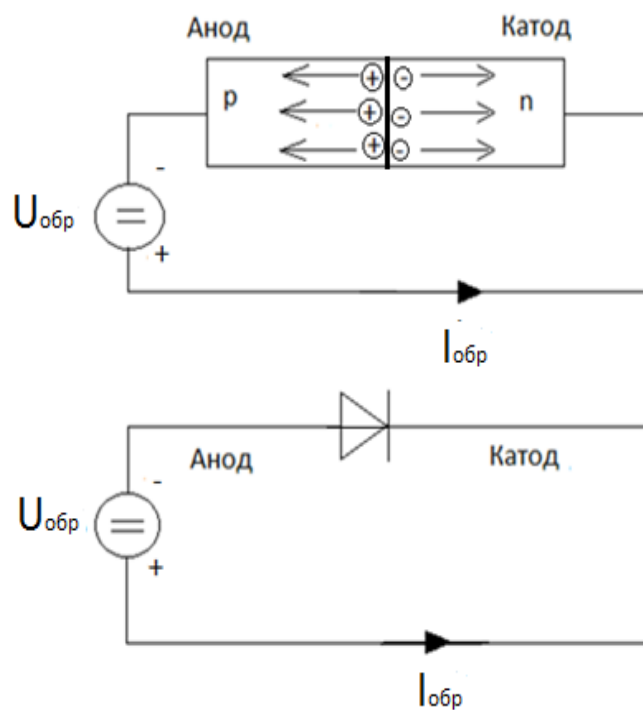


Рис. 4.1. Подключение диода к источнику постоянного напряжения:

- а) прямое смещение;
- б) обратное смещение

Основу диода составляет р-п-переход (область соприкосновения полупроводников с дырочной (р) и электронной (n) проводимостями; в области р-типа атомы имеют положительный заряд (нехватка электронов)).

Электронные вакансии в атомах называются дырками. Считается, что дырки имеют положительный заряд. В n области наблюдается избыток электронов имеющих отрицательный заряд.

При прямом смещении р-п-переход (рис. 4.1, а) электроны движутся к положительному полюсу, дырки – к отрицательному. Через диод протекает прямой ток $I_{пр}$ (диод открыт).

В случае обратного смещения р-п-перехода (рис. 4.1, б) диод закрывается (область р-п-перехода освобождается от носителей заряда). Через диод протекает очень малый ток $I_{обр} \ll I_{пр}$.

4.2.2. Вольт-амперная характеристика диода

На рис. 4.2 представлена типовая вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода.

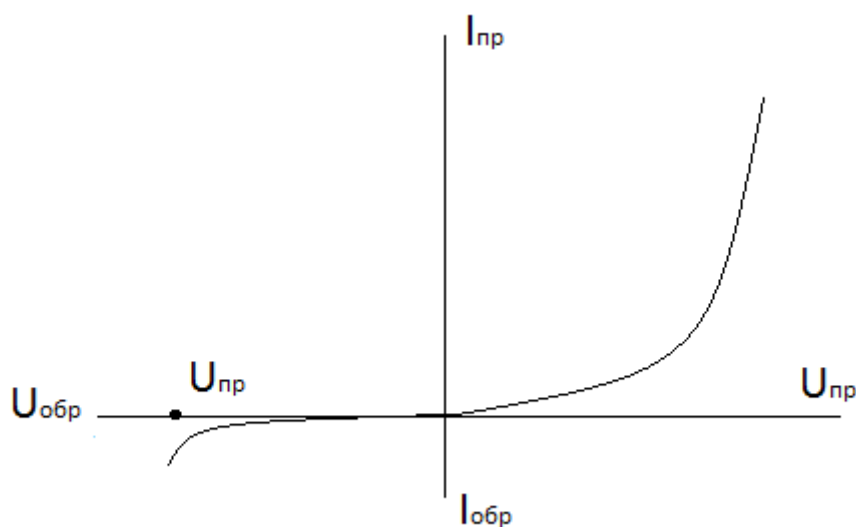


Рис. 4.2. ВАХ полупроводникового диода

Прямая ветвь ВАХ описывается экспоненциальной функцией. ВАХ диода зависит от температуры:

$$\frac{\partial U_{\text{пр}}}{\partial t} \approx - \frac{2 \text{ мВ}}{^{\circ}\text{C}},$$

при $I_{\text{пр}} = \text{const.}$

Если прямой ток имеет постоянную величину, то при увеличении температуры на один градус, прямое напряжение уменьшается приблизительно на 2 мВ.

Обратный ток слабо увеличивается при росте обратного напряжения. При определенном значении обратного напряжения ($U_{\text{пр}}$) наступает пробой диода.

4.2.3. Стабилитрон

Стабилитрон – это специальный диод, предназначенный для стабилизации напряжения.

Обратная ветвь ВАХ стабилитрона имеет участок с большой крутизной (рис. 4.3)

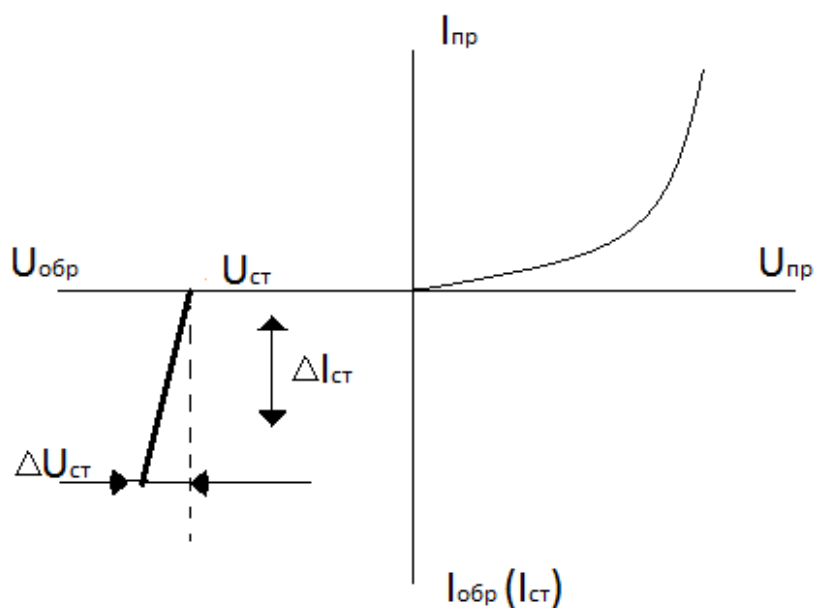


Рис. 4.3. ВАХ стабилитрона

При воздействии обратного напряжения стабилитрон закрыт до тех пор, пока $U_{обр}$ не достигнет значения напряжения стабилизации $U_{ст}$. При $U_{обр} \geq U_{ст}$ стабилитрон открыт, через него протекает обратный ток – ток стабилизации $I_{ст}$. При этом $U_{ст}$ остается почти постоянной величиной. Однако, $U_{ст}$, хотя и в малой степени, зависит от $I_{ст}$ и температуры.

Дифференциальные сопротивления стабилитрона

$$R_d = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$$

показывает, насколько изменяется напряжение стабилизации при заданном изменении тока стабилизации.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$\alpha_{ст} = \frac{U_{ст2} - U_{ст1}}{t_2 - t_1},$$

где $U_{ст1}$ – напряжение стабилизации при температуре t_1 (начальное значение); $U_{ст2}$ – напряжение стабилизации при температуре t_2 (конечное значение); показывает степень чувствительности данного параметра к температуре.

Прямая ветвь ВАХ у стабилитрона аналогична соответствующей ВАХ диода.

4.2.4. Диодные ограничители напряжения

Принцип действия диодных ограничителей напряжения основан на том, что прямое напряжение диода не может превышать некоторого предельного значения (0,3...1,5 В в зависимости от типа диода) и его можно, с некоторой степенью приближения, считать

постоянной величиной. В состав ограничителей напряжения могут входить и стабилитроны.

На рис. 4.4, а показана схема простого диодного ограничителя напряжения и временная характеристика его работы (рис. 4.4, б).

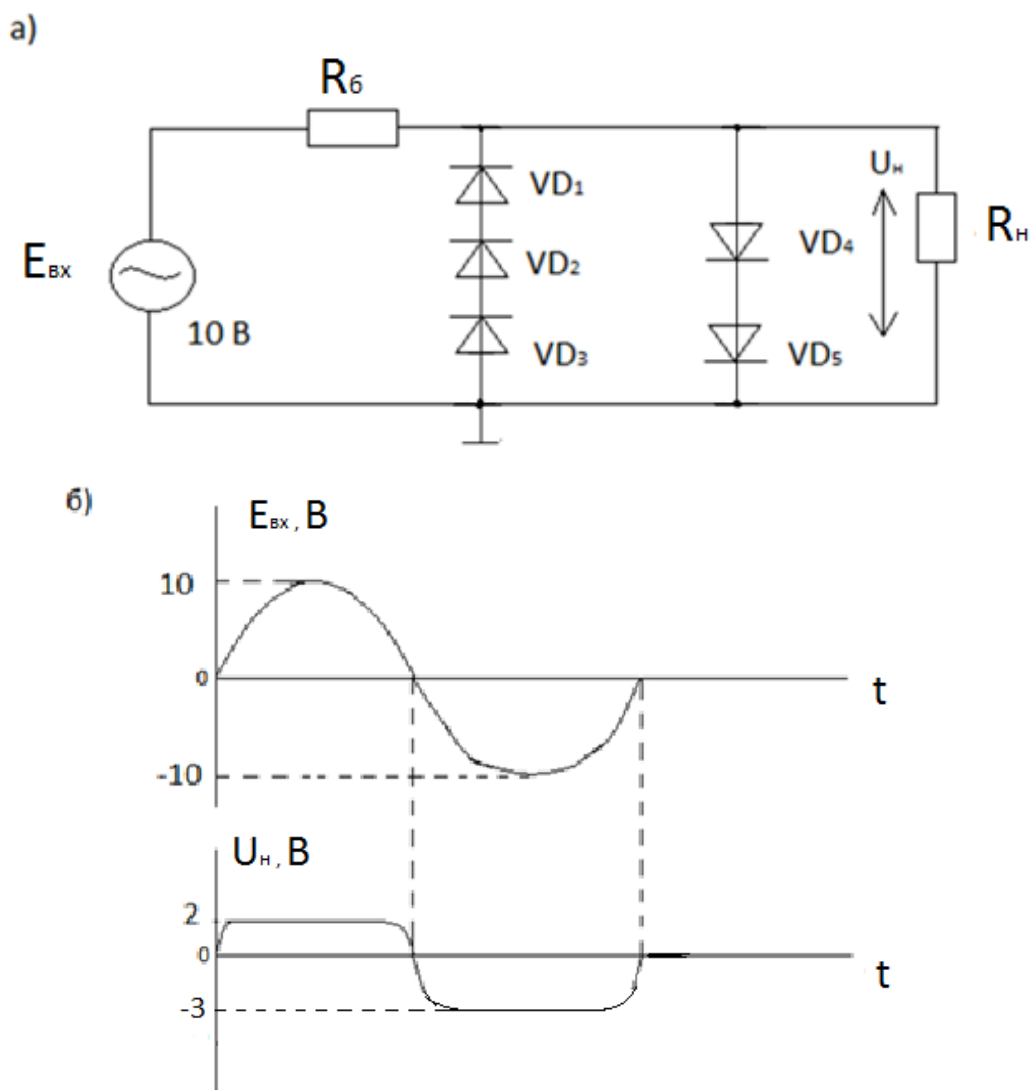


Рис. 4.4. Простой диодный ограничитель напряжения:

а) принципиальная схема;

б) временная диаграмма

Пусть для всех диодов $U_{пр} = 1$ В. Тогда в положительную полуволну $E_{вх}$ (положительное напряжение относительно земли) диоды VD_1 , VD_2 , VD_3 закрыты, и ток протекает только через открытые диоды VD_4 , VD_5 и через $R_н$.

Так как ток протекает через два последовательно включенных диода, максимальное значение $U_H = 2$ В.

В отрицательную полуволну E_{BX} (отрицательные напряжения относительно земли) диоды VD_4 , VD_5 закрыты, а VD_1 , VD_2 , VD_3 – открыты. Ток протекает через три последовательно включенных диода и $U_H = 3$ В.

На рис. 4.5, а представлена схема ограничителя напряжения, состоящего из диодов и стабилитрона. Временная диаграмма работы дана на рис. 4.5, б.

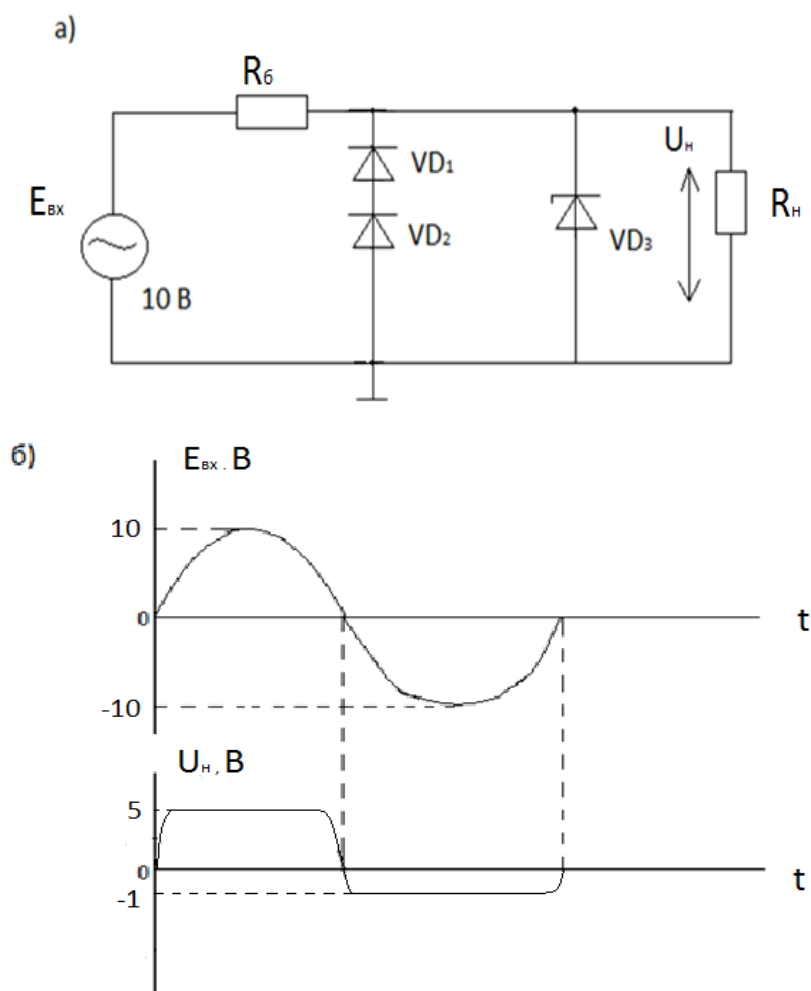


Рис. 4.5. Ограничитель напряжения, состоящий из диодов и стабилитрона:

- а) принципиальная схема;
- б) временная диаграмма

Пусть прямое напряжение для всех элементов равно 1 В, а напряжение стабилизации для VD_3 равно 5 В. В положительную полуволну $E_{вх}$ диоды VD_1 и VD_2 закрыты, стабилитрон VD_3 при напряжении 5 В открывается и рост U_H прекращается. В отрицательную полуволну для всех диодов VD_1 , VD_2 и VD_3 напряжение является прямым. Так как прямое напряжение ни на каком из элементов не может превысить 1 В, то U_H ограничивается на уровне 1 В.

4.3. Порядок выполнения работы

4.3.1. Исследование ВАХ диода

Снять ВАХ диода. Схема для исследования приведена на рис. 4.6. Требуется выполнить эксперимент три раза для температур t_1 , t_2 и t_3 (табл. 4.1).

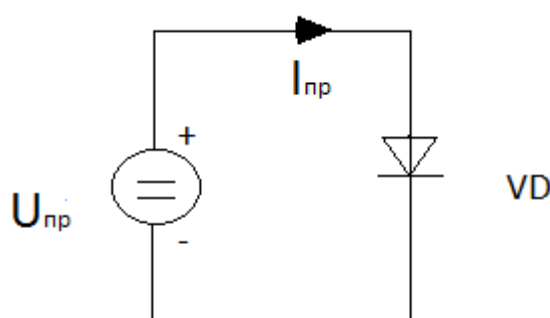


Рис. 4.6. Схема для снятия ВАХ диода

Таблица 4.1

Значения температур для снятия ВАХ диода

Номер варианта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$
1	-20	10	35
2	-10	25	50
3	-25	5	35
4	-30	18	40
5	-15	27	35

Окончание таблицы 4.1

Номер варианта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$
6	-12	20	45
7	-27	27	55
8	-18	18	35
9	-22	25	48
10	-17	19	37
11	-35	27	50
12	-32	27	40
13	-27	27	38
14	-15	23	44
15	-22	16	39

Порядок выполнения исследований:

Построить схему (рис. 4.6), выбрать диод D74;

1. Задать температуру t_1 ;
2. Плавнo увеличивая значение $U_{\text{пр}}$, снять зависимость $I_{\text{пр}}$ от $U_{\text{пр}}$, результаты занести в таблицу 4.2. Максимальное значение $I_{\text{пр}}$ не должно превышать 0,2 А.

Таблица 4.2

Результаты исследования ВАХ диода при температуре t_1

Номер опыта	Прямое напряжение $U_{\text{пр}}, \text{мВ}$	Прямой ток $I_{\text{пр}}, \text{мА}$
1		

3. Повторить эксперимент для температуры t_2 , результаты занести в таблицу 4.3;

Таблица 4.3

Результаты исследования ВАХ диода при температуре t_2

Номер опыта	Прямое напряжение $U_{\text{пр}}$, мВ	Прямой ток $I_{\text{пр}}$, мА
1		

4. Повторить эксперимент для температуры t_3 , результаты занести в таблицу 4.4;

Таблица 4.4

Результаты исследования ВАХ диода при температуре t_3

Номер опыта	Прямое напряжение $U_{\text{пр}}$, мВ	Прямой ток $I_{\text{пр}}$, мА
1		

5. Представить на одном рисунке графики зависимости $I_{\text{пр}} = F(U_{\text{пр}})$ для трех значений температур;

6. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 4.3.1 должен содержать: схему (рис. 4.6); заполненные таблицы 4.2, 4.3, 4.4; ВАХ диода при трех значениях температур; выводы по результатам исследований.

4.3.2. Исследование диодного датчика температуры

Провести исследование диодного датчика температуры (рис. 4.7). Для создания постоянного значения тока $I_{\text{пр}}$ используется источник тока ($U_{\text{и}}, R_{\text{и}}$)

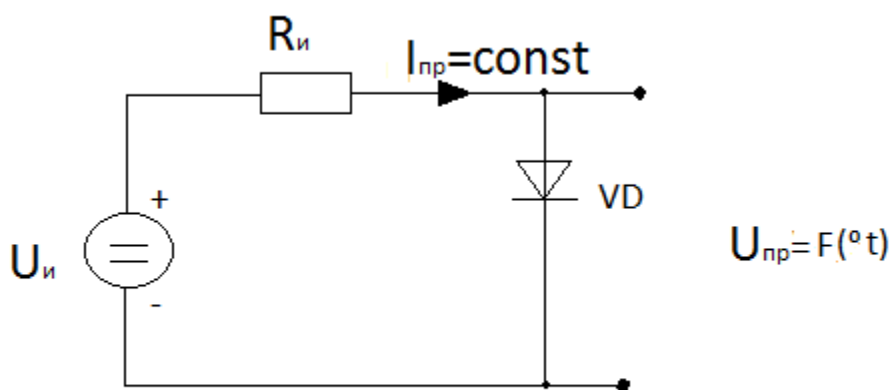


Рис. 4.7. Диодный датчик температуры

За счет высокого сопротивления $R_{и}$ величина $I_{пр}$ остается постоянной.

Параметры элементов источника тока приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Значения $U_{и}$, $R_{и}$ в схеме (рис. 4.7)

Номер варианта	Напряжение $U_{и}$, В	Сопротивление $R_{и}$, кОм
1	500	500
2	800	450
3	600	400
4	900	550
5	1000	450
6	400	400
7	650	520
8	950	650
9	850	500
10	500	650
11	630	470
12	1000	650
13	1000	800
14	700	630
15	750	510

Таблица 4.6

Зависимость прямого напряжения диода (рис. 4.7) от температуры

Номер ответа	Температура, °C	Прямое напряжение, мВ

Порядок выполнения исследований:

1. Построить схему (рис. 4.7), выбрать диод D74;
2. Изменяя температуру в заданном диапазоне от t_1 до t_3 (таблица 4.1), снять зависимость $U_{пр} = \varphi(^{\circ}t)$, результаты занести в (таблицу 4.6);
3. Построить график зависимости $U_{пр} = \varphi(^{\circ}t)$;
4. Определить чувствительность датчика температуры $S = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta t}$ в трех произвольно выбранных областях характеристики $U_{пр} = \varphi(^{\circ}t)$;
5. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 4.3.2 должен содержать: схему (рис. 4.7); заполненную таблицу 4.6; график зависимости $U_{пр} = \varphi(^{\circ}t)$; экспериментальные значения чувствительности датчика температуры; выводы по результатам исследований.

4.3.3. Определить напряжение стабилизации стабилитрона

Схема для проведения исследований представлена на рис. 4.8.

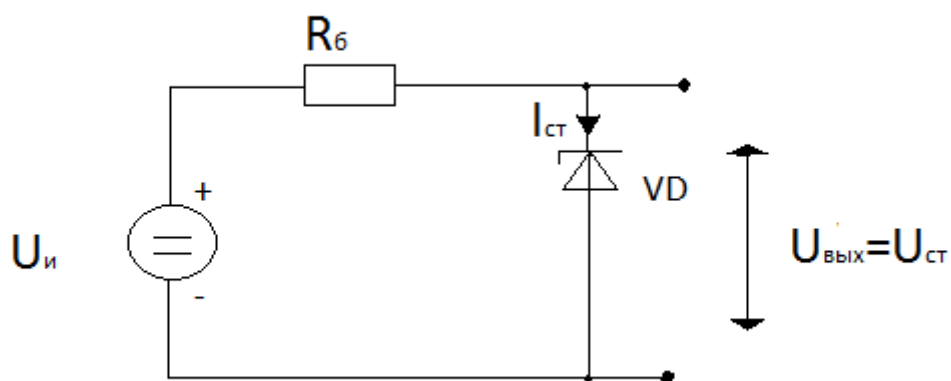


Рис. 4.8. Схема для определения напряжения стабилизации стабилитрона

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 4.8), задать температуру 27°C, значение $R_б$ взять из таблицы 4.7;

Таблица 4.7

Значение $R_б$ в схеме (рис. 4.8)

Номер варианта	Значение $R_б$, Ом	Номер варианта	Значение $R_б$, Ом	Номер варианта	Значение $R_б$, Ом
1	680	6	650	11	710
2	710	7	850	12	900
3	560	8	560	13	560
4	620	9	680	14	710
5	650	10	710	15	580

2. Выбрать стабилитрон: 1N752 (варианты 1, 6, 11); 1N3491 (варианты 2, 7, 12); 1N4729 (варианты 3, 8, 13); 1N4737 (варианты 4, 9, 14); 1N4742 (варианты 5, 10, 15);

3. Плавно увеличивая напряжение $U_и$ снять зависимость $U_{вых} = \varphi(U_и)$, результаты занести в таблицу 4.8.

Таблица 4.8

Взаимосвязь входного и выходного напряжения схемы (рис. 4.8)

Входное напряжение $U_{\text{и}}, \text{В}$	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}, \text{В}$	Ток стабилизации $I_{\text{ст}}, \text{мА}$

4. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi_1(U_{\text{и}})$;
5. Оценить значение напряжения стабилизации исследуемого стабилитрона $U_{\text{ст}}$;
6. Построить график зависимости $U_{\text{ст}} = \varphi_2(I_{\text{ст}})$;
7. Изменяя $U_{\text{и}}$ установить на выходе схемы (рис. 4.8) оценочные значения напряжения стабилизации $U_{\text{ст}}$;
8. Изменяя температуру в интервале от t_1 до t_3 (таблица 4.1), снять зависимость напряжения стабилизации от температуры, результаты занести в таблицу 4.9;

Таблица 4.9

Зависимость напряжения $U_{\text{вых}}$ в схеме (рис. 8) от температуры

Температура, °С	Напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}, \text{В}$	Температура, °С	Напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}, \text{В}$

9. Построить график зависимости $U_{\text{ст}} = \varphi_3(t)$;
 10. Сделать выводы по результатам исследований.
- Отчет по п. 4.3.3. должен содержать: схему (рис. 4.8); заполненные таблицы 4.8 и 4.9; графики зависимостей $U_{\text{вых}} = \varphi_1(U_{\text{и}})$, $U_{\text{ст}} = \varphi_2(I_{\text{ст}})$, $U_{\text{ст}} = \varphi_3(t)$; выводы по результатам исследований.

4.3.4. Определить дифференциальное сопротивление стабилитрона

Порядок проведения исследований:

1. По результатам полученным в п. 4.3.3 (таблица 4.8) определить три значения дифференциального сопротивления стабилитрона R_d в начале, в середине и в конце участка стабилизации (характеристики $U_{ст}=\varphi_1(U_{и})$ и $U_{ст}=\varphi_2(I_{ст})$), результаты занести в таблицу 4.10.

Таблица 4.10

Дифференциальное сопротивление стабилитрона при различных значениях тока стабилизации

Ток стабилизации $I_{ст}$, мА	Дифференциальное сопротивление R_d , Ом

Построить график зависимости $R_d = \varphi_1(I_{ст})$;

2. В схеме (рис. 4.8) установить значение R_6 согласно таблице 4.7, подобрать такое значение $U_{и}$, чтобы $I_{ст} \approx 20$ мА;

3. Задать температуру $+27^\circ\text{C}$;

4. Занести значение R_6 , $I_{ст}$, $U_{ст}$ в таблицу 4.11;

Таблица 4.11

Определение дифференциального сопротивления стабилитрона при температуре $+27^\circ\text{C}$

R_6 , Ом	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА

5. Измерить $I_{ст}$, $U_{ст}$ при увеличении сопротивления резистора R_6 в два раза, результаты занести в таблицу 4.11;

6. Выполнить аналогичные измерения для температуры -30°C , результаты занести в таблицу 4.12;

Таблица 4.12

Определение дифференциального сопротивления стабилитрона при температуре -30°C

R_6 , Ом	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА

7. Повторить исследование для температуры $+60^{\circ}\text{C}$, результаты занести в таблицу 4.12;

Таблица 4.13

Определение дифференциального сопротивления стабилитрона при температуре $+60^{\circ}\text{C}$

R_6 , Ом	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА

8. Рассчитать значение дифференциального сопротивления стабилитрона для температур -30°C , $+27^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$, результаты свести в таблицу 4.14;

Таблица 4.14

Дифференциальное сопротивление стабилитрона при различных температурах

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Дифференциальное сопротивление R_d , Ом
-30°C	
$+27^{\circ}\text{C}$	
$+60^{\circ}\text{C}$	

9. Построить график зависимости $R_d = \varphi_2(^{\circ}t)$;
10. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 4.3.4 должен содержать: расчет дифференциального сопротивления стабилитрона по данным таблиц 4.8, 4.11, 4.12, 4.13; заполненные таблицы (4.11 – 4.13) и подробный расчет значений R_d для каждой из температур; графики зависимостей $R_d = \varphi_1(I_{ст})$, $R_d = \varphi_2(^{\circ}t)$; выводы по результатам исследований.

4.3.5 Определение дифференциального сопротивления составного стабилитрона

Определить дифференциальное сопротивление составного стабилитрона. Под составным стабилитроном понимается последовательное включение двух и более стабилитронов. При этом напряжение стабилизации составного стабилитрона равняется сумме напряжений стабилизации составляющих его стабилитронов

Порядок проведения исследований:

1. В схеме (рис. 4.8) установить значение $U_{и} \geq U_{ст}$, где $U_{ст}$ – напряжение стабилизации исследуемого стабилитрона (температура $+27^{\circ}\text{C}$);
2. Подобрать такое значение сопротивления $R_{б}$, чтобы $I_{ст} \approx 30 \text{ мА}$;
3. Занести значения $R_{б}$, $U_{ст}$, $I_{ст}$ в таблицу 4.15;

Таблица 4.15

Определение дифференциального сопротивления одиночного стабилитрона

$R_{б}, \text{ Ом}$	$U_{ст}, \text{ В}$	$I_{ст}, \text{ мА}$

4. Увеличить значение R_6 в два раза, занести значение R_6 , $U_{ст}$, $I_{ст}$ в таблицу 4.15;

5. Добавить в исследуемую схему второй такой же стабилитрон (рис. 4.9);

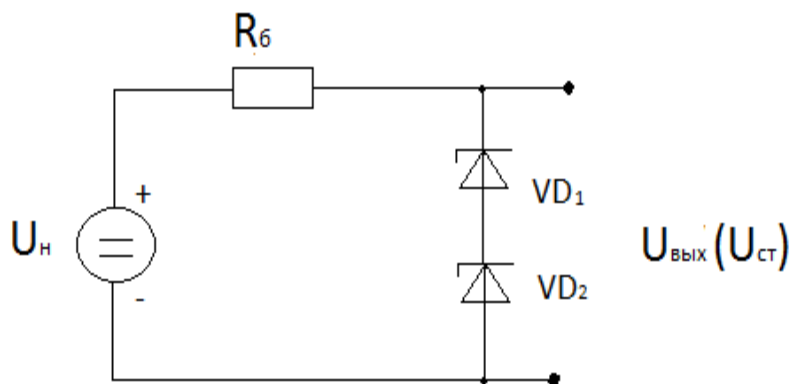


Рис. 4.9. Исследование составного стабилитрона, состоящего из двух элементов

6. Повторить исследование для схемы (рис. 4.9), результаты занести в таблицу 4.16;

7. Добавить в схему (рис. 4.9) третий такой же стабилитрон (рис. 4.10);

Таблица 4.16

Определение дифференциального сопротивления двух последовательно включенных стабилитронов

R_6 , Ом	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА

8. Повторить исследование для схемы (рис. 4.10), результаты занести в таблицу 4.17;

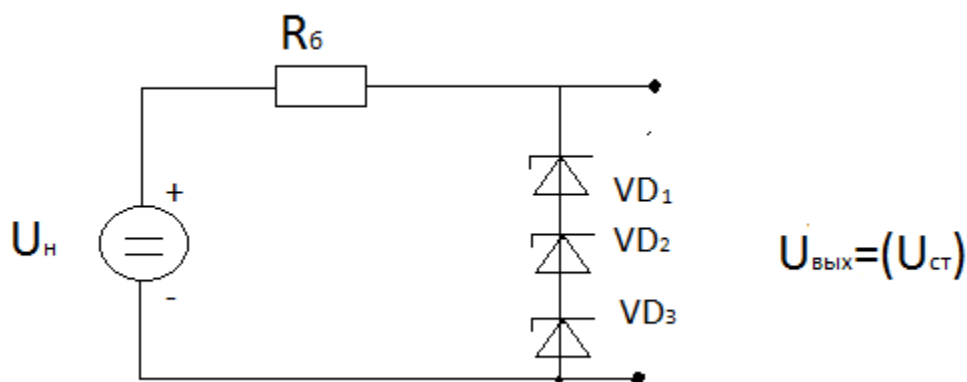


Рис. 4.10. Исследование составного стабилизатора состоящего из трех элементов

Таблица 4.17

Определение дифференциального сопротивления трех последовательно соединенных стабилизаторов

R_b , Ом	$U_{\text{ст}}$, В	$I_{\text{ст}}$, мА

9. Рассчитать значение дифференциального сопротивления для стабилизаторов в схеме (рис. 4.8, 4.9, 4.10);

10. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 4.3.5 должен содержать: схемы (рис. 4.8, 4.9, 4.10); заполненные таблицы 4.15, 4.16, 4.17; расчет дифференциальных сопротивлений стабилизаторов; выводы по результатам исследований.

4.3.6. Исследование диодного ограничителя напряжения

Исследовать диодный ограничитель напряжения, рис. 4.11 (варианты 1 – 5), рис. 4.12 (варианты 6 – 10), рис. 4.13 (варианты 11 – 15), параметры элементов даны в таблице 4.18.

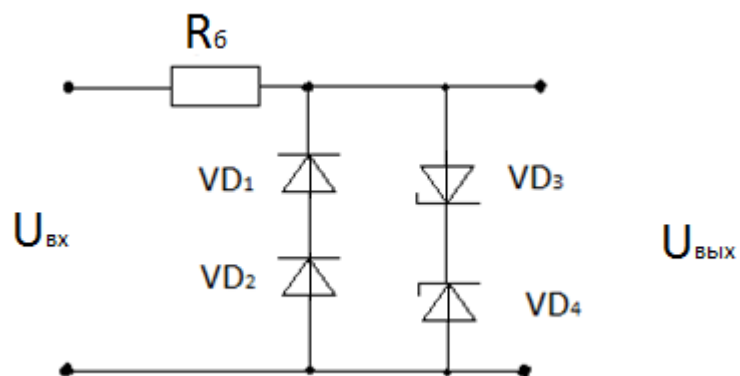


Рис. 4.11. Диодный ограничитель напряжения (варианты 1 – 5)

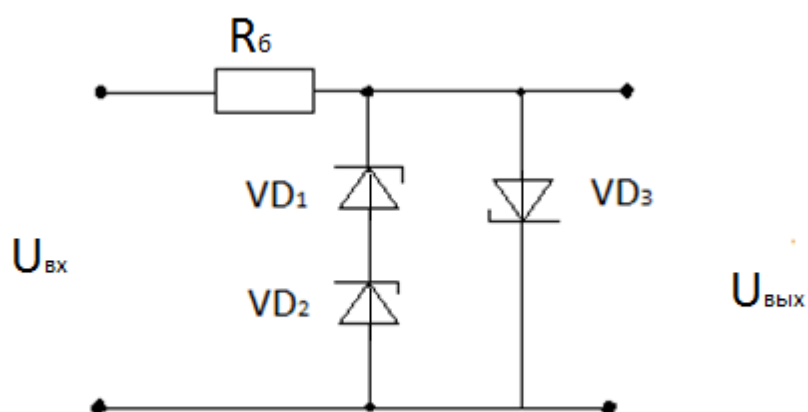


Рис. 4.12. Диодный ограничитель напряжения (варианты 6 – 10)

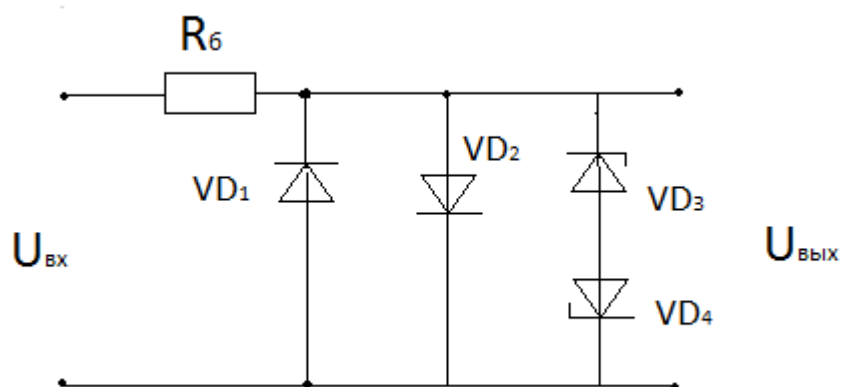


Рис. 4.13. Диодный ограничитель напряжения (варианты 11 – 15)

Таблица 4.18

Параметры элементов схем (рис. 4.11, 4.12, 4.13)

Номер варианта	R_6 , Ом	VD_1	VD_2	VD_3	VD_4
1	500	D74	D74	1N752	1N4742
2	600	D74	D74	1N4729	1N752
3	700	D74	D74	1N4737	1N752
4	800	D74	D74	1N4742	1N4729
5	900	D74	D74	1N752	1N752
6	1000	D74	D74	1N752	-
7	1100	D74	D74	1N4729	-
8	1200	D74	D74	1N4737	-
9	1300	D74	D74	1N4742	-
10	1400	D74	D74	1N752	-
11	1500	D74	D74	1N752	1N752
12	500	D74	D74	1N4729	1N752
13	600	D74	D74	1N4737	1N752
14	700	D74	D74	1N4742	1N4742
15	800	D74	D74	1N752	1N4742

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему диодного ограничителя напряжения (рис. 4.11, 4.12, 4.13);
2. К входу схемы подключить источник постоянного напряжения положительной полярности;
3. Изменяя напряжение от 0 до 50 В снять зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от входного $U_{\text{вх}}$, результаты занести в таблицу 4.19;

Таблица 4.19

Результаты исследования схемы (рис. 4.11, 4.12, 4.13) при положительной полярности входного напряжения

Входное напряжение $U_{\text{вх}}$, В	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В

4. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi_1(U_{\text{вх}})$;
5. Подключить к входу схемы источник постоянного напряжения отрицательной полярности;
6. Изменяя напряжение от 0 до -50 В снять зависимость выходного напряжения от входного, результаты занести в таблицу 4.20;

Таблица 4.20

Результаты исследования схемы (рис. 4.11, 4.12, 4.13) при отрицательной полярности входного напряжения

Входное напряжение $U_{\text{вх}}$, В	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В

7. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi_2(U_{\text{вх}})$;
8. Построить временную диаграмму работы ограничителя напряжения аналогично рис. 4.5, принимая за амплитудное значение входного синусоидального напряжения 50 В;
9. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 4.3.6 должен содержать: схему исследуемого ограничителя напряжения; заполненные таблицы 4.19 и 4.20; графики зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$ при положительной и отрицательной полярностях входного напряжения; временную диаграмму работы ограничителя напряжения; выводы по результатам исследований.

4.4. Контрольные вопросы

1. Чем объясняется односторонняя проводимость диода?
2. Что понимается под прямым и обратным напряжением диода?
3. Верно ли утверждение, что обратный ток диода в несколько десятков раз превышает его прямой ток?
4. Вольт-амперная характеристика диода.
5. Как влияет температура на параметры диода?
6. Можно ли использовать диод в качестве чувствительного элемента термометра?
7. Чем отличается стабилитрон от обычного диода?
8. Что такое дифференциальное сопротивление стабилитрона?
9. Что такое температурный коэффициент напряжения стабилизации стабилитрона?
10. На чем основан принцип действия диодных ограничителей напряжения?
11. Приведите пример диодного ограничителя напряжения и объясните его работу.

4.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку, включающую основные понятия и расчетные соотношения; отчеты по п. 4.3.1 – 4.3.6, включая выводы по каждому пункту; общие выводы по лабораторной работе.

4.6. Защита лабораторной работы

Для защиты работы необходимо предоставить преподавателю полностью оформленный отчет; ответить на предложенные контрольные вопросы; выполнить контрольное задание.

В качестве контрольного задания может быть предложено: построить временную диаграмму работы ограничителя напряжения (без моделирования электрической цепи на ПК); определить экспериментально (используя моделирование) прямое напряжение диода или напряжение стабилизации стабилитрона; определить экспериментально (используя моделирование) дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Лабораторная работа №5

Исследование биполярных транзисторов

5.1. Цель работы:

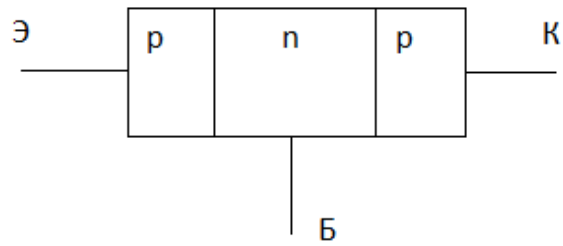
1. Знакомство с биполярными транзисторами (БТ), их параметрами и характеристиками;
2. Изучение методик получения характеристик и параметров транзисторов;
3. Исследование БТ.

5.2. Теоретическая справка

5.2.1. Общие сведения о БТ

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, содержащий два встречно включенных р-п-перехода и имеющий три электрода: база (Б); коллектор (К); эмиттер (Э), рис. 5.1.

а)



б)

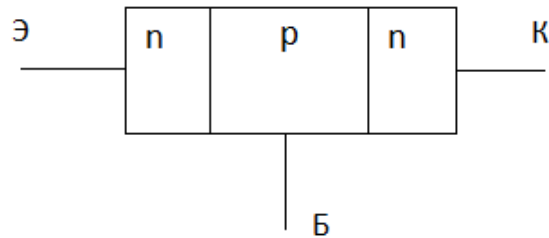
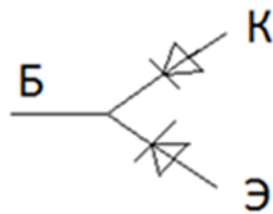


Рис. 5.1. Структура БТ:

- а) транзистор типа р-п-р (прямая проводимость);
- б) транзистор типа п-р-п (обратная проводимость)

Очевидно, что БТ представим диодной моделью, рис. 5.2.

а)



б)



Рис. 5.2. Диодная модель транзистора:

- а) транзистор типа р-п-р;
- б) транзистор типа п-р-п

Условные графические обозначения БТ показаны на рис. 5.3.

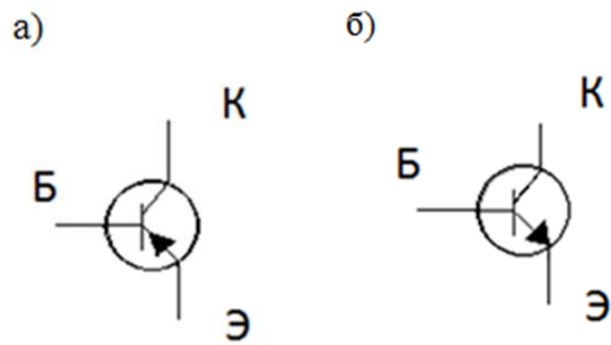


Рис. 5.3. Условные графические обозначения БТ:

- а) транзистор типа р-п-р;
- б) транзистор типа п-р-п

Эмиттерная стрелка определяет направление токов БТ рис. 5.4.

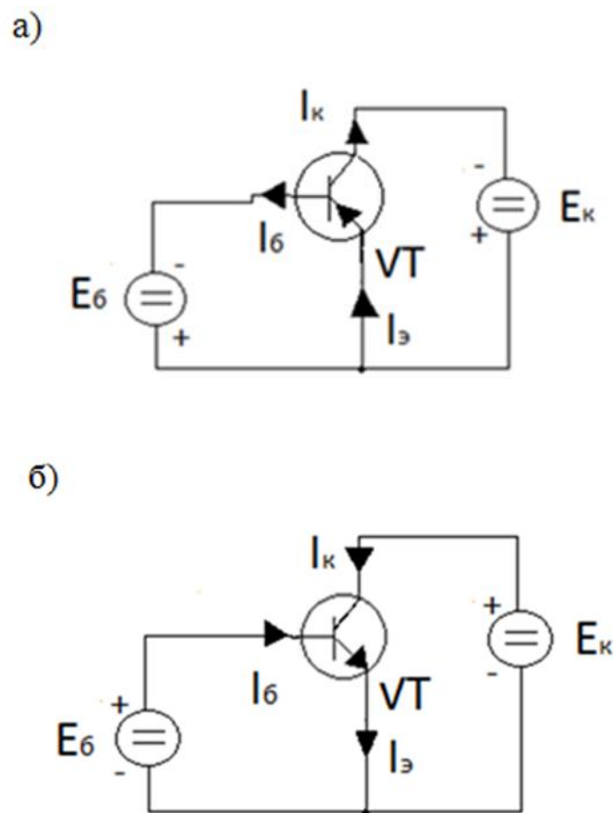


Рис. 5.4. Токи электродов БТ:

- а) транзистор типа р-п-р;
- б) транзистор типа п-р-п

5.2.2. Токи БТ, коэффициент передачи тока

Самый большой ток БТ – это ток эмиттера: $I_э = I_б + I_к$. Причем $I_к \gg I_б$ (транзистор является усилителем тока). Поэтому $I_э \approx I_к$. Отношение $\beta = I_к/I_б$ называют коэффициентом передачи тока БТ или коэффициентом усиления. В справочниках для обозначения отношения $I_к/I_б$ используется параметр $h_{21э}$ (один из четырех малосигнальных h-параметров). Индекс «э» означает, что эмиттер БТ является общим для входной и выходной цепи (рис. 5.4). Коэффициент усиления β для конкретного транзистора не является величиной постоянной: $\beta = \varphi(I_к)$.

5.2.3. Статические характеристики БТ

Основными характеристиками БТ являются семейства входных и выходных характеристик. Входные характеристики $I_б = \varphi(U_{бэ})$ представляют собой довольно плотный пучок, поэтому обычно на графике изображают только одну или две кривые. Так как эмиттерный переход транзистора является прямосмещенным диодом ($U_{бэ}$), характеристика $I_б = \varphi(U_{бэ})$ аналогична прямой ветви вольт-амперной характеристики диода, рис. 5.5.

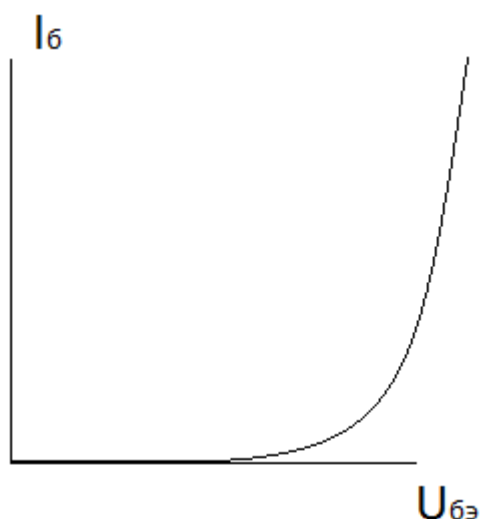


Рис. 5.5. Входная характеристика транзистора

Семейство выходных характеристик БТ представлено на рис. 5.6.

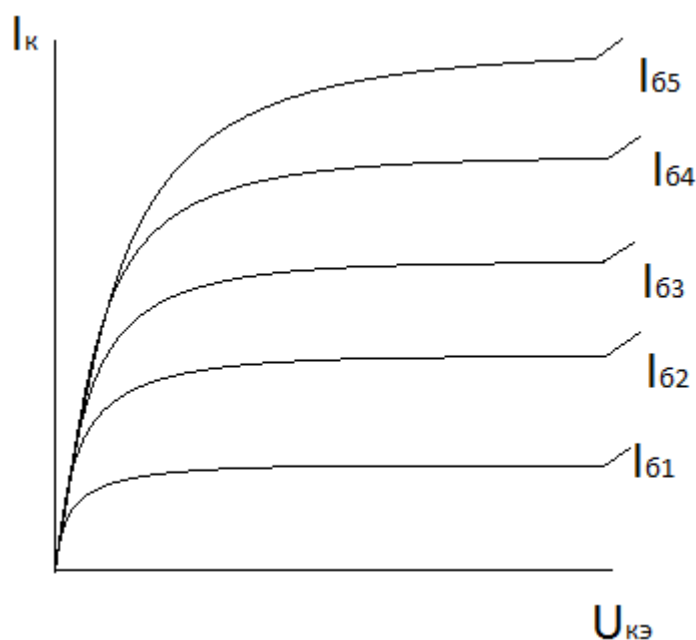


Рис. 5.6. Семейство выходных характеристик БТ

Выходные характеристики $I_k = \varphi(U_{кэ})$ представляются для разных токов базы: $I_{б1} < I_{б2} < I_{б3} < I_{б4} < I_{б5}$.

При больших напряжениях $U_{кэ}$ поступает пробой транзистора (характеристики изгибаются вверх, рис. 5.6). Любой БТ характеризуется максимальным $U_{кэдоп}$, которое приводится в справочниках.

При эксплуатации транзистора должно выполняться условие $U_{кэ} < U_{кэдоп}$, где $U_{кэдоп}$ – допустимое напряжение между коллектором и эмиттером БТ.

5.2.4. Получение статических характеристик БТ

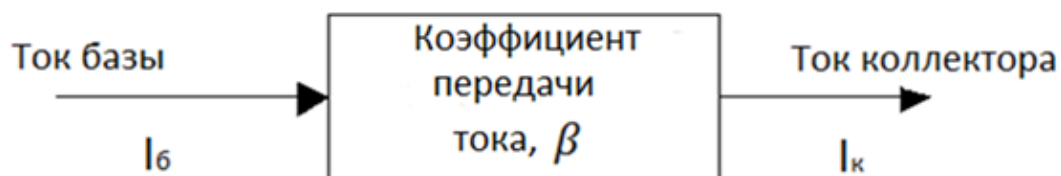
Одним из вариантов снятия входной характеристики БТ является изменение прямого напряжения $U_{бэ}$ и фиксация значений тока базы $I_б$.

Каждая из выходных характеристик снимается отдельно. Порядок получения выходной характеристики может быть следующим. Задается некоторое значение тока базы. Производится изменение напряжения $U_{кэ}$ и фиксация значений коллекторного тока I_k .

5.2.5. Управление БТ

Под управлением БТ понимается изменение состояния транзистора (внутреннего сопротивления между электродами коллектор-эмиттер $R_{кэ}$), следствием чего является изменения тока коллектора I_k , рис. 5.7.

а)



б)

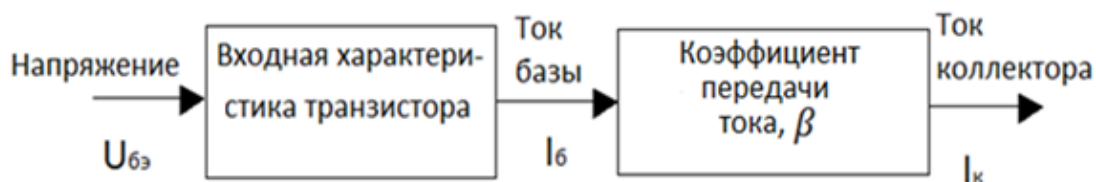


Рис. 5.7. Схема управления транзистором:

а) управление тока базы;

б) управление напряжением база-эмиттер

Так как $I_k = \varphi(I_b)$, то управление БТ возможно за счет изменения либо тока базы I_b , либо напряжения $U_{бэ}$. В самом деле, любому

значению $I_{\text{б}}$ соответствует конкретное значение $U_{\text{бэ}}$ и наоборот, рис. 5.5.

5.2.6. Применение БТ

Транзистор часто используется как электронный ключ. При $I_{\text{б}} = 0$ транзистор закрыт (ключ разомкнут) $I_{\text{к}} \rightarrow 0, R_{\text{кэ}} \rightarrow \infty$. При подаче тока базы, обеспечивающего полное открытие транзистора (ключ замкнут), $R_{\text{кэ}} \rightarrow 0, I_{\text{к}}$ стремится к максимально возможному значению в конкретной схеме.

БТ можно использовать как переменный резистор: $R_{\text{кэ}} = \varphi_1(I_{\text{б}})$ или $R_{\text{кэ}} = \varphi_2(U_{\text{бэ}})$. Если учесть, что $I_{\text{б}} \ll I_{\text{к}}$, то включение БТ в схему делителя напряжения вместо одного из резисторов позволяет получить усилитель электрических сигналов.

Кроме этого БТ иногда используют в качестве чувствительных элементов измерителей температуры, так как их характеристики зависят от температуры окружающей среды.

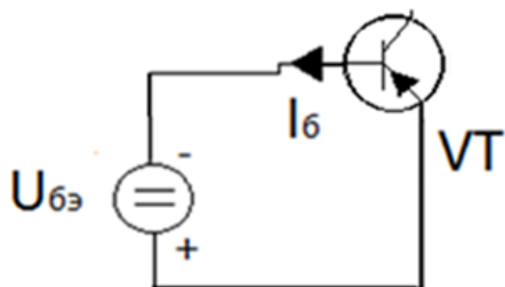
В редких случаях БТ применяется в качестве диодов. Так, например, в одном из отечественных настольных источников света с регулируемой яркостью свечения лампы накаливания вместо диодов на плате схемы регулятора были установлены БТ, у которых были задействованы только два электрода: база и эмиттер.

5.3. Порядок выполнения лабораторной работы

5.3.1. Снятие входной характеристики БТ при различных температурах

Провести снятие входной характеристики БТ при различных температурах. Схема включения БТ для проведения исследований представлена на рис. 5.8.

а)



б)

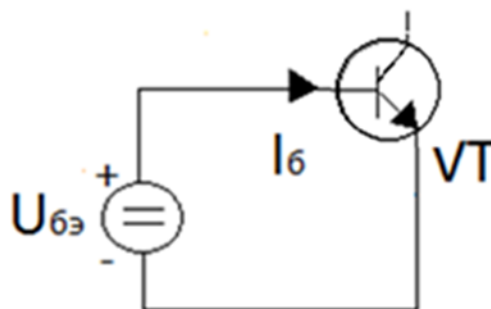


Рис. 5.8. Схемы включения БТ для снятия входной характеристики:

а) транзистор типа р-п-р;

б) транзистор типа п-р-п

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 5.8);
2. Выбрать первый из трех предложенных для исследования транзисторов VT1 (таблица 5.1);
3. Задать температуру t_1 (табл. 5.1);
4. Изменяя напряжение $U_{бэ}$ снять зависимость $I_б = \varphi(U_{бэ})$, результаты занести в табл. 5.2;
5. Повторить исследование для температур t_2 и t_3 , результаты занести в табл. 5.3 и 5.4;
6. Повторить исследования описанные выше для двух других транзисторов VT2 и VT3, результаты занести в табл. 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 и 5.10;

Таблица 5.1

Исходные данные для проведения исследований

Номер варианта	Транзистор						Температура, °C		
	VT_1		VT_2		VT_3		t_1	t_2	t_3
	Струк- тура	Тип	Струк- тура	Тип	Струк- тура	Тип			
1	p-n-p	2N2906	n-p-n	2N2218	p-n-p	2N3546	-30	27	40
2	n-p-n	2N2222	p-n-p	2N3719	n-p-n	2N2218	-20	20	35
3	p-n-p	2N3905	n-p-n	2N3252	p-n-p	2N3906	-15	25	42
4	n-p-n	2N3506	p-n-p	2N4402	n-p-n	2N3725	-35	22	45
5	p-n-p	2N4403	n-p-n	2N3903	p-n-p	2N5086	-25	30	50
6	n-p-n	2N3904	p-n-p	2N5875	n-p-n	2N3946	-10	28	45
7	n-p-n	2N4123	n-p-n	2N4124	n-p-n	2N4400	-18	23	40
8	n-p-n	MJE240	p-n-p	2N2906	p-n-p	2N3906	-22	21	48
9	p-n-p	2N3905	n-p-n	2N3725	n-p-n	2N2222	-33	26	52
10	p-n-p	2N4402	p-n-p	2N5875	n-p-n	2N3946	-15	27	43
11	n-p-n	2N3252	n-p-n	2N4123	n-p-n	MJE240	-20	21	40
12	n-p-n	2N2222	p-n-p	2N3546	p-n-p	2N4403	-25	30	45
13	p-n-p	2N5086	n-p-n	2N4400	p-n-p	2N3719	-8	30	50
14	p-n-p	2N2906	n-p-n	2N2218	p-n-p	2N3906	-12	27	53
15	n-p-n	2N3946	n-p-n	2N3439	p-n-p	2N3906	-15	20	44

Таблица 5.2

Результаты исследования транзистора VT_1 при температуре t_1

Напряжение $U_{бэ}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_б, \text{ мА}$	Напряжение $U_{бэ}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_б, \text{ мА}$

Таблица 5.3

Результаты исследования транзистора VT_1 при температуре t_2

Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$	Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$

Таблица 5.4

Результаты исследования транзистора VT_1 при температуре t_3

Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$	Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$

Таблица 5.5

Результаты исследования транзистора VT_2 при температуре t_1

Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$	Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$

Таблица 5.6

Результаты исследования транзистора VT_2 при температуре t_2

Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$	Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$

Таблица 5.7

Результаты исследования транзистора VT_2 при температуре t_3

Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$	Напряжение $U_{\bar{o}3}, \text{ мВ}$	Ток базы $I_{\bar{6}}, \text{ мА}$

Таблица 5.8

Результаты исследования транзистора VT_3 при температуре t_1

Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Ток базы $I_б$, мА	Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Ток базы $I_б$, мА

Таблица 5.9

Результаты исследования транзистора VT_3 при температуре t_2

Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Ток базы $I_б$, мА	Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Ток базы $I_б$, мА

Таблица 5.10

Результаты исследования транзистора VT_3 при температуре t_3

Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Ток базы $I_б$, мА	Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Ток базы $I_б$, мА

7. Построить на одном рисунке графики зависимостей $I_б = \varphi(U_{бэ})$ при различных температурах для транзистора VT_1 ;

8. Построить аналогичные графики входных характеристик для транзисторов VT_2 и VT_3 ;

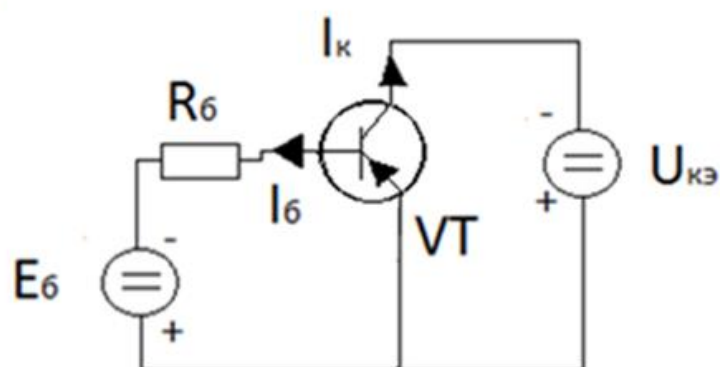
9. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 5.3.1 должен содержать: схемы включения транзисторов для снятия входных характеристик; заполненные таблицы 5.2 – 5.10; графические изображения входных характеристик для всех трех транзисторов при различных температурах; выводы по результатам исследований.

5.3.2. Снятие выходных характеристик БТ

Провести снятие выходных характеристик БТ. Для снятия выходных характеристик используется схема на рис. 5.9.

а)



б)

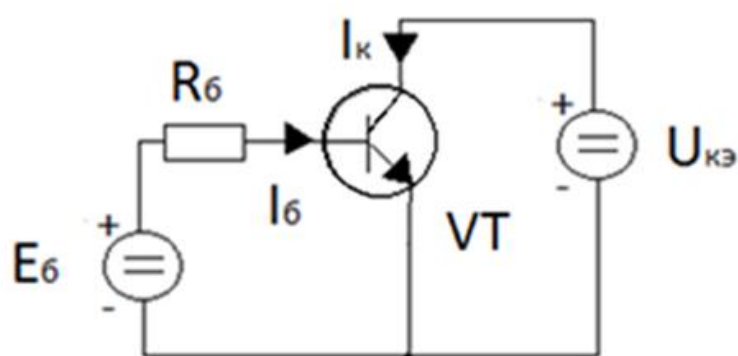


Рис. 5.9. Схема включения БТ для снятия семейства выходных характеристик:

а) транзистор проводимости р-п-р;

б) транзистор проводимости п-р-п

Источник тока (E_6, R_6) задает значение тока базы, которое поддерживается постоянным при изменении напряжения $U_{кэ}$. В процессе эксперимента следует выбирать значение E_6 от 5 до 30 В.

Изменять ток базы $I_{\text{б}}$ можно, варьируя значения $R_{\text{б}}$ и (или) $E_{\text{б}}$. Минимальное допустимое значение $R_{\text{б}}=10\ldots 20$ кОм. Напряжение $U_{\text{кэ}}$ может изменяться от 1 до 15 В. В процессе эксперимента необходимо снять не менее пяти выходных характеристик $I_{\text{к}} = \varphi(U_{\text{кэ}})$ для каждого транзистора.

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 5.9);
2. Выбрать транзистор VT_1 (табл. 5.1);
3. Подобрать параметры $(E_{\text{б}}, R_{\text{б}})$ так, чтобы $I_{\text{к1}} \approx 1$ мА;
4. Записать значение тока базы $I_{\text{б1}}$;
5. Изменяя напряжение $U_{\text{кэ}}$ снять зависимость $I_{\text{к}} = \varphi(U_{\text{кэ}})$, результаты занести в таблицу 5.11;

Таблица 5.11

Результаты снятия выходной характеристики транзистора VT_1 при $I_{\text{б1}}$

Выходное напряжение $U_{\text{кэ}}, \text{В}$	Выходной ток $I_{\text{к}}, \text{мА}$

6. Повторить эксперимент для различных токов базы (рекомендуемые значения тока коллектора $I_{\text{к}}$ от 1 до 30...100 мА), результаты занести в таблицы, аналогичные таблице 5.11;

7. Выполнить исследования для транзисторов VT_2 и VT_3 в соответствии с вышеописанной методикой;

8. Построить три семейства статических выходных характеристик для транзисторов VT_1 , VT_2 и VT_3 ;

9. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 5.3.2 должен содержать: схему (рис. 5.9); заполненные таблицы с данными экспериментальных исследований зависимостей $I_k = \varphi(U_{кэ})$ при различных значениях базового тока; графические представления семейств выходных характеристик для трех исследуемых транзисторов; выводы по результатам исследований.

5.3.3. Определение коэффициента усиления тока БТ

Определить коэффициент усиления тока БТ.

Схемы для определения коэффициента усиления транзистора по току представлена на рис. 5.10.

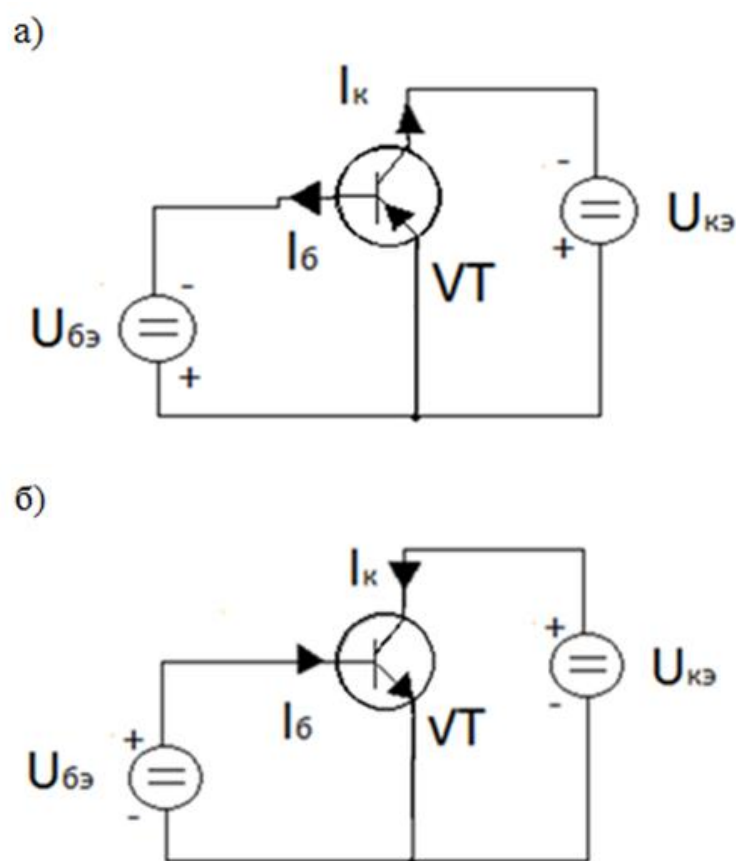


Рис. 5.10. Схема включения БТ для определения коэффициента передачи тока:

- а) транзистор проводимости р-п-р;
- б) транзистор проводимости п-р-п

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 5.10);
2. Выбрать транзистор VT_1 (табл. 5.1);
3. Постепенно увеличивая напряжение $U_{бэ}$ снять зависимость тока коллектора I_k от тока $I_б$ (не менее десяти точек, максимальное значение тока коллектора не должно превышать 30...100 мА), результаты занести в таблицу 5.12;

Таблица 5.12

Взаимосвязь коллекторного и базового токов транзистора VT_1

Ток базы $I_б$, мА	Ток коллектора I_k , мА	Коэф. передачи токов, В

4. Рассчитать значения коэффициента передачи тока транзистора, результаты занести в таблицу 5.12;
5. Построить график зависимости $\beta = \varphi(I_k)$;
6. Выполнить исследования транзисторов VT_2 и VT_3 (табл. 5.1) в соответствии с вышеприведенной методикой;
7. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 5.3.3 должен содержать: схему (рис. 5.10); заполненные таблицы с данными экспериментальных исследований зависимостей $I_k = \varphi(I_б)$; графики зависимостей $\beta = \varphi(I_k)$ для трех исследуемых транзисторов; выводы по результатам исследований.

5.3.4. Исследование возможности использования БТ в качестве чувствительного элемента измерителя температуры

Исследовать возможность использования БТ в качестве чувствительного элемента измерителя температуры.

Транзистор может использоваться как преобразователь температуры в электрический сигнал. Два варианта включения БТ представлены на рис. 5.11 и 5.12.

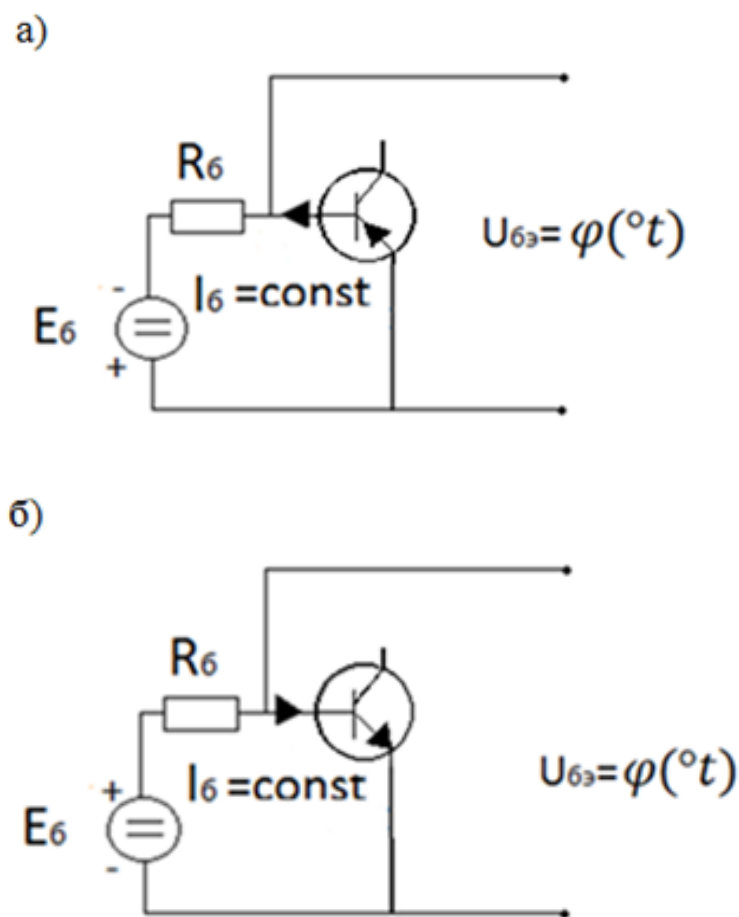


Рис. 5.11. Использование эмиттерного перехода БТ в качестве датчика температуры:

- а) транзистор проводимости p-n-p;
- б) транзистор проводимости n-p-n

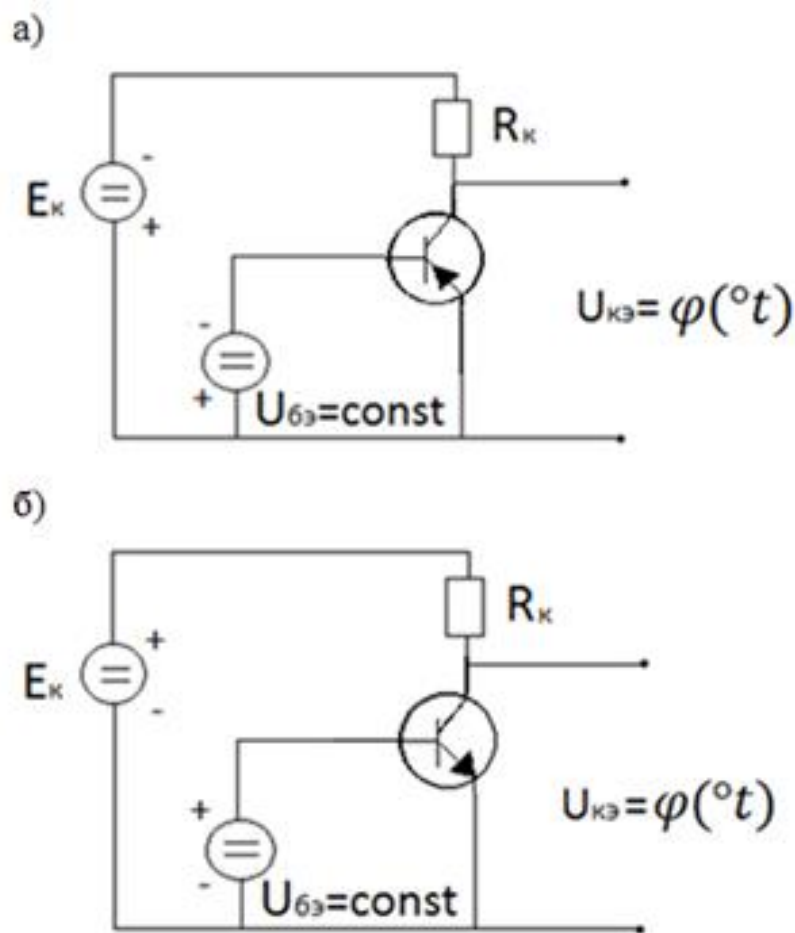


Рис. 5.12. Включение БТ как датчика температуры:

- а) транзистор проводимости р-п-р;
- б) транзистор проводимости п-р-п

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 5.11);
2. Выбрать транзистор VT_1 (табл. 5.1)
3. Задать температуру 27°C ;
4. Установить величину тока базы I_b в диапазоне от 100 до 500 мкА (величина R_b не должна быть меньше 20...50 кОм);
5. Изменяя температуру в диапазоне от t_1 до t_3 (табл. 5.1) спять зависимость напряжения $U_{бэ}$ от температуры, результаты занести в табл. 5.13;

Таблица 5.13

Результаты исследования схемы (рис. 5.11)

Температура, °C	Напряжение $U_{бэ}$, мВ	Температура, °C	Напряжение $U_{бэ}$, мВ

6. Рассчитать чувствительность датчика

$$S = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta t}$$

в окрестностях температур t_1 , t_2 и t_3 ;

7. Найти среднее значение чувствительности

$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 S_i ;$$

8. Построить схему (рис. 5.12);

9. Выбрать транзистор VT_1 (табл. 5.1), задать температуру 27°C;

10. Сопротивление резистора R_k принять равным 500 Ом;

11. Выбрать напряжение $E_k = 9 \dots 20$ В;

12. Установить такое значение напряжения $U_{бэ}$, чтобы величина тока коллектора находилась в интервале от 1 до 5 мА;

13. Изменяя температуру от t_1 до t_3 (табл. 5.1) снять зависимость напряжения $U_{кэ}$ от температуры, результаты занести в табл. 5.14;

Таблица 5.14

Результаты исследования схемы (рис. 5.12) при $R_k = 500$ Ом

Температура, °C	Напряжение $U_{кэ}$, мВ	Температура, °C	Напряжение $U_{кэ}$, мВ

14. Рассчитать среднюю чувствительность преобразователя S_{500} ;
15. Установить $R_k = 1000 \text{ Ом}$;
16. Повторить исследования аналогично вышеописанной методике, результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 5.14;
17. Рассчитать среднюю чувствительность S_{1000} ;
18. Установить $R_k = 1500 \text{ Ом}$;
19. Повторить исследования аналогичным образом, результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 5.14;
20. Рассчитать среднюю чувствительность S_{1500} ;
21. Сравнить значения чувствительности датчиков температуры, выполненных по схемам рис. 5.11 и 5.12;
22. Сделать выводы о зависимости чувствительности датчика температуры от варианта схемы (рис. 5.11 и рис. 5.12) и от параметров элементов схемы, предложить пути повышения чувствительности;
23. Предложить пример датчика, обладающего большей, по сравнению с экспериментально полученной, чувствительностью.

5.4. Контрольные вопросы

1. Структура биполярного транзистора.
2. Диодная модель биполярного транзистора.
3. Как обозначаются биполярные транзисторы на схемах?
4. Токи, протекающие в биполярном транзисторе.
5. Что такое коэффициент передачи тока?

6. Изобразите входную характеристику биполярного транзистора.

7. Какой вид имеет семейство статических выходных характеристик биполярного транзистора?

8. Каким образом производится снятие входной характеристики биполярного транзистора?

9. Алгоритм снятия семейства статических выходных характеристик биполярного транзистора.

10. Принципы управления биполярным транзистором.

11. Что вы знаете о применении биполярного транзистора?

5.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку; отчеты по п. 5.3.1 – 5.3.4 включая выводы по каждому из исследований; общие выводы по работе.

5.6. Защита лабораторной работы

Для защиты лабораторной работы необходимо предоставить полностью оформленный отчет: ответить на предложенные контрольные вопросы; выполнить контрольные задания.

Контрольное задание может быть связано с экспериментальным определением, например, коэффициента усиления транзистора. Возможно задание по снятию какой-либо из характеристик предложенного транзистора.

Лабораторная работа №6

Исследование усилительных каскадов с фиксированным смещением на постоянном токе

6.1. Цель работы:

1. Изучение резисторных усилительных каскадов (УК) на биполярных транзисторах (БТ);
2. Знакомство с организацией смещения в УК;
3. Исследование УК на БТ с фиксированным смещением.

6.2. Теоретическая справка

6.2.1. Управление транзистором в УК.

Структурная схема управления БТ в УК (схема ОЭ), представлена на рис. 6.1.

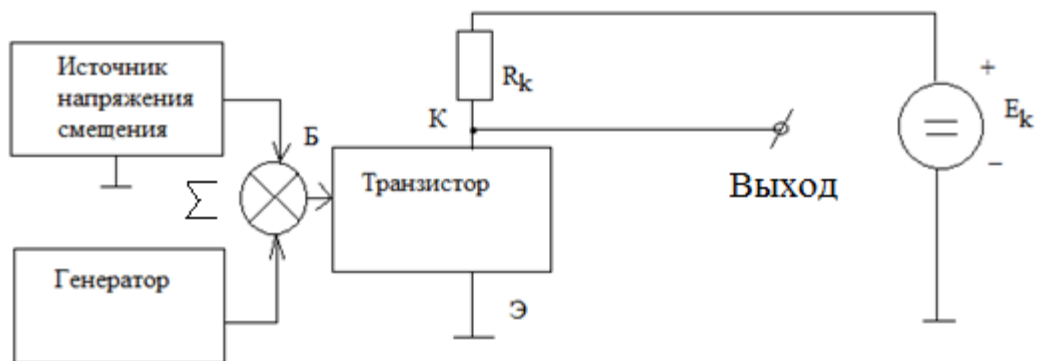


Рис. 6.1. Схема управления БТ в УК

Независимо от наличия (или отсутствия) входного сигнала, к эмиттерному переходу БТ приложено напряжение смещения ($U_{бэ0}$), которое задает конкретное состояние транзистора (сопротивление между коллектором и эмиттером $R_{кэ}$). При подключении источника

входного сигнала (генератора) с напряжением $U_{бэ0}$ складывается напряжение этого источника E_r , и состояние транзистора изменяется по закону, определяемому генератором (рис. 6.2).

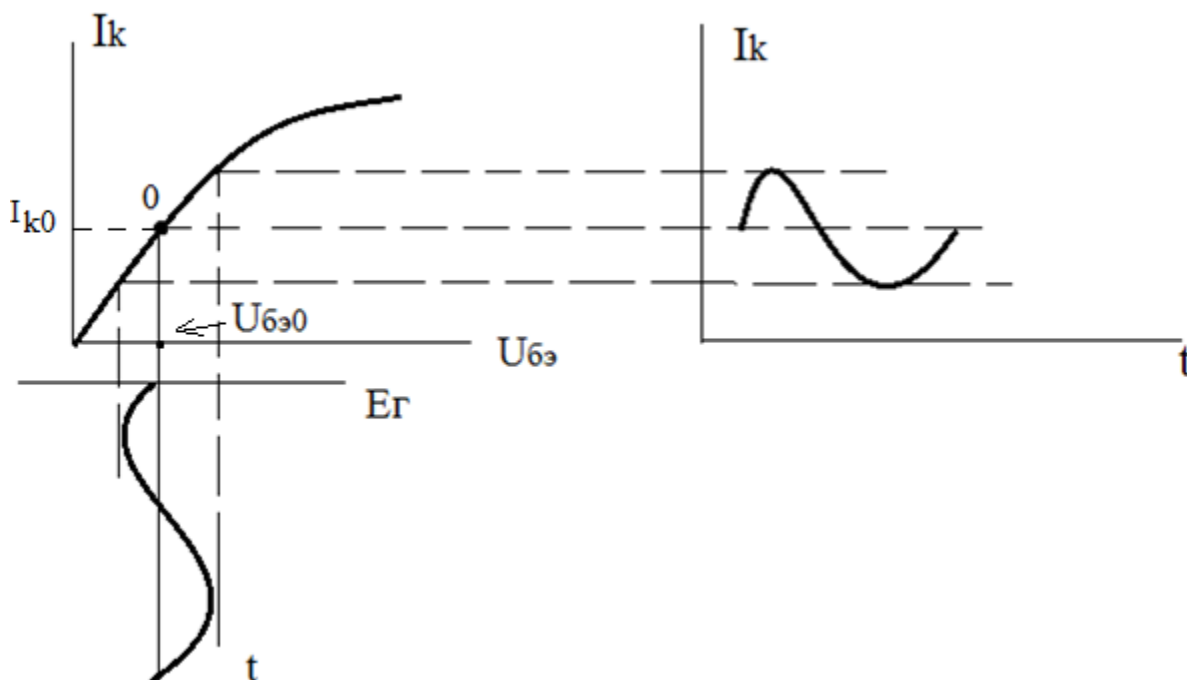


Рис. 6.2. Управление БТ от генератора гармонического сигнала

Зависимость $I_k = \varphi(U_{бэ})$ называется сквозной динамической характеристикой (СДХ). Положение точки покоя (точка 0) на СДХ определяется величиной напряжения смещения $U_{бэ0}$.

6.2.2. Принципы организации смещения в УК

Как видно из рис. 5.1, напряжение $U_{бэ}$ получается от отдельного источника, внутри которого должен находиться источник напряжения E_b .

Таким образом, для работы УК требуются два источника постоянного напряжения E_k и E_b . Напряжение смещения может подключаться к эмиттерному переходу транзистора последовательно или параллельно.

Наличие двух источников напряжения E_K и E_B обуславливает ряд негативных моментов, например, увеличиваются массо-габаритные показатели устройства, сжимается его эксплуатационная эффективность.

Другим решением является организация последовательного или параллельного смещения транзистора от одного общего источника напряжения E_K .

Различают четыре схемы организации смещения БТ в УК: последовательная и параллельная с двумя источниками питания; последовательная и параллельная с одним источником питания.

6.2.3. Схемы смещения в УК

Последовательная схема смещения с двумя источниками питания представлена на рис. 6.3.

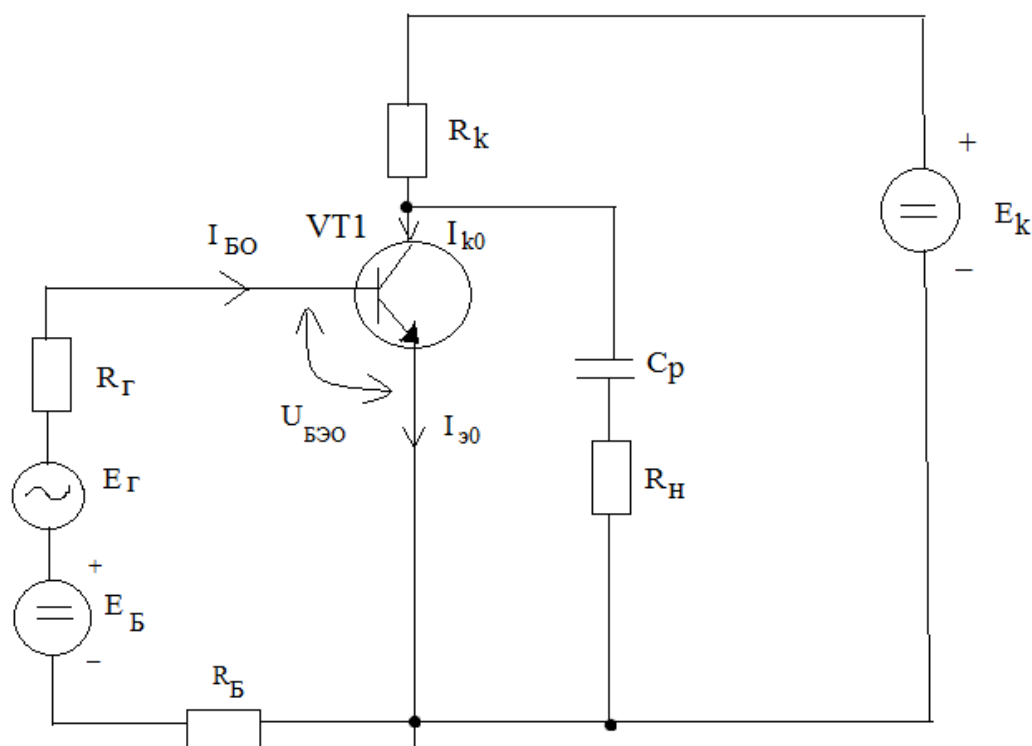


Рис. 6.3. Последовательная схема смещения с двумя источниками питания

Источник напряжения E_B создает ток базы БТ I_{B0} и, соответственно, напряжение $U_{бэ0}$. Резистор R_B задает необходимое значение I_{B0} ($U_{бэ0}$). Ток базы протекает через генератор (E_B, R_B). Сопротивление R_B недоступно для изменения. Регулировка I_{B0} возможна при изменении сопротивления R_B или напряжения E_B . Постоянные токи транзистора не протекают через нагрузку R_H , благодаря разделительному конденсатору C_P .

Для того чтобы точка тока 0 (рис. 6.2) находилась на середине линейного участка СДХ (линейный режим работы каскада), напряжение на коллекторе транзистора $U_k \approx 0,5 E_k$.

Последовательная схема смещения с одним источником питания показана на рис. 6.4.

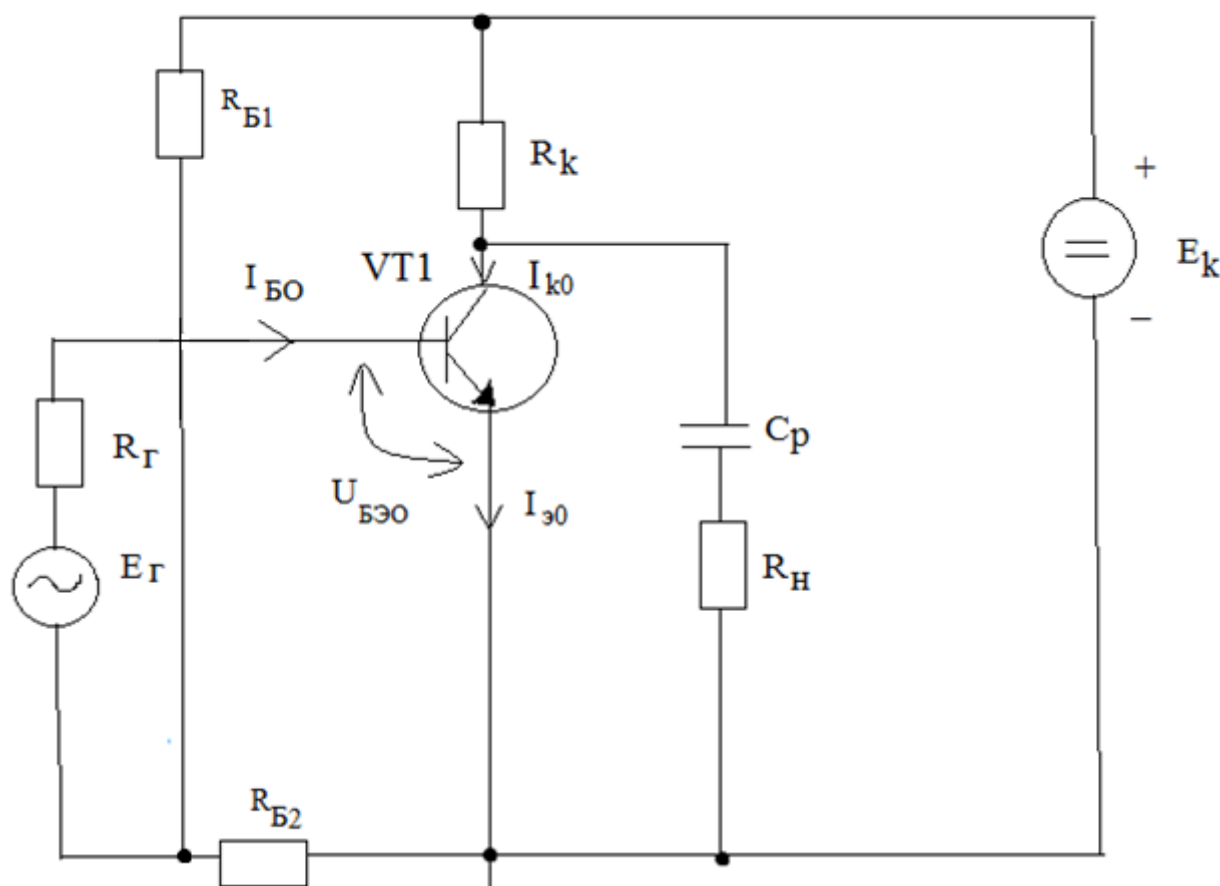


Рис. 6.4. Последовательная схема смещения с одним источником питания

Ток от источника напряжения E_k протекает через делитель напряжения (R_{B1}, R_{B2}). При этом создается падение напряжения на резисторе R_{B2} (аналог напряжения E_B в схеме, рис. 6.3). Величина I_{B0} определяется напряжением на резисторе R_{B2} и величинами сопротивлений R_{Γ} и R_{B2} .

Регулировку смещения (напряжения $U_{бэ0}$) можно производить, выбирая соотношение сопротивлений резисторов R_{B1} и R_{B2} . Например, при увеличении сопротивления R_{B2} напряжение смещения БТ увеличивается, а при увеличении R_{B1} – уменьшается.

Параллельная схема смещения с двумя источниками питания представлена на рис. 6.5.

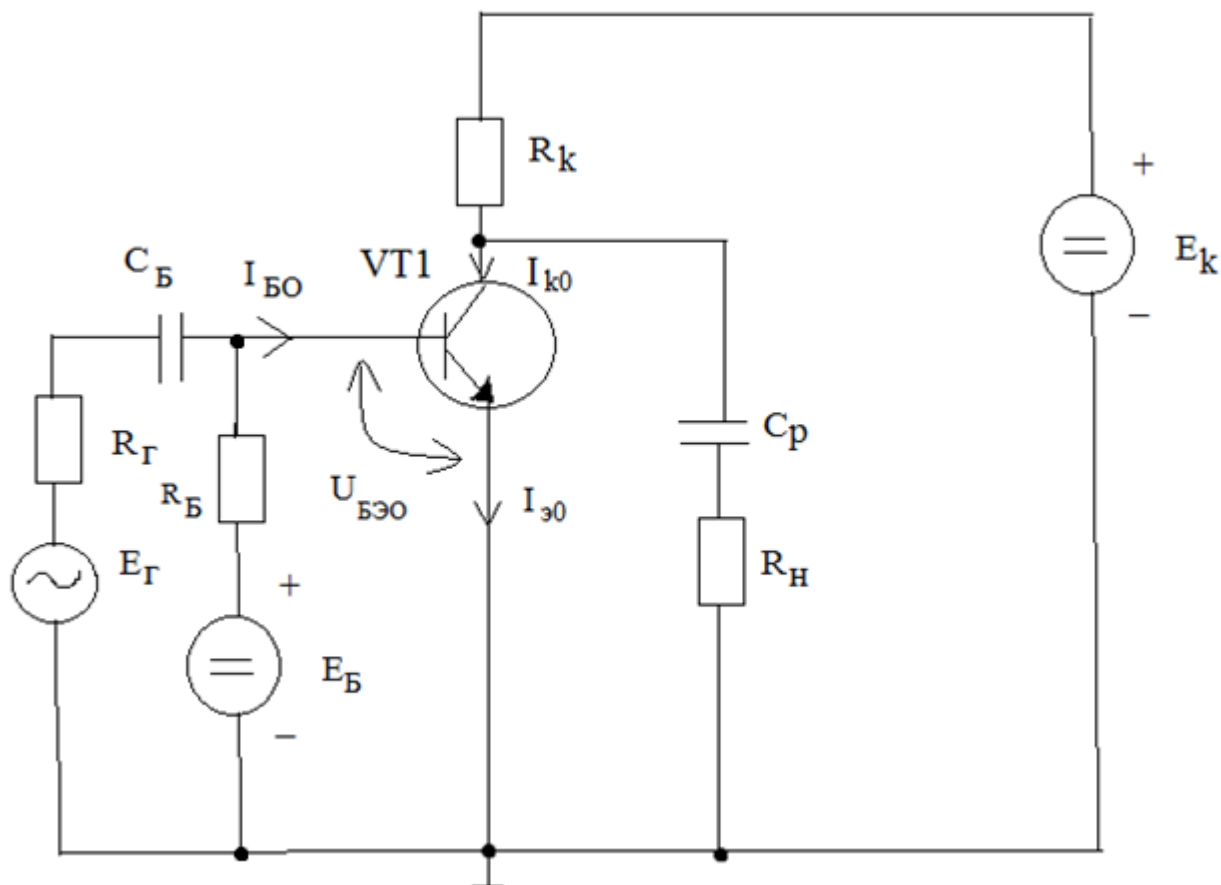


Рис. 6.5. Параллельная схема смещения с двумя источниками питания

В отличие от схем (рис. 6.3, 6.4), в схеме (рис. 6.5) ток смещения не проходит через генератор, благодаря конденсатору C_B .

Резистор R_B выполняет две функции: задает величину тока смещения I_{B0} ; предотвращает короткое замыкание эмиттерного перехода БТ для тока сигнала генератора (внутреннее сопротивление источника E_B очень мало и может составлять доли Ома).

Регулировку величины $U_{БЭ0}$ можно производить изменяя сопротивление резистора R_B , но для согласования схемы по переменному току $R_B \geq 10R_{Г}$.

Параллельная схема смещения с одним источником питания показана на рис. 6.6.

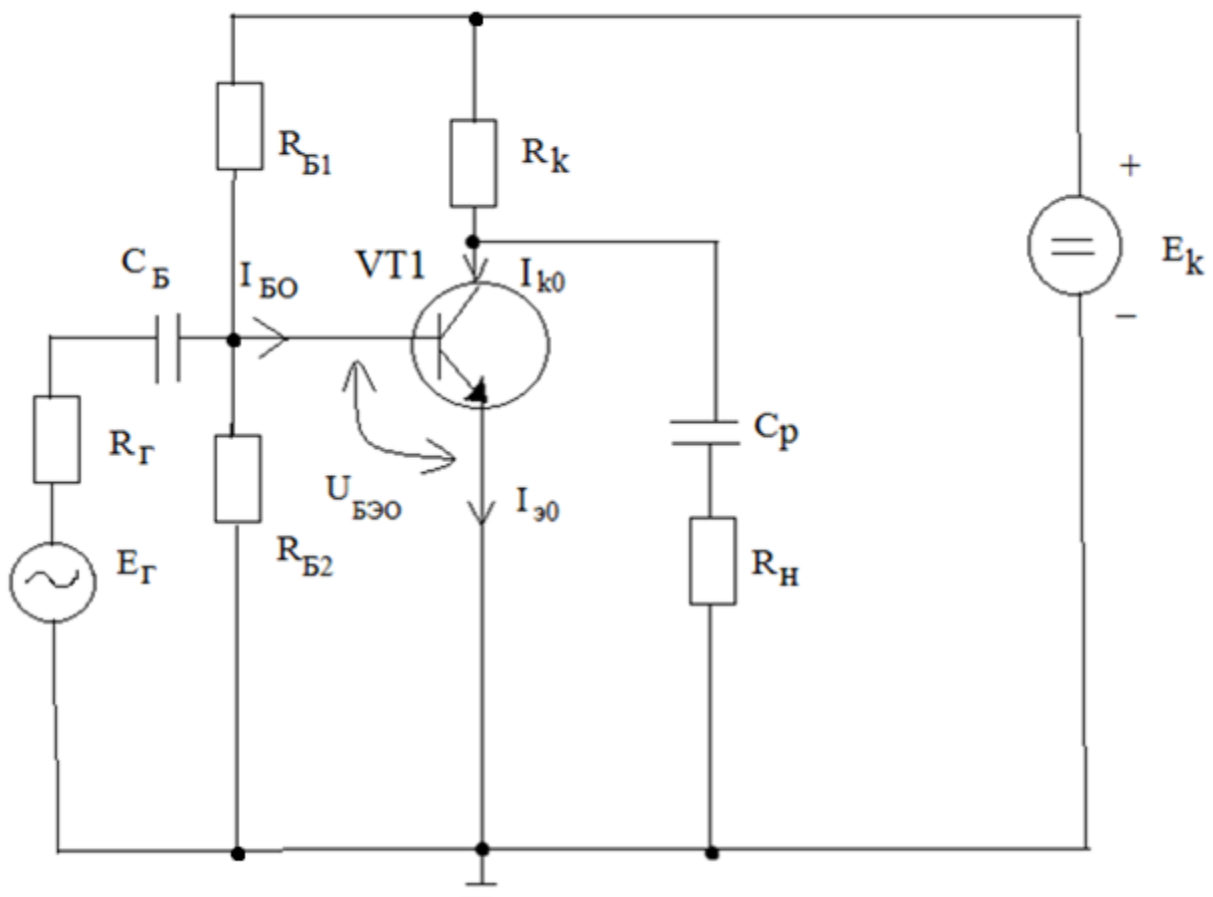


Рис. 6.6. Параллельная схема смещения с одним источником питания

С выхода делителя напряжения ($R_{Б1}, R_{Б2}$), снимается напряжение смещения БТ $U_{бэ0}$. Регулировка напряжения смещения производится изменением соотношения сопротивлений резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$.

Напряжение $U_{бэ0}$ увеличивается либо при увеличении сопротивления резистора $R_{Б2}$, либо при уменьшении сопротивления резистора $R_{Б1}$.

Как и в схеме (рис. 6.5), ток смещения не проходит через генератор, так как конденсатор C_B блокирует протекание постоянного тока.

6.2.3. Температурная стабильность УК

Температура оказывает сильное влияние на физические свойства полупроводников. Транзисторы, являясь полупроводниковыми приборами, так же реагируют на изменение температуры.

Температура БТ определяется температурой окружающей среды и нагревом этого транзистора вследствие протекания коллекторного тока.

На рис. 6.7 показано изменение СДХ транзистора в УК вследствие изменения температуры.

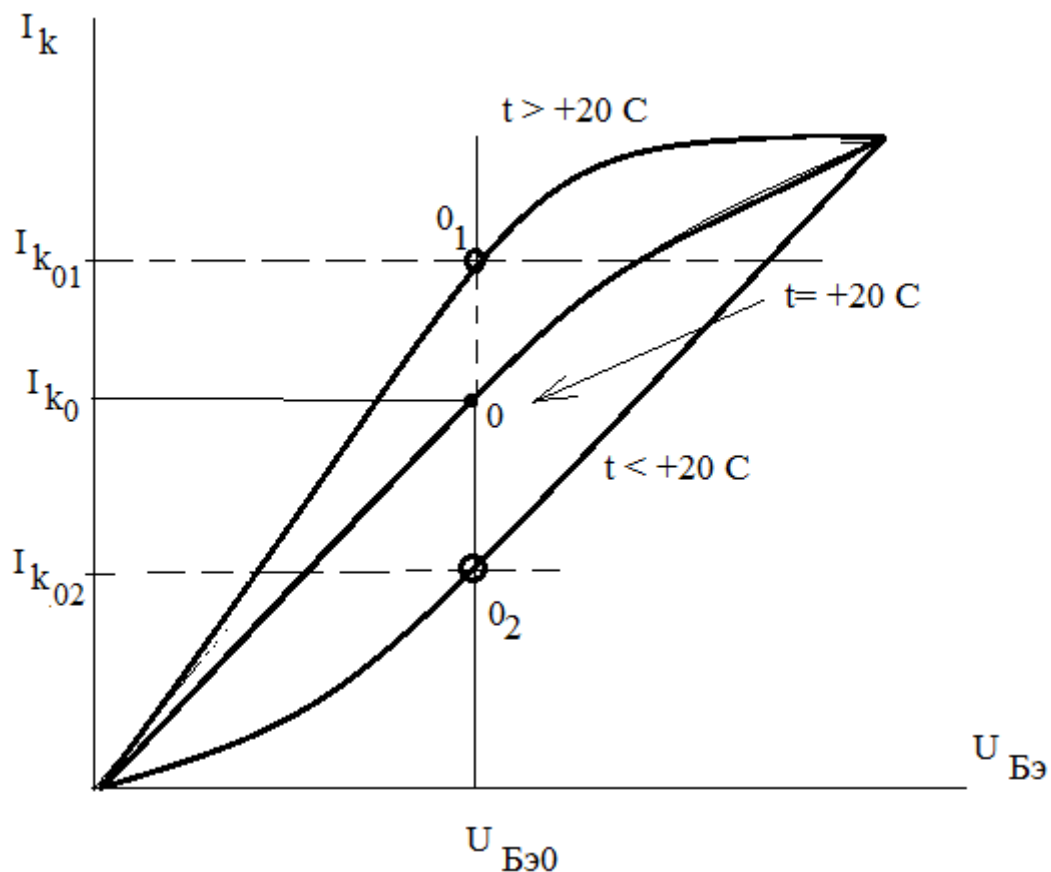


Рис. 6.7. Влияние температуры на коллекторный ток БТ

Регулировка УК производится при температуре t_0 (20...27°C). Точка покоя 0 занимает среднее положение на линейном участке СДХ (I_{k0} , $U_{бэ0}$). Точка покоя смещается вверх по СДХ (точка 0₁).

При повышении температуры коллекторный ток I_{k0} увеличивается до I_{k01} при $U_{бэ0} = \text{const}$.

Понижение температуры приводит к уменьшению тока коллектора до I_{k02} . Точка покоя смещается вниз по СДХ (точка 0₂).

Смещение точки покоя 0 относительно начального положения приводит к увеличению нелинейных искажений при усилении гармонического сигнала (рис. 6.2).

6.3. Порядок выполнения работы

6.3.1. Исследование схемы смещения (рис. 6.3)

Провести исследование схемы смещения (рис. 6.3).

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему рис.6.3, параметры элементов схемы даны в табл. 6.1;

Таблица 6.1

Параметры элементов схемы (рис. 6.3)

Номер варианта	$R_{Г}$, кОм	$E_{Б}$, В	$R_{К}$, кОм	$E_{К}$, В	Транзистор VT_1
1	1	1,0	1,5	9	2N 2218
2	1,5	1,5	1,7	12	2N2222
3	2,0	1,2	2,0	15	2N2222A
4	1	1,0	2,3	18	2N3252
5	1,5	1,2	2,5	9	2N3439
6	2,0	1,5	1,5	12	2N3506
7	2,5	1,0	2,0	15	2N3725
8	1	1,2	1,2	18	2N3903
9	1,5	1,5	2,2	9	2N3904
10	2,0	1,0	2,5	12	2N3946
11	2,5	1,2	1,3	15	2N4123
12	3,0	1,5	1,5	18	2N4124
13	1,2	1,0	1,7	9	2N4400
14	1,7	1,2	2,0	12	MJE240
15	2,3	1,5	2,2	15	2N3506

2. Принять $C_p = 100$ мкФ, $R_H = 15$ кОм;
3. Произвести регулировку смещения УК, для чего подобрать такое сопротивление резистора R_B , чтобы напряжение на коллекторе

транзистора $U_{k0} \approx 0,5E_k$ (положение точки покоя 0 соответствует рис. 6.2);

4. Записать значение сопротивления R_B , напряжение на коллекторе транзистора U_{k0} , ток коллектора I_{k0} , напряжение на эмиттерном переходе транзистора $U_{бэ0}$;

5. Определить влияние напряжения E_B на U_{k0} и I_{k0} , для чего, изменяя E_B в пределах от 0 до номинального значения (табл. 6.1), определить величины коллекторного тока и коллекторного напряжения БТ; результат занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Влияние напряжения E_B на состояние транзистора в схеме (рис. 6.3)

Напряжение E_B , В	Коллекторный I_{k0} , мА	Коллекторное напряжение U_{k0} , В

6. Построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(E_B)$ и $U_{k0} = \varphi_2(E_B)$;

7. Оценить стабильность УК (изменение величин I_{k0} и U_{k0}) при допустимом 30%-м уменьшении напряжения E_B относительно номинального значения (табл. 6.1);

8. Вернуть настройки схемы полученные при $U_{k0} \approx 0,5E_k$;

9. Определить температурную стабильность схемы, для чего, изменяя температуру в пределах от -30 до +50 °С, измерить I_{k0} и U_{k0} ; результаты занести в табл. 6.3;

Таблица 6.3

Температурная стабильность УК (схема, рис 6.3)

$t, ^\circ\text{C}$	I_{k0} , мА	U_{k0} , В	$t, ^\circ\text{C}$	I_{k0} , мА	U_{k0} , В

10. Построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_3(^{\circ}t)$ и $U_{k0} = \varphi_4(^{\circ}t)$;

11. Записать диапазоны изменений ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения -30°C к значению $+50^{\circ}\text{C}$;

12. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 6.3.1 должен содержать: схему УК (рис. 6.3); значения $R_{\text{Б}}, I_{k0}, U_{k0}$, для схемы с отрегулированным смещением ($U_{k0} \approx 0,5E_{\text{Б}}$); заполненные таблицы 6.2 и 6.3; графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(E_{\text{Б}})$ и $U_{k0} = \varphi_2(E_{\text{Б}})$, $I_{k0} = \varphi_3(^{\circ}t)$ и $U_{k0} = \varphi_4(^{\circ}t)$; оценочное значение стабильности УК при 30%-м уменьшении напряжения $E_{\text{Б}}$; параметры температурной стабильности УК ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения -30°C ; к значению $+50^{\circ}\text{C}$; выводы по результатам исследований;

6.3.2. Исследование схемы смещения (рис. 6.4)

Провести исследование схемы смещения (рис. 6.4).

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 6.4), параметры элементов даны в табл. 6.1 и 6.4;

Таблица 6.4

Параметры элементов схемы (рис. 6.4)

Номер варианта	$R_{\text{Б1}}$, кОм	$R_{\text{Б1}}$, кОм
1	30	2
2	28	3
3	25	4
4	22	1,5
5	20	2,5

Окончание таблицы 6.4

Номер варианта	$R_{Б1}$, кОм	$R_{Б1}$, кОм
6	18	3,5
7	15	4,5
8	32	2,7
9	29	3,7
10	27	4,2
11	25	1,7
12	20	2,2
13	18	3,2
14	21	4,2
15	27	5,0

2. Принять $C_p = 100$ мкФ, $R_H = 15$ кОм;
3. Произвести регулировку смещения УК, для чего подобрать такие сопротивления резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$, чтобы напряжение на коллекторе транзистора $U_{k0} \approx 0,5E_k$;
4. Записать значения $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, I_{k0} и U_{k0} ;
5. Изменяя сопротивление резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ в пределах $\pm 50\%$ от номинальных значений (табл. 6.4), определить зависимость I_{k0} и U_{k0} от сопротивлений резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$, $I_{k0} = \varphi_1(R_{Б1})$, $I_{k0} = \varphi_2(R_{Б2})$, $U_{k0} = \varphi_3(R_{Б1})$, $U_{k0} = \varphi_4(R_{Б2})$; результаты занести в табл. 6.5 и 6.6;

Таблица 6.5

Влияние сопротивления резистора $R_{Б1}$ на состояние транзисторов в схеме
(рис. 6.4)

Сопротивление резистора $R_{Б1}$, кОм	Коллекторный I_{k0} , мА	Коллекторное напряжение U_{k0} , В

Таблица 6.6

Влияние сопротивления резистора $R_{Б2}$ на состояние транзисторов в схеме
(рис. 6.4)

Сопротивление резистора $R_{Б2}$, кОм	Коллекторный I_{k0} , мА	Коллекторное напряжение U_{k0} , В

6. Построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(R_{Б1})$, $I_{k0} = \varphi_2(R_{Б2})$, и $U_{k0} = \varphi_3(R_{Б1})$, $U_{k0} = \varphi_4(R_{Б2})$;

7. Определить температурную стабильность схемы аналогично п. 6.3.1 (заполнить табл. 6.7), построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_5(^{\circ}t)$, $U_{k0} = \varphi_6(^{\circ}t)$, записать диапазоны изменений ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения -30°C к значению $+50^{\circ}\text{C}$;

8. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 6.3.2 должен содержать схему УК (рис. 6.4); значения $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, I_{k0} и U_{k0} для схемы с отрегулированным смещением ($U_{k0} \approx 0,5E_k$); заполненные таблицы 6.5, 6.3, 6.7; графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(R_{Б1})$, $I_{k0} = \varphi_2(R_{Б2})$ и $U_{k0} = \varphi_3(R_{Б1})$, $U_{k0} = \varphi_4(R_{Б2})$, $I_{k0} = \varphi_5(^{\circ}t)$, $U_{k0} = \varphi_6(^{\circ}t)$; параметры температурной стабильности УК (ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения -30°C к значению $+50^{\circ}\text{C}$), выводы по результатам исследований.

Таблица 6.7

Температурная стабильность УК (схема, рис. 6.4)

$^{\circ}t, ^{\circ}\text{C}$	I_{k0} , мА	U_{k0} , В	$^{\circ}t, ^{\circ}\text{C}$	I_{k0} , мА	U_{k0} , В

6.3.3. Исследование схемы (рис. 6.5)

Провести исследование схемы (рис. 6.5).

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 6.5), параметры элементов даны в табл. 6.1;
2. Принять $C_p = C_B = 100 \text{ мкФ}$, $R_H = 15 \text{ кОм}$;
3. Произвести регулировку смещения УК, для чего подобрать такое сопротивление резистора R_B , чтобы напряжение на коллекторе транзистора $U_{k0} \approx 0,5E_k$;
4. Записать значения R_B , I_{k0} и U_{k0} ;
5. Определить влияние напряжения E_B на I_{k0} и U_{k0} аналогично по п. 6.3.1, результаты занести в табл. 6.8;

Таблица 6.8

Влияние напряжения E_B на состояние транзистора в схеме (рис. 6.3)

Напряжение E_B , В	Коллекторный I_{k0} , мА	Коллекторное напряжение U_{k0} , В

6. Построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(E_B)$ и $U_{k0} = \varphi_2(E_B)$;
7. Оценить стабильность УК (изменение величин I_{k0} и U_{k0}) при допустимом 30%-м уменьшении напряжения E_B относительно номинального значения (табл. 6.1);
8. Вернуть настройки схемы, полученные при $U_{k0} \approx 0,5E_k$;

9. Определить температурную стабильность схемы, для чего, изменяя температуру в пределах от -30 до $+50$ °C, измерить I_{k0} и U_{k0} , результаты занести в табл. 6.9;

Таблица 6.9

Температурная стабильность УК (схема, рис. 6.5)

$^{\circ}t, ^{\circ}C$	$I_{k0}, \text{мА}$	$U_{k0}, \text{В}$	$^{\circ}t, ^{\circ}C$	$I_{k0}, \text{мА}$	$U_{k0}, \text{В}$

10. Построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_3(^{\circ}t)$ и $U_{k0} = \varphi_4(^{\circ}t)$;

11. Записать диапазоны изменений ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения -30 °C к значению $+50$ °C;

12. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет должен содержать: схему УК (рис. 6.5); значения R_B, I_{k0}, U_{k0} для схемы с отрегулированным смещением ($U_{k0} \approx 0,5E_k$); заполненные таблицы 6.8 и 6.9; графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(E_B)$ и $U_{k0} = \varphi_2(E_B)$, $I_{k0} = \varphi_3(^{\circ}t)$ и $U_{k0} = \varphi_4(^{\circ}t)$; оценочное значение стабильности УК при 30%-м уменьшении напряжения E_B ; параметры температурной стабильности УК ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения -30 °C к значению $+50$ °C; выводы по результатам исследований;

6.3.4. Исследование схемы (рис. 6.6)

Провести исследование схемы (рис. 6.6).

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 6.6), параметры элементов схемы взять из табл. 6.1 и 6.4;

2. Принять $C_p = C_B = 100\text{мкФ}$, $R_H = 15\text{ кОм}$;
3. Произвести регулировку смещения УК, для чего подобрать такие сопротивления резисторов R_{B1} и R_{B2} , чтобы напряжение на коллекторе транзистора $U_{k0} \approx 0,5E_k$;
4. Записать значения R_{B1} , R_{B2} , I_{k0} и U_{k0} ;
5. Изменяя сопротивления резисторов R_{B1} и R_{B2} в пределах $\pm 50\%$, определить зависимость I_{k0} и U_{k0} от сопротивлений резисторов R_{B1} и R_{B2} , $I_{k0} = \varphi_1(R_{B1})$, $I_{k0} = \varphi_2(R_{B2})$ и $U_{k0} = \varphi_3(R_{B1})$, $U_{k0} = \varphi_4(R_{B2})$; результаты занести в табл. 6.10 и 6.11;

Таблица 6.10

Влияние сопротивления резистора R_{B1} на состояние транзисторов в схеме
(рис. 6.6)

Сопротивление резистора R_{B1} , кОм	Коллекторный I_{k0} , мА	Коллекторное напряжение U_{k0} , В

Таблица 6.11

Влияние сопротивления резистора R_{B2} на состояние транзисторов в схеме
(рис. 6.6)

Сопротивление резистора R_{B2} , кОм	Коллекторный I_{k0} , мА	Коллекторное напряжение U_{k0} , В

6. Построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(R_{B1})$, $I_{k0} = \varphi_2(R_{B2})$ и $U_{k0} = \varphi_3(R_{B1})$, $U_{k0} = \varphi_4(R_{B2})$;
7. Определить температурную стабильность схемы аналогично п. 6.3.1 (заполнить табл. 6.12), построить графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_5(^{\circ}t)$, $U_{k0} = \varphi_6(^{\circ}t)$, записать диапазоны

изменений ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ к значению $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;

8. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 6.3.4 должен содержать схему УК (рис. 6.6); значения $R_{Б1}, R_{Б2}, I_{k0}$ и U_{k0} для схемы с отрегулированным смещением ($U_{k0} \approx 0,5E_k$); заполненные таблицы 6.10, 6.11, 6.12; графики зависимостей $I_{k0} = \varphi_1(R_{Б1})$, $I_{k0} = \varphi_2(R_{Б2})$ и $U_{k0} = \varphi_3(R_{Б1})$, $U_{k0} = \varphi_4(R_{Б2})$, $I_{k0} = \varphi_5(^{\circ}t)$, $U_{k0} = \varphi_6(^{\circ}t)$; параметры температурной стабильности УК (ΔI_{k0} и ΔU_{k0} при переходе температуры от значения $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ к значению $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$); выводы по результатам исследований.

Таблица 6.12

Температурная стабильность УК (схема, рис. 6.6)

$^{\circ}t, ^{\circ}\text{C}$	$I_{k0}, \text{мА}$	$U_{k0}, \text{В}$	$^{\circ}t, ^{\circ}\text{C}$	$I_{k0}, \text{мА}$	$U_{k0}, \text{В}$

6.4. Контрольные вопросы

1. В чем состоит управление биполярным транзистором в УК?
2. Сквозная динамическая характеристика УК.
3. Что понимается под напряжением смещения БТ?
4. Каким образом осуществляется смещение БТ в схеме (рис. 6.3)?
5. Как изменится величина коллекторного тока транзистора в схеме (рис. 6.3) при увеличении сопротивления резистора R_B ?
6. Как изменится величина коллекторного напряжения транзистора в схеме (рис. 6.3) при уменьшении напряжения E_B ?

7. Каким образом реализуется смещение БТ в схеме (рис. 6.4)?

8. Как изменятся величины тока и напряжения коллектора транзистора в схеме (рис. 6.4) при уменьшении сопротивления резистора $R_{Б2}$?

9. Как изменятся величины тока и напряжения коллектора напряжения в схеме (рис. 6.4) при увеличении сопротивления резистора $R_{Б1}$?

10. Поясните принцип организации смещения БТ в схеме (рис. 6.5).

11. Какие функции выполняет резистор R_B в схеме (рис. 6.5)?

12. Как изменятся величины коллекторного тока и коллекторного напряжения транзистора (рис. 6.5) при уменьшении сопротивления резистора R_B ?

13. Как изменятся величины коллекторного тока и коллекторного напряжения в схеме (рис. 6.5) при увеличении напряжения E_B ?

14. Каким образом осуществляется смещение транзистора в схеме (рис. 6.6)?

15. Как влияют величины сопротивлений резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ на значения коллекторного тока и коллекторного напряжения транзистора в схеме (рис. 6.6)?

16. Каким образом следует изменить величину сопротивления $R_{Б1}$ в схеме (рис. 6.6), если требуется уменьшить значение коллекторного тока транзистора?

17. Что понимается под температурной стабильностью УК?

18. Как изменяются величины коллекторного тока и коллекторного напряжения транзистора в УК при уменьшении температуры?

6.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку; отчеты по п. 6.3.1 – 6.3.4, включая выводы по каждому пункту; общие выводы по лабораторной работе.

6.6. Порядок защиты лабораторной работы

Для защиты работы необходимо предоставить преподавателю полностью оформленный отчет и ответить на контрольные вопросы.

Ответы на контрольные вопросы, применительно к конкретным схемам, должны быть обоснованными и аргументированными. *Например:* При увеличении сопротивления резистора R_B (рис. 6.3) уменьшается базовый ток БТ I_{B0} , а значит и напряжение смещения $U_{бэ0}$ (ВАХ диода), транзистор закрывается и его коллекторный ток I_{k0} уменьшается.

Уменьшение I_{B0} при увеличении сопротивления R_B объясняется с помощью закона Ома для участка цепи: $I_{B0} = \frac{E_B}{R_\Gamma + R_B + R_{вх}}$, $R_{вх}$ – входное сопротивление транзистора (сопротивление эмиттерного перехода).

При уменьшении I_{k0} уменьшается падение напряжения на коллекторном резисторе R_K : $U_{Rk} = I_{k0}R_K$. Так как $U_{k0} = E_k - U_{Rk}$, то коллекторное напряжение транзистора U_{k0} увеличивается.

Лабораторная работа №7

Исследование усилительных каскадов с автоматическим смещением на постоянном токе

7.1. Цель работы:

1. Изучение схематических решений, предназначенных для термостабилизации усилительных каскадов;
2. Знакомство с автоматической стабилизацией тока покоя биполярного транзистора в усилительном каскаде;
3. Исследование усилительных каскадов с автоматической стабилизацией тока покоя.

7.2. Теоретическая справка

7.2.1. Температурная стабильность усилительного каскада с фиксированным смещением

Изменение температуры является основным фактором изменения тока коллектора транзистора (рис. 7.1).

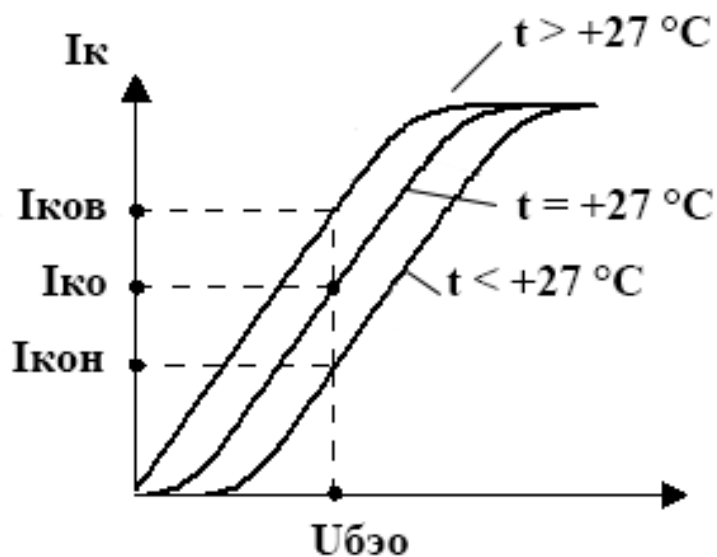


Рис. 7.1. Изменение тока покоя транзистора в зависимости от температуры

При нормальной температуре (около $+27^{\circ}\text{C}$) при напряжении смещения $U_{бэ0}$ коллекторный ток транзистора имеет величину $I_{к0}$. При увеличении температуры ($t > +27^{\circ}\text{C}$) коллекторный ток увеличивается ($I_{к0в}$), при уменьшении температуры ($t < +27^{\circ}\text{C}$) коллекторный ток транзистора уменьшается ($I_{к0н}$). При постоянном значении напряжения смещения $U_{бэ0}$, I_k в значительной степени зависит от температуры.

7.2.2. Принцип термостабилизации усилительного каскада за счет автоматического смещения

Под автоматическим смещением понимается автоматическое изменение напряжения $U_{бэ0}$ таким образом, чтобы постоянный ток коллектора $I_{к0}$ стабилизировался (рис. 7.1). Для решения данной задачи принцип изменения напряжения смещения должен быть следующим: при увеличении температуры ($^{\circ}t \uparrow$) напряжение $U_{бэ0}$ уменьшается ($U_{бэ0} \downarrow$); при уменьшении температуры ($^{\circ}t \downarrow$) напряжение $U_{бэ0}$ увеличивается ($U_{бэ0} \uparrow$) (рис. 7.2).

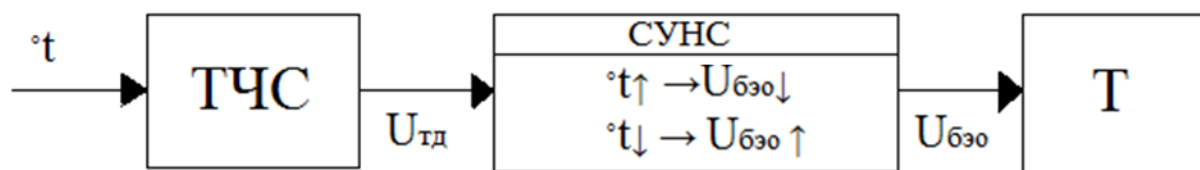


Рис. 7.2. Структура схемы термостабилизации усилительного каскада (УК)

Термочувствительная схема (ТЧС) преобразует температуру в напряжение $U_{тд}$ (термодатчик), которое является входным сигналом для схемы управления напряжением смещения (СУНС). На выходе СУНС формируется напряжение $U_{бэ0}$, которые определяет состояние транзистора и его коллекторный ток $I_{к0}$ (рис. 7.2).

Наиболее часто блоки ТЧС и СУНС объединяются в единый структурный элемент (эмиттерная, коллекторная, комбинированная стабилизация тока покоя транзистора). Если в схеме каскада присутствует термочувствительный элемент, то блок ТЧС выделяется в качестве отдельного элемента структуры (терморезистор в цепи делителя напряжения смещения транзистора).

7.2.3. Усилительный каскад с термочувствительным резистором в цепи делителя смещения

В схеме (рис. 7.3) напряжение смещения транзистора $U_{бэ0}$ меняется в зависимости от температуры транзистора.

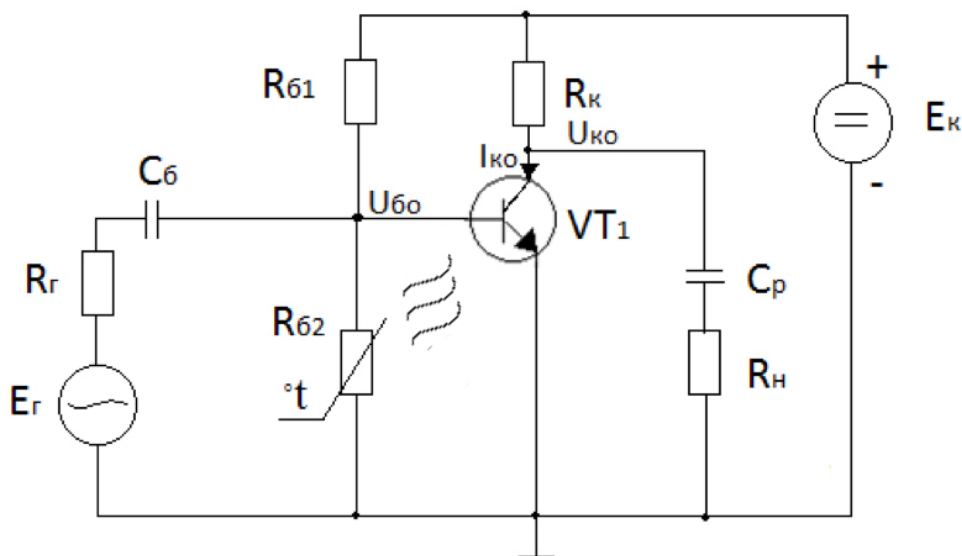


Рис. 7.3. Организация автоматического смещения в УК с терморезистором

Сопротивление резистора R_{62} зависит от температуры транзистора VT_1 (оба элемента имеют тепловой контакт друг с другом). При повышении температуры коллекторный ток транзистора $I_{к0}$ увеличивается. Так как температурный коэффициент сопротивления полупроводникового терморезистора R_{62} отрицателен, то его сопротивление уменьшается. Уменьшение сопротивления резистора R_{62} приводит к уменьшению напряжения смещения $U_{бэ0}$,

увеличению сопротивления перехода коллектор-эмиттер транзистора VT_1 и уменьшению значения $I_{к0}$. При понижении температуры $I_{к0}$ уменьшается, сопротивление $R_{б2}$ увеличивается, напряжение смещения $U_{бэ0}$ возрастает, сопротивление перехода коллектор-эмиттер транзистора VT_1 уменьшается и коллекторный ток $I_{к0}$ увеличивается.

Таким образом, в УК (рис. 7.3) обеспечивается термостабилизация тока покоя транзистора $I_{к0}$.

Для эффективной стабилизации тока покоя транзистора необходимо обеспечить вполне определенный закон изменения сопротивления терморезистора $R_{б2}$ от температуры: $R_{б2} = \varphi(^{\circ}t)$. В ряде случаев вместо одинакового терморезистора приходится использовать двухполюсник, состоящий из нескольких резисторов (обычных и терморезисторов).

7.2.4. Коллекторная стабилизация тока покоя транзистора

На рис. 7.4 представлена схема термостабилизированного УК, в котором реализована стабилизация $I_{к0}$ со стороны коллектора.

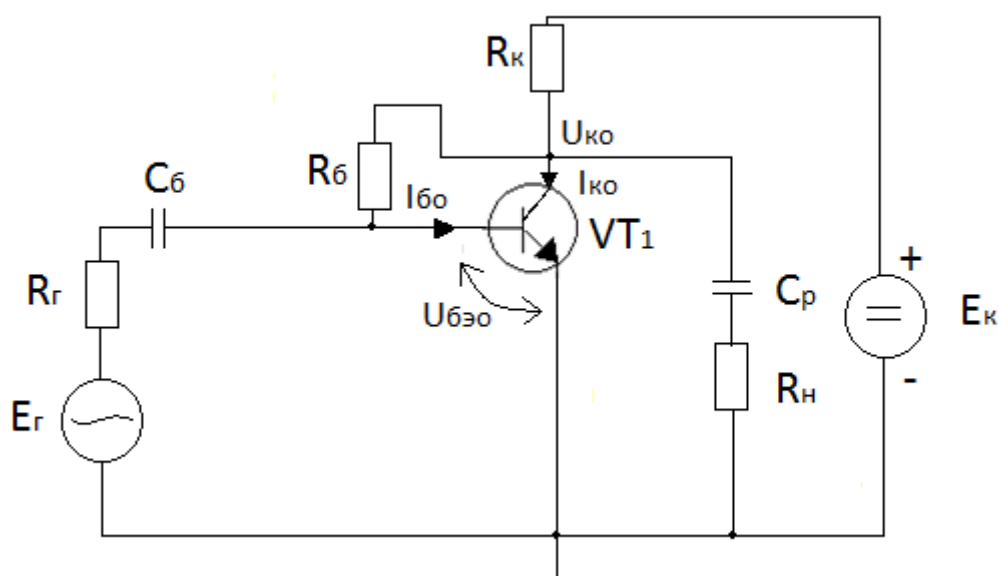


Рис. 7.4. Коллекторная стабилизация тока покоя транзистора

При повышении температуры $I_{к0}$ увеличивается, при этом возрастает ток, протекающий через резистор R_k . Падение напряжения на R_k увеличивается, потенциал коллектора $U_{к0}$ уменьшается, падение напряжения на резисторе R_b также уменьшается, что обуславливает понижение значения тока базы транзистора $I_{б0}$. Транзистор закрывается и ток коллектора $I_{к0}$ уменьшается.

Понижение температуры приводит к уменьшению $I_{к0}$ и увеличению $U_{к0}$, что в конечном итоге обуславливает рост $I_{б0}$ и, следовательно, увеличение $I_{к0}$.

Таким образом, реализуется механизм стабилизации значения тока коллектора, биполярного транзистора. Аналогичная схема УК с фиксированным смещением (рис. 7.5) значительно проигрывает схеме (рис. 7.4) в плане температурной стабильности $I_{к0}$.

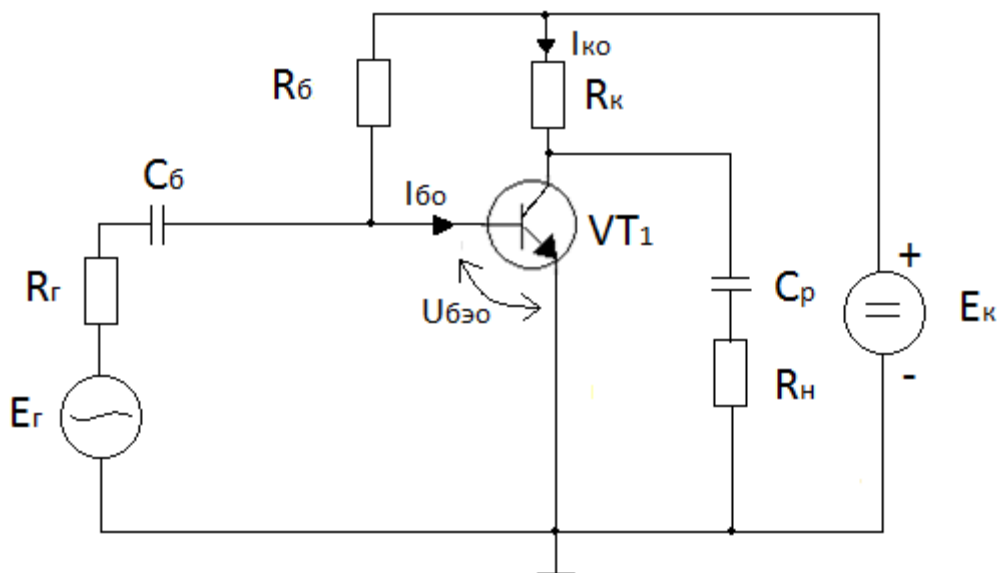


Рис. 7.5. Смещение транзистора в УК с фиксированным током базы

В схеме на рис. 7.5 элементы E_k и R_b образуют источник почти постоянного значения тока базы, который лишь в незначительной степени зависит от температуры $I_{к0} \approx const$. В то время как в схеме

на рис. 7.4 чувствительность $I_{\text{б0}}$ к колебаниям температуры намеренно увеличена $I_{\text{б0}} = \varphi(^{\circ}t)$.

Другой вариант схемы автоматического смещения $I_{\text{б0}} = \varphi(^{\circ}t)$ представлен на рис. 7.6.

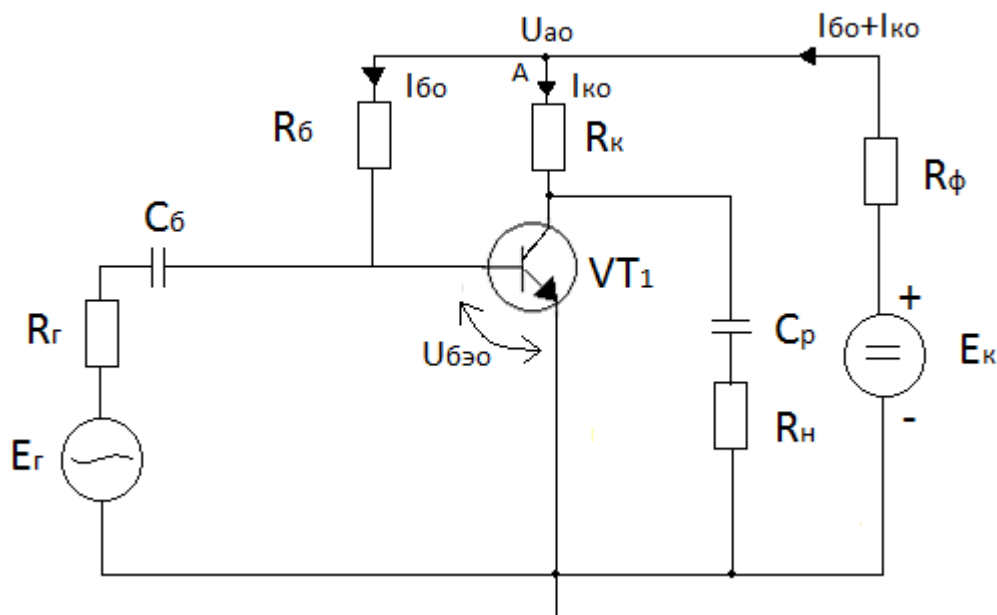


Рис. 7.6. Второй вариант схемы коллекторной стабилизации тока покоя транзистора

Схема (рис. 7.6) отличается от схемы (рис. 7.5) наличием резистора $R_{\text{ф}}$, через который проходит коллекторный ток транзистора. В точке А ток, протекающий от источника питания $E_{\text{к}}$, разделяется на ток базы $I_{\text{б0}}$ и ток коллектора $I_{\text{к0}}$. При изменении $I_{\text{к0}}$ изменяется падение напряжения на резисторе $R_{\text{ф}}$. Поэтому потенциал точки А является зависимым от $I_{\text{к0}}$ и от температуры: $U_{\text{а0}} = \varphi(I_{\text{к0}})$. При повышении температуры $I_{\text{к0}}$ увеличивается, $U_{\text{а0}}$ уменьшается. Это приводит к уменьшению $I_{\text{б0}}$ и, следовательно, к понижению величины тока коллектора $I_{\text{к0}}$. При уменьшении температуры $I_{\text{к0}}$ уменьшается, $U_{\text{а0}}$ увеличивается, $I_{\text{б0}}$ возрастает и, следовательно, $I_{\text{к0}}$ увеличивается.

Эффективность схем коллекторной стабилизации в значительной степени зависит от величин сопротивлений резисторов R_k (рис. 7.4) и R_ϕ (рис. 7.6). Чем больше сопротивление этих резисторов, тем более стабильными являются соответствующие УК.

7.2.5. Эмиттерная стабилизация тока покоя транзистора

Схема УК с автоматическим смещением (рис. 7.7) отличается от рассмотренных ранее схем наличием в цепи эмиттера транзистора резистора R_ε , что делает потенциал эмиттера $U_{\varepsilon 0}$ зависимым от тока коллектора (эмиттера).

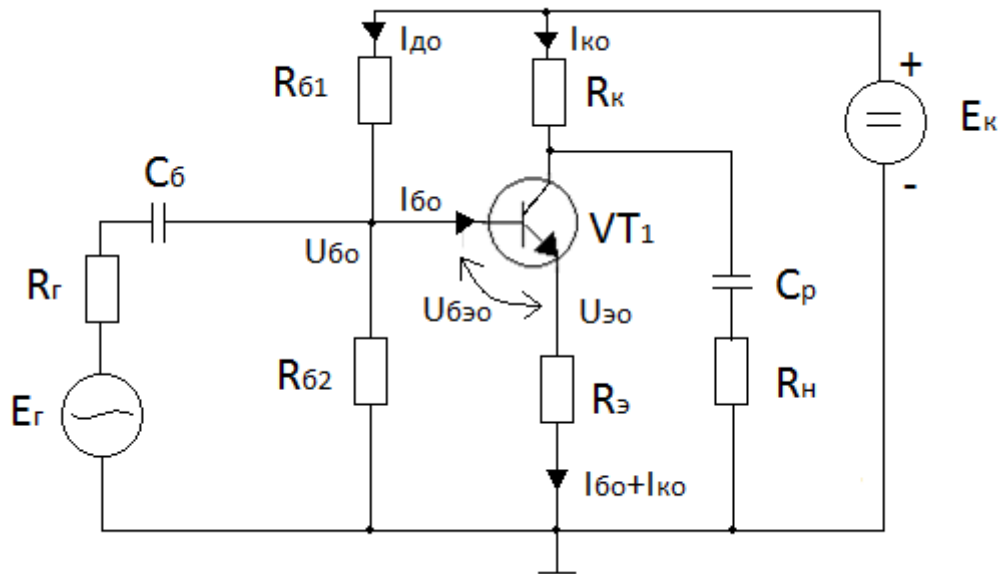


Рис. 7.7. Эмиттерная стабилизация тока покоя транзистора

Потенциал базы транзистора является величиной постоянной $U_{\text{бо}} = \text{const}$, так как напряжение $U_{\text{бо}}$ снимается с выхода резистивного делителя напряжения (R_{61}, R_{62}). Напряжение смещения $U_{\text{бо}\varepsilon 0} = U_{\text{бо}} - U_{\varepsilon 0}$.

При повышении температуры $I_{\text{ко}}$ увеличивается, потенциал эмиттера транзистора $U_{\varepsilon 0}$ возрастает, напряжение смещения $U_{\text{бо}\varepsilon 0}$ уменьшается, сопротивление транзистора увеличивается и ток коллектора $I_{\text{ко}}$ уменьшается.

Уменьшение температуры приводит к уменьшению $I_{ко}$, понижению потенциала эмиттера $U_{эо}$, увеличению напряжения смещения $U_{бэо}$, уменьшению сопротивления транзистора и увеличению $I_{ко}$.

Схема (рис. 7.7) является модернизацией схемы параллельного смещения (рис. 7.8).

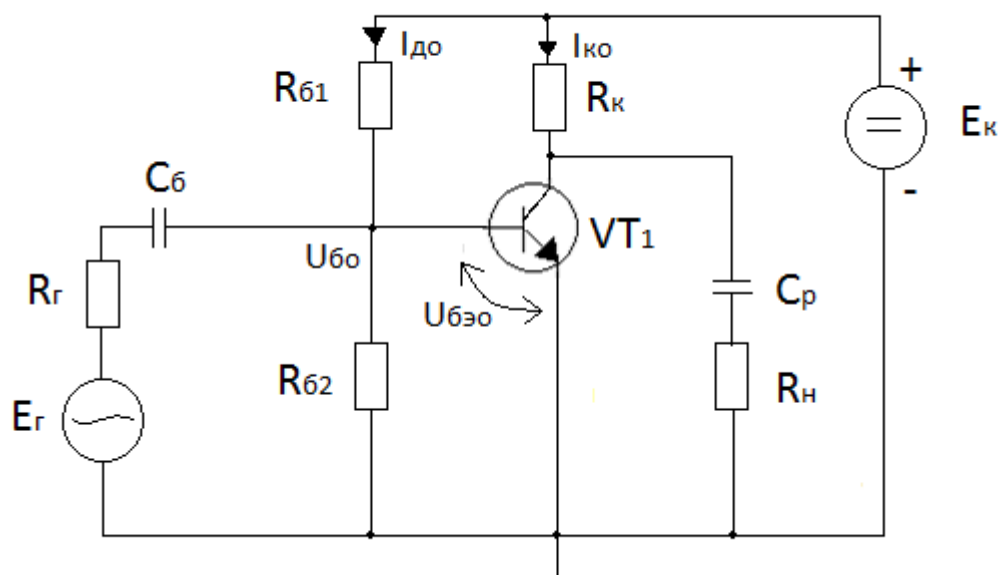


Рис. 7.8. Схема параллельного фиксированного смещения транзистора в УК

В схеме (рис. 7.8) напряжение смещения $U_{бэо} = const$. Поэтому на величину тока коллектора в значительной степени оказывает влияние температура. Можно заметить, что схема (рис. 7.8) является частным случаем схемы (рис. 7.7), когда $R_3 = 0$. Эффективность стабилизации $I_{ко}$ тем выше, чем больше сопротивление резистора R_3 .

7.2.6. Комбинированная стабилизация тока покоя транзистора

Схема (рис. 7.9) является комбинацией схем (рис. 7.6 и рис. 7.7), в которой одновременно реализованы и коллекторная, и эмиттерная стабилизация тока покоя транзистора.

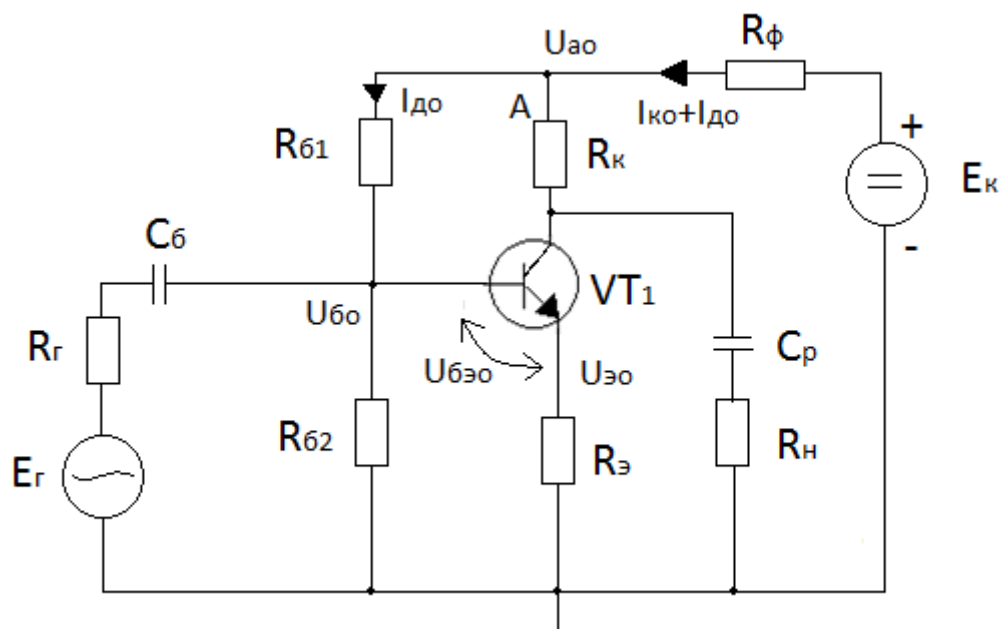


Рис. 7.9. Комбинированная стабилизация тока покоя транзистора в УК

При повышении температуры $I_{к0}$ увеличивается, возрастает падение напряжения на резисторе фильтра R_{ϕ} , $U_{ао}$ уменьшается. Это приводит к снижению напряжения на выходе делителя, задающего напряжение смещения $U_{б0}$. Одновременно при росте $I_{к0}$ увеличивается падение напряжения на эмиттерном резисторе $U_{э0}$. Следовательно напряжение смещения $U_{бэ0} = U_{б0} - U_{э0}$ уменьшается более эффективно: с одной стороны за счет уменьшения потенциала базы $U_{б0}$, с другой – за счет увеличения потенциала эмиттера $U_{э0}$.

При уменьшении температуры $I_{к0}$ уменьшается и напряжение смещения $U_{бэ0}$ увеличивается как за счет увеличения $U_{б0}$, так и за счет уменьшения $U_{э0}$. Сопротивление перехода коллектор-эмиттер транзистора уменьшается и ток коллектора увеличивается.

Эффективность стабилизации зависит от сопротивлений резисторов $R_{э}$ и R_{ϕ} . Чем больше сопротивления резисторов $R_{э}$ и R_{ϕ} , тем более эффективно осуществляется стабилизация.

7.3. Порядок выполнения работы

7.3.1. Выполнить регулировку усилительного каскада (рис. 7.3)

Порядок выполнения эксперимента:

1. Построить схему (рис. 7.3), параметры элементов схемы даны в таблице 7.1; принять $C_6 = 40 \text{ мкФ}$, $C_p = 20 \text{ мкФ}$, $R_H = 3 \text{ кОм}$;

Таблица 7.1

Параметры элементов схемы рис. 7.3

Номер варианта	R_{61} , кОм	R_{62} , кОм	R_k , кОм	Тип транзистора
1	27,0	5,0	0,8	2N2218
2	25,5	4,2	0,8	2N2222
3	30,5	4,5	0,9	2N2222A
4	35,0	4,7	0,9	2N3252
5	25,0	5,2	1,0	2N3439
6	27,0	5,5	1,0	2N3506
7	25,5	5,7	1,1	2N3725
8	30,5	4,5	1,1	2N3903
9	32,5	4,3	1,2	2N3904
10	34,0	3,9	1,2	2N3946
11	31,5	3,7	0,9	2N4123
12	26,5	4,1	0,9	2N4124
13	27,5	4,6	1,0	2N4400
14	28,5	4,8	1,0	MJE240
15	33,0	5,5	1,1	2N2218

2. Принять параметры источника входного сигнала $E_{\Gamma} = 0$, $f_{\Gamma} = 50 \text{ Гц}$;

3. Задать $E_k = 9 \text{ В}$, температуру $+27^{\circ}\text{C}$;

4. Изменяя сопротивление резистора R_{61} , отрегулировать схему – задать линейный режим работы транзистора ($U_{k0} \approx 0,5E_k$);

5. Занести результаты регулировки схемы в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

Результаты регулировки схемы (рис. 7.3) при температуре +27°C

R_{61} , кОм	R_{62} , кОм	R_K , кОм	U_{KO} , В	I_{KO} , мА	Тип транзистора

Отчет по п. 7.3.1 должен содержать: схему (рис. 7.3); заполненную таблицу 7.2; вывод по результатам исследований.

7.3.2. Определение требуемого вида зависимости сопротивления терморезистора R_{62} от температуры для схемы (рис. 7.3)

Определить требуемый вид зависимости сопротивления терморезистора R_{62} от температуры для схемы (рис. 7.3).

Порядок выполнения исследований:

1. Занести значения сопротивления терморезистора R_{62} отрегулированной в п. 7.3.1 для температуры +27°C схемы (рис. 7.3) в таблицу 7.3;

Таблица 7.3

Требуемая зависимость сопротивления терморезистора R_{62} от температуры в схеме (рис. 7.3)

Температура, °C	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	+5
R_{62} , кОм									

Температура, °C	+10	+15	+20	+27	+30	+35	+40
R_{62} , кОм							

2. Задать температуру -35°C ;
3. Изменяя сопротивление резистора R_{62} , добиться того, чтобы величина коллекторного тока транзистора стала равна значению $I_{\text{ко}}$ для температуры $+27^{\circ}\text{C}$;
4. Занести значение сопротивления R_{62} в таблицу 7.3;
5. Повторить исследования зависимости $R_{62} = \varphi(^{\circ}t)$ для остальных значений температур (табл. 7.3), результаты занести в таблицу 7.3;
6. Построить график зависимости $R_{62} = \varphi(^{\circ}t)$;
7. Сделать выводы по результатам исследований.

7.3.3. Исследование температурной стабильности схемы без компенсации температурной зависимости $I_{\text{ко}}$

Провести исследование температурной стабильности схемы без компенсации температурной зависимости $I_{\text{ко}}$ (рис. 7.5).

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 7.5), тип транзистора, сопротивление резистора $R_{\text{к}}$ взять из табл. 7.1, принять сопротивление резистора $R_6 = 200 \text{ кОм}$, $C_6 = 40 \text{ мкФ}$, $C_{\phi} = 200 \text{ мкФ}$;
2. Отрегулировать схему для температуры $+27^{\circ}\text{C}$ (рис. 7.5) – добиться того, чтобы $U_{\text{ко}} \approx 0,5E_{\text{к}}$;
3. Изменяя температуру от -35 до $+40^{\circ}\text{C}$, снять зависимость $I_{\text{ко}}$ и $U_{\text{ко}}$ от температуры, результаты занести в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Зависимость режима работы транзистора в схеме (рис. 7.5) от температуры

Температура, °C	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
$I_{\text{ко}}, \text{мА}$								
$U_{\text{ко}}, \text{В}$								

Температура, °C	+5	+10	+15	+20	+27	+30	+35	+40
$I_{\text{ко}}, \text{мА}$								
$U_{\text{ко}}, \text{В}$								

4. Построить графики зависимостей $I_{\text{ко}} = \varphi_1(^{\circ}t)$, $U_{\text{ко}} = \varphi_2(^{\circ}t)$;

5. Определить диапазон изменения тока коллектора для заданного диапазона температур (табл. 7.4) $\Delta I_{\text{ко}}$;

6. Сделать выводы по результатам исследований.

Отчет по п. 7.3.3 должен содержать: схему (рис. 7.5); заполненную таблицу 7.4, графики зависимостей $I_{\text{ко}} = \varphi_1(^{\circ}t)$, $U_{\text{ко}} = \varphi_2(^{\circ}t)$; значение $\Delta I_{\text{ко}}$; выводы по результатам исследований.

7.3.4. Исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.4)

Порядок проведения исследования:

1. Выполнить исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.4).

2. Построить схему (рис. 7.4), принять $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$, $R_{\text{б}} = 100 \text{ кОм}$, $C_{\text{б}} = 40 \text{ мкФ}$, $C_{\text{ф}} = 200 \text{ мкФ}$, $R_{\text{н}} = 3 \text{ кОм}$;

3. Выполнить регулировку схемы (рис. 7.4), добившись того, чтобы $U_{\text{ко}} \approx 0,5E_{\text{к}}$ при температуре $+27^{\circ}\text{C}$;

4. Определить значение $I_{\text{ко}}$ для температуры -35 и $+40^\circ\text{C}$;
5. Записать значения $I_{\text{ко}}$ для температуры -35°C ($I_{\text{ко}}(-35)$) и для температуры $+40^\circ\text{C}$ ($I_{\text{ко}}(+40)$);
6. Рассчитать значение $\Delta I_{\text{ко}} = I_{\text{ко}}(40) - I_{\text{ко}}(-35)$;
7. Повторить определение значения $\Delta I_{\text{ко}}$ при $R_{\text{к}} = 1,5 \text{ кОм}$ и $R_{\text{к}} = 2,0 \text{ кОм}$;
8. Результаты исследований занести в таблицу 7.5;

Таблица 7.5

Температурная нестабильность схемы (рис. 7.4)

$R_{\text{к}}, \text{кОм}$	1,0	1,5	2,0
$I_{\text{ко}}(-35), \text{мА}$			
$I_{\text{ко}}(+40), \text{мА}$			
$\Delta I_{\text{ко}}, \text{мА}$			

9. Сравнить результаты исследования температурной стабильности схемы (рис. 7.4) при различных значениях $R_{\text{к}}$, сделать выводы.

Отчет по п. 7.3.4 должен содержать: схему (рис. 7.4); заполненную таблицу 7.5; выводы по результатам исследования.

7.3.5. Исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.6)

Провести исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.6).

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 7.6) приняв $R_{\text{б}} = 100 \text{ кОм}$, $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$, $E_{\text{т}} = 0 \text{ В}$, $R_{\text{ф}} = 250 \text{ Ом}$, $C_{\text{б}} = 40 \text{ мкФ}$, $C_{\text{р}} = 200 \text{ мкФ}$, $R_{\text{н}} = 3 \text{ кОм}$, $E_{\text{к}} = 9 \text{ В}$, тип транзистора в соответствии с табл. 7.1;

2. Изменяя сопротивления резистора R_{ϕ} выполнить регулировку схемы (рис. 7.6) для температуры $+27^{\circ}\text{C}$ ($U_{\text{ко}} \approx 0,5E_{\text{к}}$);
3. Определить значения $I_{\text{ко}}$ для температур -35 и $+40^{\circ}\text{C}$;
4. Записать значения $I_{\text{ко}}(-35)$ и $I_{\text{ко}}(40)$;
5. Рассчитать $\Delta I_{\text{ко}} = I_{\text{ко}}(40) - I_{\text{ко}}(-35)$;
6. Повторить определение значения $\Delta I_{\text{ко}}$ при $R_{\phi} = 500 \text{ Ом}$ и $R_{\phi} = 750 \text{ Ом}$;
7. Результаты исследования занести в табл. 7.6;

Таблица 7.6

Температурная нестабильность схемы (рис. 7.6)

$R_{\phi}, \text{Ом}$	250	500	750
$I_{\text{ко}}(-35), \text{мА}$			
$I_{\text{ко}}(+40), \text{мА}$			
$\Delta I_{\text{ко}}, \text{мА}$			

8. Сравнить результаты исследования температурной стабильности схемы (рис. 7.6) при различных значения R_{ϕ} , сделать выводы.

Отчет по п. 7.3.5 должен содержать: схему (рис. 7.6); заполненную табл. 7.6; выводы по результатам исследования.

7.3.6. Сравнение температурной стабильности схем (рис. 7.4, 7.5, 7.6)

Выполнить сравнения температурной стабильности схем (рис. 7.4, 7.5, 7.6).

Порядок выполнения исследования:

1. Занести в табл. 7.7 результаты исследований температурной неустойчивости коллекторного тока транзистора $\Delta I_{\text{ко}}$;

Таблица 7.7

Температурная неустойчивость схем (рис. 7.4, 7.5, 7.6)

Схемы	Рис. 7.4			Рис. 7.5	Рис. 7.6		
	$R_{\text{к}}, \text{кОм}$				$R_{\text{ф}}, \text{Ом}$		
	1,0	1,5	2,0		200	500	750
$\Delta I_{\text{кО}}, \text{мА}$							

2. Проанализировать данные табл. 7.7 и сделать выводы об эффективности коллекторной стабилизации тока покоя транзистора в усилительном каскаде.

Отчет по п. 7.3.6 должен содержать: заполненную таблицу 7.7; выводы по результатам анализа температурной неустойчивости схем (рис. 7.4, 7.5, 7.6).

7.3.7. Исследование температурной стабильности схем без компенсации температурной зависимости $I_{\text{ко}}$ (рис. 7.8)

Провести исследование температурной стабильности схем без компенсации температурной зависимости $I_{\text{ко}}$ (рис. 7.8).

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 7.8), тип транзистора взять из табл. 7.1, принять $R_{\text{б1}} = 50 \text{ кОм}$, $R_{\text{б2}} = 5 \text{ кОм}$, $R_{\text{к}} = 250 \text{ Ом}$, $C_{\text{б}} = 40 \text{ мкФ}$, $C_{\text{р}} = 200 \text{ мкФ}$, $R_{\text{н}} = 3 \text{ кОм}$, $E_{\text{к}} = 9 \text{ В}$;

2. Отрегулировать схему для температуры $+27^\circ\text{C}$ – добиться того, чтобы $U_{\text{ко}} \approx 0,5E_{\text{к}}$;

3. Провести исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.8) аналогично п. 7.3.3.

7.3.8. Исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.7)

Провести исследование температурной стабильности схемы (рис. 7.7).

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 7.7) принять $R_{61} = 50 \text{ кОм}$, $R_{62} = 5 \text{ кОм}$, $E_T = 0 \text{ В}$, $R_K = 1 \text{ кОм}$, $C_6 = 40 \text{ мкФ}$, $C_p = 200 \text{ мкФ}$, $R_H = 3 \text{ кОм}$, $E_K = 9 \text{ В}$, $R_3 = 250 \text{ Ом}$, тип транзистора взять из табл. 7.1;

2. Отрегулировать схему при температуре $+27^\circ\text{C}$ ($U_{KO} \approx 0,5E_K$);

3. Определить значения I_{KO} для температур -35°C и $+40^\circ\text{C}$;

4. Рассчитать $\Delta I_{KO} = I_{KO}(40) - I_{KO}(-35)$;

5. Повторить определение значения ΔI_{KO} при $R_3 = 500 \text{ Ом}$ и $R_3 = 750 \text{ Ом}$;

6. Результаты исследования занести в табл. 7.8;

Таблица 7.8

Температурная нестабильность схемы (рис. 7.7)

$R_3, \text{Ом}$	250	500	750
$I_{KO}(-35), \text{мА}$			
$I_{KO}(+40), \text{мА}$			
$\Delta I_{KO}, \text{мА}$			

Сравнить результаты исследования температурной стабильности схемы (рис. 7.8) при различных значениях R_3 , сделать выводы.

Отчет по п. 7.3.8. должен содержать: схему (рис. 7.7); заполненную таблицу 7.8; выводы по результатам исследования.

7.3.9. Сравнение температурной стабильности схем (рис. 7.7 и 7.8)

Произвести сравнение температурной стабильности схем (рис. 7.7 и 7.8).

Порядок выполнения исследования:

1. Занести в табл. 7.9 результаты исследований температурной нестабильности коллекторного тока транзистора $\Delta I_{\text{ко}}$;

Таблица 7.9

Температурная нестабильность схем (рис. 7.7, 7.8)

Схемы	Рис.7.7			Рис.7.8
	$R_3, \text{Ом}$			
	250	500	750	
$\Delta I_{\text{ко}}, \text{мА}$				

2. Проанализировать данные табл. 7.9 и сделать выводы об эффективности эмиттерной стабилизации тока покоя транзистора в усилительном каскаде.

Отчет по п. 7.3.9 должен содержать: заполненную таблицу 7.9; выводы по результатам анализа температурной нестабильности схем (рис. 7.7 и 7.8).

7.3.10. Исследование температурной нестабильности схемы (рис. 7.9)

Провести исследование температурной нестабильности схемы (рис. 7.9).

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 7.9), принять $R_{61} = 50 \text{ кОм}$, $R_{62} = 5 \text{ кОм}$, $E_T = 0 \text{ В}$, $R_K = 1 \text{ кОм}$, $C_6 = 40 \text{ мкФ}$, $C_p = 200 \text{ мкФ}$, $R_H = 3 \text{ кОм}$, $E_K = 9 \text{ В}$, $R_3 = 250 \text{ Ом}$, $R_\phi = 100 \text{ Ом}$, тип транзистора взять согласно табл. 7.1;
2. Отрегулировать схему при температуре $+27^\circ\text{C}$ ($U_{KO} \approx 0,5E_K$);
3. Определить значения I_{KO} для температур -35°C и $+40^\circ\text{C}$;
4. Рассчитать $\Delta I_{KO} = I_{KO}(40) - I_{KO}(-35)$;
5. Повторить определение значения ΔI_{KO} при значениях сопротивлений R_ϕ и R_3 , представленных в табл. 7.10;
6. Результаты исследования занести в табл. 7.10;

Таблица 7.10

Температурная нестабильность схемы (рис. 7.9)

$R_\phi, \text{Ом}$	100	100	100	200	200	200	300	300	300
$R_3, \text{Ом}$	250	500	750	250	500	750	250	500	750
$I_{KO}(-35), \text{мА}$									
$I_{KO}(+40), \text{мА}$									
$\Delta I_{KO}, \text{мА}$									

7. Сравнить результаты исследования температурной стабильности схемы (рис. 7.9) при различных сопротивлениях резисторов R_3 и R_ϕ , сделать выводы.

Отчет по п. 7.3.10 должен содержать: схему (рис. 7.9); заполненную таблицу 7.9; выводы по результатам анализа температурной стабильности схемы (рис. 7.9).

7.4. Контрольные вопросы

1. Температурная стабильность усилительных каскадов с фиксированным смещением.
2. Чем отличается автоматическое смещение транзистора от фиксированного смещения?
3. В чем заключается принцип температурной стабилизации тока покоя транзистора в усилительном каскаде?
4. Объясните работу автоматического смещения в схеме (рис. 7.3).
5. Объясните работу автоматического смещения в схеме (рис. 7.4).
6. Как зависит температурная стабильность схемы (рис. 7.4) от сопротивления резистора R_K ?
7. Какая из схем (рис. 7.4 или рис. 7.5) характеризуется большой температурной стабильностью и почему?
8. Объясните работу автоматического смещения в схеме (рис. 7.6).
9. Как зависит температурная стабильность схемы (рис. 7.6) от сопротивления резистора R_Φ ?
10. Объясните работу автоматического смещения в схеме (рис. 7.7).

11. Как зависит температурная стабильность схемы (рис. 7.7) от сопротивления резистора R_3 ?

12. Какая из схем (рис. 7.7 или рис. 7.8) характеризуется большей температурной чувствительностью и почему?

13. Объясните работу автоматического смещения в схеме (рис. 7.9).

14. Какая из схем (рис. 7.7 или рис. 7.9) характеризуется большей чувствительностью к температуре и почему?

7.5. Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку; отчеты по п. 7.3.1 – 7.3.10; общие выводы по лабораторной работе.

7.6. Порядок защиты лабораторной работы

Для защиты лабораторной работы необходимо предоставить преподавателю полностью оформленный отчет и ответить на предложенные контрольные вопросы.

Лабораторная работа №8

Исследование усилителей постоянного тока на ОУ

8.1. Цель работы:

1. Изучение теоретических основ операционных усилителей (ОУ);
2. Знакомство с усилителями постоянного тока, реализованными на базе ОУ;
3. Исследование усилителей постоянного тока.

8.2. Теоретические сведения

8.2.1. Общие сведения об ОУ

Операционными являются усилители, имеющие в общем случае пять выводов: два входа, один выход и два вывода для подключения электропитания (рис. 8.1).

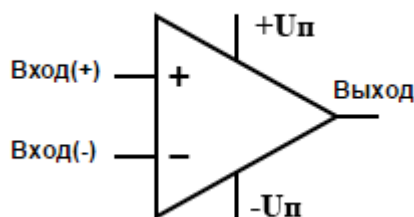


Рис. 8.1. Выводы ОУ

Вход (+) называется неинвертирующим входом, вход (-) — инвертирующим входом. Полярность выходного сигнала зависит не только от полярности подключенного к ОУ входного сигнала, но и от того, к какому из входов данный источник подключается (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Полярность выходного сигнала ОУ

Вход (+)	Вход (-)	Выход ОУ
Положительная	Нет напряжения	Положительная
Отрицательная	Нет напряжения	Отрицательная
Нет напряжения	Положительная	Отрицательная
Нет напряжения	Отрицательная	Положительная

Типовая схема подключения ОУ к источнику питания и к нагрузке показана на рис. 8.2.

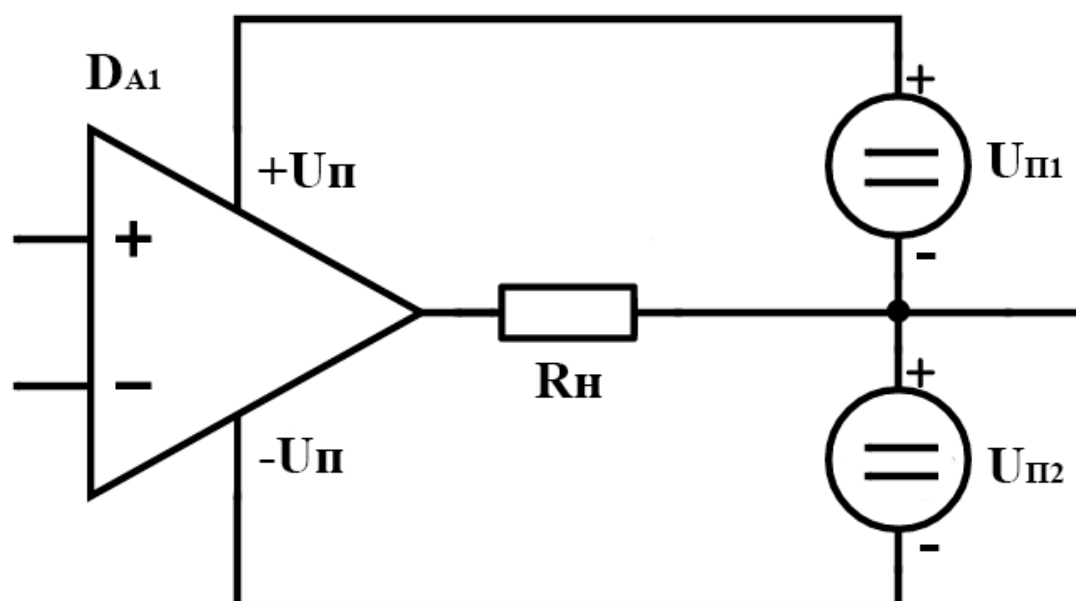


Рис. 8.2. Подключения ОУ к источнику питания и к нагрузке

Источник питания состоит из двух равных по напряжению источников $U_{п1}$ и $U_{п2}$ (двухполярный источник питания). Такой источник имеет общий провод (соединение минуса $U_{п1}$ и плюса $U_{п2}$), который подключается к земле и два полюса: положительный (полюс $U_{п1}$) и отрицательный (минус $U_{п2}$).

Разность напряжений входа (+) $U_{вх}^+$ и входа (-) $U_{вх}^-$ называется дифференциальным напряжением $E_d = U_{вх}^+ - U_{вх}^-$. Выходное

напряжение ОУ $U_{\text{вых}} = E_{\text{д}} \cdot K$, где K – коэффициент усиления ОУ. Полярность $U_{\text{вых}}$ совпадает с полярностью $E_{\text{д}}$.

При анализе схем с ОУ используют два правила, справедливые для идеального операционного усилителя:

Правило 1. Если ОУ находится в линейном режиме ($U_{\text{вых}} \neq +U_{\text{нас}}$ и $U_{\text{вых}} \neq -U_{\text{нас}}$, рис.8.3), дифференциальное напряжение равно нулю.

Правило 2. Входы ОУ ток не потребляют (со стороны входов сопротивление ОУ очень велико).

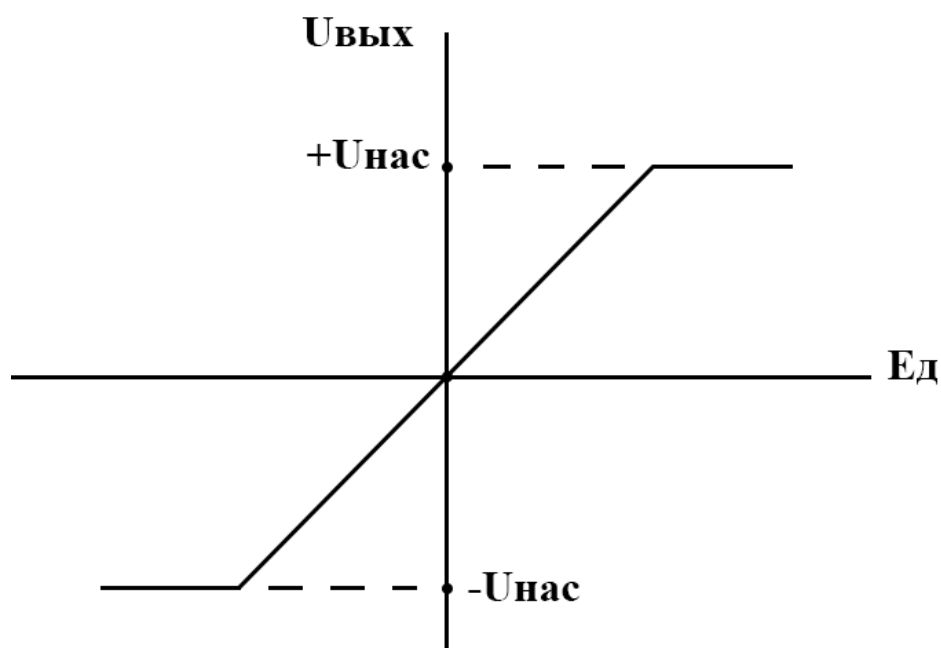


Рис. 8.3. Взаимосвязь входного и выходного напряжений ОУ

Диапазон изменения $E_{\text{д}}$, при котором ОУ находится в линейном режиме, достаточно узок, что обуславливается высоким значением коэффициента усиления ОУ (тысячи и десятки тысяч единиц). Так, например, для ОУ с $K = 100\,000$ единиц при $U_{\text{н}} = \pm 15\text{В}$ диапазон значений $E_{\text{д}}$, при которых ОУ остается в линейном режиме, составляет приблизительно $\pm 140\text{ мкВ}$.

Таким образом, ОУ, включенный по схеме (рис. 8.2), может находиться только в одном из двух состояний:

$$U_{\text{вых}} = +U_{\text{нас}}$$

либо

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{нас}}.$$

Даже при отсутствии напряжений на своих входах выходное напряжение ОУ равно либо $+U_{\text{нас}}$, либо $-U_{\text{нас}}$, вследствие некоторой неизбежной несимметрии электронной схемы ОУ.

Организация отрицательной обратной связи (ООС) в ОУ существенно меняет его поведение (рис. 8.4).

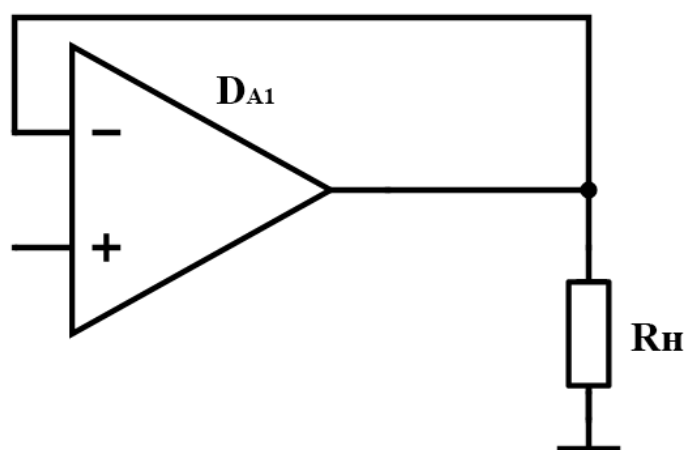


Рис. 8.4. Организация ООС в операционном усилителе

Если ОУ охвачен ООС, то он «стремится» к сохранению линейного режима работы, при котором $E_{\text{д}} = 0$. Линейный режим работы ОУ сохраняется только в том случае, если величины напряжений между его выводами не превышают некоторых предельных значений. Так, например, ОУ (рис. 8.4) не сможет оставаться в линейном режиме, если потенциал его неинвертируемого входа будет больше или равен напряжению насыщения.

Обычно ОУ способны отдавать в нагрузку сравнительно небольшой ток (единицы или десятки мА). Выходные в цепи ОУ имеют защиту – схемы ограничения тока. Вследствие этого ОУ

выдерживают даже режим короткого замыкания в их выходных цепях. На рис. 8.5 предоставлен график зависимости выходного тока от сопротивления нагрузки.

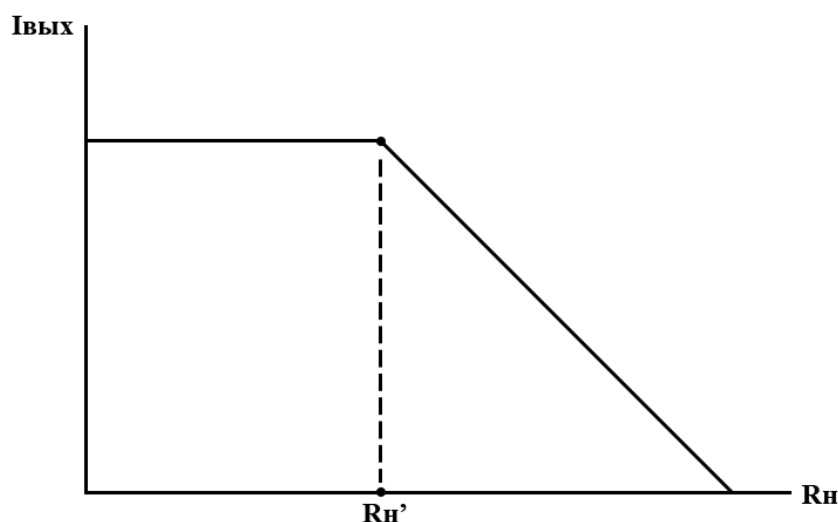


Рис. 8.5. Зависимость выходного тока ОУ от сопротивления нагрузки

При малых сопротивлениях нагрузки выходной ток ОУ $I_{\text{вых}}$ максимален (работа схемы защиты выходной цепи). По мере увеличения сопротивления нагрузки ($R_{\text{н}} > R_{\text{н}}'$) выходной ток ОУ уменьшается, что объясняется законом Ома: $I_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}/R_{\text{н}}$.

Сопротивление нагрузки может оказывать влияние на величину выходного напряжения (рис. 8.6).

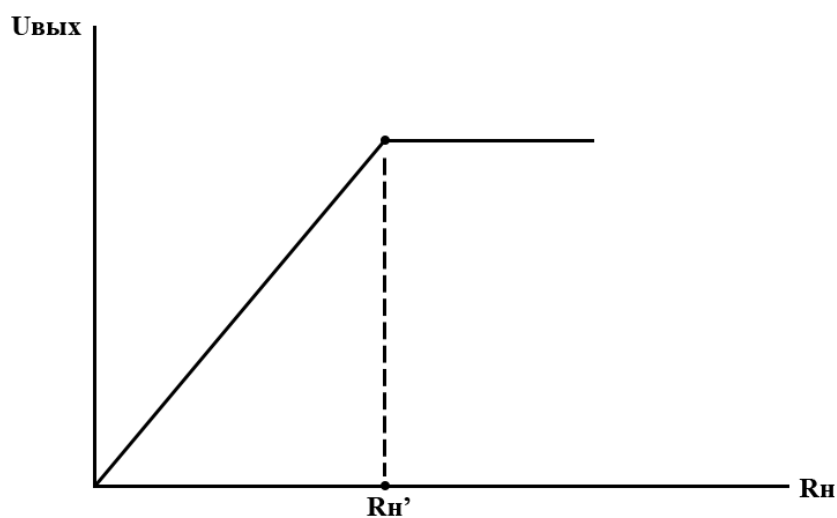


Рис. 8.6. Зависимость выходного напряжения ОУ от сопротивления нагрузки

При малых сопротивлениях нагрузки $U_{\text{вых}}$ мало из-за небольшой величины выходного тока ОУ (срабатывание защиты): $U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} R_{\text{н}}$. Начиная с сопротивления $R'_{\text{н}}$ ($R_{\text{н}} > R'_{\text{н}}$), выходное напряжение ОУ практически перестает изменяться (защита выхода ОУ отключается).

Для схемы (рис. 8.4) зависимость выходного напряжения от входного $U_{\text{вх}}$, подключенного ко входу (+), имеет вид (рис. 8.7)

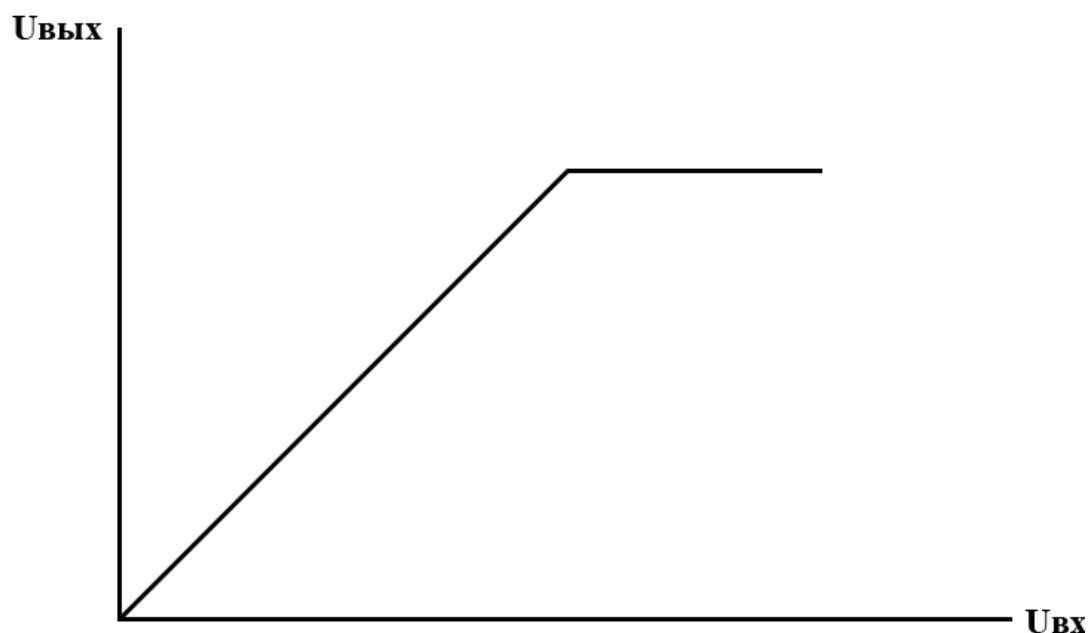


Рис. 8.7. Взаимосвязь входного и выходного напряжений ОУ

Пока $U_{\text{вых}}$ не равно положительному (отрицательному) напряжению насыщения, выходное напряжение ОУ прямо пропорционально выходному напряжению.

8.2.2. Повторитель напряжения

Схема повторителя напряжения на ОК приведена на рис 8.8.

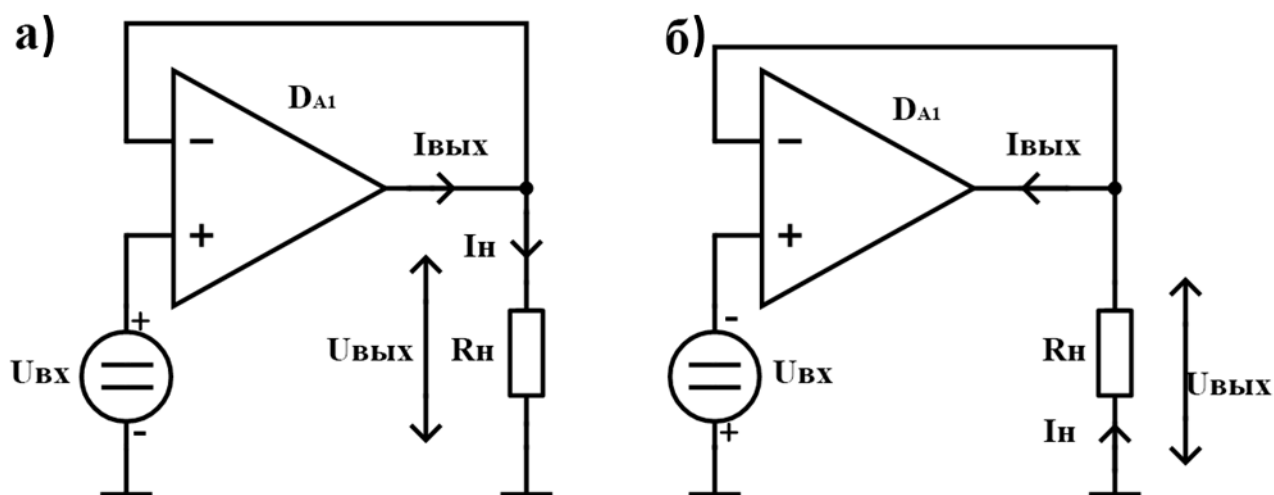


Рис. 8.8. Повторитель напряжения:

- а) положительная полярность входного напряжения;
- б) отрицательная полярность входного напряжения

Согласно первому правилу, на входе (-) ОУ такое же напряжения, как и на входе (+). То есть условно (в плане равенства потенциалов), логично считать, что оба входа ОУ соединены вместе. Таким образом, нагрузка оказывается виртуально включенной параллельно с источником входного напряжения $U_{ВХ}$. Следовательно, $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$.

Согласно *правилу 2*, ток от источника входного сигнала не протекает через вход (+) ОУ. То есть повторение напряжения $U_{ВХ}$ на R_H не сопровождается отбором мощности от источника входного сигнала. Необходимое значение тока нагрузки I_H для поддержания текущего значения $U_{ВЫХ}$ обеспечивается ОУ. При этом выходной ток ОУ $I_{ВЫХ}$ равен току нагрузки I_H .

При повторении напряжения повторяются не только его величина, но и знак (полярность). На рисунке 8.8, а показано подключение к ОУ положительного напряжения. При этом $I_{ВЫХ}$ вытекает из ОУ и создает на нагрузке $U_{ВЫХ}$ положительной полярности. На рис 8.8, б представлено подключение к повторителю

напряжения $U_{\text{ВХ}}$ отрицательной полярности. Ток $I_{\text{ВХ}}$ втекает в ОУ, создавая на $R_{\text{Н}}$ напряжение отрицательной полярности.

8.2.3. Инвертирующий усилитель

В схеме (рис. 8.9) напряжение $U_{\text{ВХ}}$ подается на инвертирующий вход ОУ.

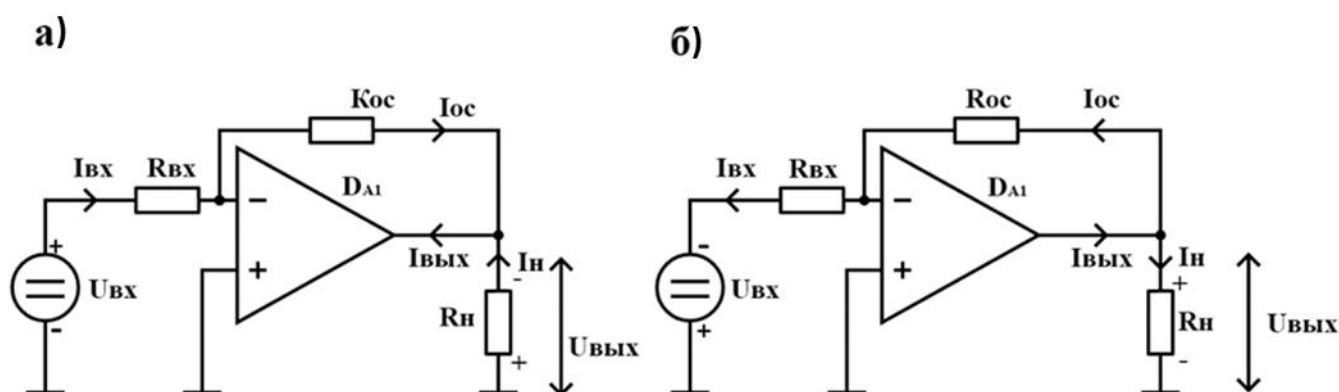


Рис. 8.9. Инвертирующий усилитель:

- а) положительная полярность входного направления;
- б) отрицательная полярность входного напряжения

Согласно *правилу 1*, потенциал входа (-) равен потенциалу земли (неинвертирующий вход заземлен). Таким образом, источник напряжения $U_{\text{ВХ}}$ оказывается виртуально подключен параллельно $R_{\text{ВХ}}$. Через $R_{\text{ВХ}}$ протекает ток $I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/R_{\text{ВХ}}$.

Согласно *правилу 2*, $I_{\text{ВХ}}$ протекает только через резистор $R_{\text{ОС}}$, включенный в цепь ООС усилителя ($I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ОС}}$). Как видно из рис. 8.9, а, токи $I_{\text{ОС}}$ и $I_{\text{Н}}$ втекают в ОУ.

Таким образом, $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ОС}} + I_{\text{Н}}$.

Падение напряжения на $R_{\text{ОС}}$:

$$U_{\text{ОС}} = R_{\text{ОС}} I_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}} R_{\text{ОС}} = U_{\text{ВХ}} \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}} = U_{\text{ВХ}} K_{\text{ОС}}.$$

Так как потенциал входа (-) равен потенциалу земли, то имеет место виртуальное параллельное подключения резисторов R_{oc} и R_n . Следовательно,

$$U_{вых} = U_{oc} = U_{вх} K_{oc},$$

где $K_{oc} = -\frac{R_{oc}}{R_{вх}}$ есть коэффициент усиления инвертирующего усилителя (знак «-» отображает то, что входное напряжения инвертируется).

В реальном ОУ через его входы протекают небольшие токи – токи смещения, которые являются входными токами транзисторов, образующих входной дифференциальный каскад ОУ. Эти токи малы, но протекая через резисторы большого сопротивления, могут создавать существенные падения напряжений. Рассмотрим схему (рис. 8.9, б). Выходной ток ОУ протекает не только через $R_{вх}$, но и втекает во вход (-) ОУ: $I_{вых} = I_{вх} + I_{см}^-$, где $I_{см}^-$ – ток смещения входа (-). Следовательно, падение напряжения на резисторе $R_{oc} = R_{oc} I_{вх} + R_{oc} I_{см}^-$. Напряжение $R_{oc} I_{см}^-$ является погрешностью схемы.

Для минимизации погрешности инвертирующего усилителя необходимо соблюдать ограничения на максимально возможное сопротивление резистора R_{oc} . Поэтому, для обеспечения требуемого значения K_{oc} , также накладываются ограничения максимального значения сопротивления $R_{вх}$.

Согласно *правилу 1*, входное сопротивление инвертирующего усилителя равно сопротивлению резистора $R_{вх}$. Следовательно, входное сопротивление инвертирующего усилителя мало (не более десятков кОм).

8.2.4. Неинвертирующий усилитель

На рис. 8.10 представлена схема неинвертирующего усилителя.

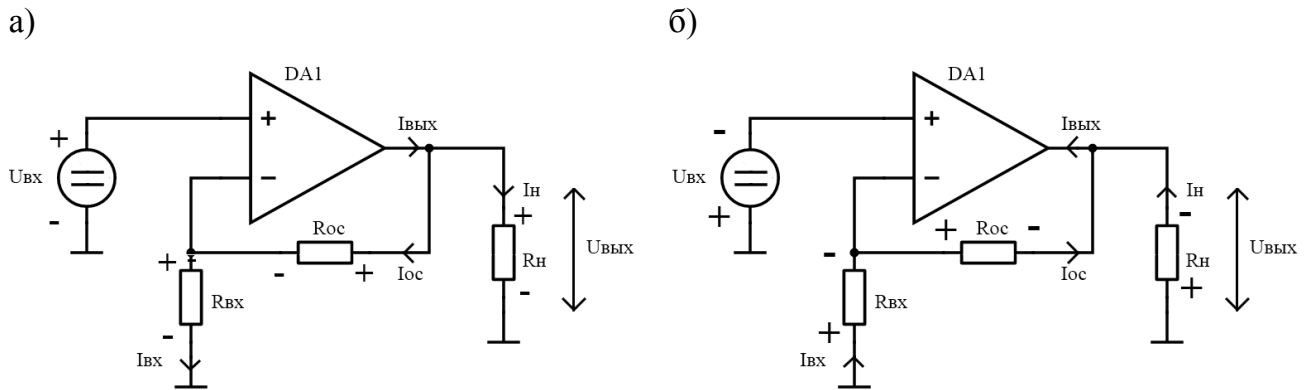


Рис. 8.10. Неинвертирующий усилитель:

- а) положительная полярность входного напряжения;
- б) отрицательная полярность входного напряжения

Согласно *правилу 1*, источник входного напряжения $U_{\text{вх}}$ виртуально подключен параллельно резистору $R_{\text{вх}}$. Через $R_{\text{вх}}$ протекает $I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/R_{\text{вх}}$.

Согласно *правилу 2*, $I_{\text{ос}} = I_{\text{вх}}$, и следовательно, падение напряжения на резисторе $R_{\text{ос}}$ равно $R_{\text{ос}}I_{\text{ос}}$.

Как следует из схемы неинвертирующего усилителя (рис. 8.10), выходное напряжение равно сумме падений напряжений на резисторах $R_{\text{ос}}$ и $R_{\text{вх}}$:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{вх}} \frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{вх}}} = U_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{вх}}} \right).$$

Приняв отклонения сопротивлений $\frac{R_{\text{ос}}}{R_{\text{вх}}}$ за коэффициент усиления напряжения инвертирующего усилителя $K_{\text{ос}}$, получим:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}(1 + K_{\text{ос}}).$$

Отличия инвертирующего усилителя от неинвертирующего:

1. Выходной сигнал в инвертирующем усилителе преобразуется в выходное напряжение противоположной полярности.

В неинвертирующем усилителе входное и выходное напряжения имеют одинаковую полярность.

2. Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно сопротивлению резистора $R_{вх}$ (рис. 8.9) и обычно не превышает десятков кОм. Входное сопротивление неинвертирующего усилителя равно входному сопротивлению ОУ и достигает значений единиц и десятков Мом.

3. Коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя ($K_{oc} = -\frac{R_{oc}}{R_{вх}}$) на единицу меньше коэффициента усиления по напряжению инвертирующего усилителя ($K_{oc} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_{вх}}$).

8.3. Порядок выполнения работы

8.3.1. Исследование амплитудной характеристики повторителя напряжения

Произвести исследование амплитудной характеристики повторителя напряжения.

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 8.8, а), параметры элементов схемы приведены в таблице 8.2;

Таблица 8.2

Параметры элементов схемы (рис. 8.8, а)

Номер варианта	Операционный усилитель DA1	Сопротивление нагрузки R_n , Ом
1	LF155	1250
2	LF347	1300
3	LF351	1700
4	LF353	2000

Окончание таблицы 8.2

Номер варианта	Операционный усилитель DA1	Сопротивление нагрузки R_n , Ом
5	LF400C	2200
6	LF441	2500
7	LF442	1350
8	LM108	1450
9	LM144	1750
10	LM207	2000
11	LM7343	2100
12	LM709	2400
13	LM741	3000
14	LT1012C	3250
15	NE5532	3500

2. Увеличивая напряжение источника $U_{вх}$ от нуля до значения, при котором ОУ войдет в состояние насыщения (рис. 8.7), снять зависимость $U_{вых} = \varphi(U_{вх})$, результат занести в таблицу 8.3;

Таблица 8.3

Амплитудная характеристика повторителя напряжения (рис. 8.8, а)

Входное напряжение $U_{вх}$, В	Выходное напряжение $U_{вых}$, В	Входное напряжение $U_{вх}$, В	Выходное напряжение $U_{вых}$, В

3. Построить амплитудную характеристику $U_{вых} = \varphi(U_{вх})$;

4. Сделать вывод по результатам исследования.

Отчет по пункту 8.3.1 должен содержать схему повторителя напряжения (рис. 8.8, а): заполненную таблицу 8.3 и график зависимости $U_{вых} = \varphi(U_{вх})$; выводы по результатам исследования.

8.3.2. Исследование нагрузочной характеристики повторителя напряжения $U_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$

Провести исследование нагрузочной характеристики повторителя напряжения $U_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$.

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис 8.8, а), параметры элементов схемы приведены в таблице 8.2;

2. Задать $U_{\text{вх}} = 5\text{В}$;

3. Изменять $R_{\text{н}}$ от нуля до значения, указанного в таблице 8.2, снять зависимость $U_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$, результаты занести в таблицу 8.4;

Таблица 8.4

Нагрузочная характеристика повторителя напряжения (рис. 8.8, а)

Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, Ом	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В	Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, Ом	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В

4. Построить нагрузочную характеристику повторителя напряжения – график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$;

5. Сделать вывод по результатам исследования.

Отчет по пункту 8.3.2 должен содержать заполненную таблицу 8.4; график зависимости $U_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$; вывод по результатам исследования.

8.3.3. Исследование влияния сопротивления нагрузки на выходной ток повторителя напряжения

Выполнить исследование влияния сопротивления нагрузки на выходной ток повторителя напряжения.

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 8.8, а), параметры элементов цепи взять из таблицы 8.2;

2. Задать $U_{\text{вх}} = 5\text{В}$;

3. Изменяя $R_{\text{н}}$ от нуля до значения, при котором $I_{\text{вых}}$ уменьшается до 100...500мкА, снять зависимость $I_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$, результаты занести в таблицу 8.5;

Таблица 8.5

Зависимость выходного тока повторителя напряжения (рис. 8.8, а)
от сопротивления нагрузки

Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, Ом	Выходной ток $I_{\text{вых}}$, мА	Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, Ом	Выходной ток $I_{\text{вых}}$, мА

4. Построить график зависимости $I_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$;

5. Сделать вывод по результатам исследования.

Отчет по пункту 8.3.3 должен содержать: заполненную таблицу 8.5; график зависимости $I_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$; вывод по результатам исследования.

8.3.4. Исследование амплитудной характеристики инвертирующего усилителя

Провести исследование амплитудной характеристики инвертирующего усилителя (рис. 8.9, а). Параметры схемы взять из таблиц 8.2 и 8.6.

Таблица 8.6.

Сопротивления резисторов $R_{вх}$ и $R_{ос}$ в схеме (рис. 8.9, а)

Номер варианта	Сопротивление резистора $R_{вх}$, кОм	Сопротивление резистора $R_{ос}$, кОм
1	5,00	10,00
2	5,25	15,00
3	5,50	20,00
4	5,75	25,00
5	6,00	10,00
6	6,25	15,00
7	6,50	20,00
8	6,75	25,00
9	7,00	10,00
10	7,25	15,00
11	7,50	20,00
12	7,75	25,00
13	8,00	10,00
14	8,50	15,00
15	9,00	20,00

Порядок проведения исследования и требования к отчету аналогичны пункту 8.3.1.

8.3.5. Сравнение амплитудных характеристик повторителя напряжения с инвертирующим усилителем

Произвести сравнение амплитудных характеристик повторителя напряжения (пункт 8.3.1) с инвертирующим усилителем (пункт 8.3.4).

Порядок проведения исследования: выполнить сравнение амплитудных характеристик, дав ответы на следующие вопросы:

1. Каково значение коэффициента передачи напряжения схемы $K_{\text{пер}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$?

2. Совпадает ли полярность выходного напряжения с полярностью входного напряжения?

3. Каков диапазон изменения входного напряжения $U_{\text{вх}}$, при котором ОУ остается в линейном режиме?

Отчет по пункту 8.3.5 должен содержать: ответы на вопросы; выводы по результатам сравнения амплитудных характеристик.

8.3.6. Исследование нагрузочной характеристики инвертирующего усилителя

Провести исследование нагрузочной характеристики инвертирующего усилителя (рис. 8.9, а), параметры элементов схемы взять из таблиц 8.2 и 8.6, значения $U_{\text{вх}}$ принять такими, чтобы $U_{\text{вых}} \approx 0,7 U_{\text{нас}}$ (напряжение насыщения ОУ).

Порядок проведения исследования и требования к отчету аналогичны пункту 8.3.2.

8.3.7. Исследование влияния сопротивления нагрузки на выходной ток ОУ к схеме повторителя напряжения

Выполнить исследование влияния сопротивления нагрузки на выходной ток ОУ к схеме повторителя напряжения (рис. 8.9, а),

параметры элементов схемы взять из таблиц 8.2 и 8.6, значения $U_{\text{вх}}$ принять такими, чтобы $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{нас}}$.

Порядок проведения исследования:

1. Выполнить исследование схемы аналогично пункту 8.3.3;
2. Сравнить зависимости $I_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$, полученный в пунктах 8.3.3 и 8.3.7, сделать выводы.

Отчет по пункту 8.3.7 должен содержать: таблицу значений и график зависимости $I_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$ для пункта 8.3.7; выводы по результатам сравнения характеристик $I_{\text{вых}} = \varphi(R_{\text{н}})$.

8.3.8. Проверка выполнения *правила 1* для инвертирующего усилителя

Проверить выполнение *правила 1* для инвертирующего усилителя (рис. 8.9, а), параметры элементов схемы взять из таблиц 8.2 и 8.6.

Порядок проведения исследований:

1. Построить схему (рис. 8.9, а);
2. Увеличивая значение $U_{\text{вх}}$ от нуля до $(2...3)U_{\text{нас}}$, снять зависимость напряжения инвертирующего входа ОУ от $U_{\text{вх}}$ ($U_{\text{вх}}^- = \varphi_1(U_{\text{вх}})$), результаты занести в таблицу 8.7;

Таблица 8.7

Зависимость напряжения инвертирующего входа ОУ от напряжения источника входного сигнала

Напряжение $U_{\text{вх}}, \text{В}$	Напряжение $U_{\text{вх}}^-, \text{В}$	Напряжение $U_{\text{вх}}, \text{В}$	Напряжение $U_{\text{вх}}^-, \text{В}$

3. Построить график зависимости $U_{\text{вх}}^- = \varphi_1(U_{\text{вх}})$;

4. Задать $U_{\text{вх}} = 1\text{В}$;

5. Изменяя сопротивление резистора $R_{\text{ос}}$ от $0.1R_{\text{вх}}$ до $30R_{\text{вх}}$, снять зависимости $U_{\text{вх}}^- = \varphi_2(R_{\text{ос}})$ и $U_{\text{вх}}^- = \varphi_3(K_{\text{ос}})$, результаты занести в таблицу 8.8;

Таблица 8.8

Зависимость напряжения инвертирующего входа ОУ от сопротивления резистора обратной связи

$R_{\text{ос}}, \text{кОм}$	$K_{\text{ос}} = -R_{\text{ос}}/R_{\text{вх}}$	$U_{\text{вх}}^-, \text{В}$

6. Построить графики зависимостей $U_{\text{вх}}^- = \varphi_2(R_{\text{ос}})$ и $U_{\text{вх}}^- = \varphi_3(K_{\text{ос}})$;

7. Сделать выводы по результатам исследования.

Отчет по пункту 8.3.8 должен содержать: заполненные таблицы 8.7 и 8.8; графики зависимостей $U_{\text{вх}}^- = \varphi_1(U_{\text{вх}})$, $U_{\text{вх}}^- = \varphi_2(R_{\text{ос}})$ и $U_{\text{вх}}^- = \varphi_3(K_{\text{ос}})$; выводы по результатам исследований.

8.3.9. Определение влияния сопротивления $R_{\text{ос}}$ в схеме (рис. 8.9, а) на погрешность усилителя

Определить влияние сопротивления $R_{\text{ос}}$ в схеме (рис. 8.9, а) на погрешность усилителя.

Порядок проведения исследования:

1. Построить схему (рис. 8.9, а), параметры элементов схемы взять из таблиц 8.2 и 8.6;

2. Задать $U_{\text{вх}} = 0$;

3. Увеличивая сопротивление резистора R_{oc} до 10Мом, снять зависимость входного напряжения схемы $U_{вых}$ (погрешность усиления) от сопротивления резистора R_{oc} $U_{вых} = \varphi(R_{oc})$, результаты занести в таблицу 8.9;

Таблица 8.9

Зависимость погрешности инвертирующего усилителя от сопротивления резистора

$R_{oc}, \text{кОм}$	$U_{вых}, \text{мВ}$	$R_{oc}, \text{кОм}$	$U_{вых}, \text{мВ}$

4. Построить график зависимости $U_{вых} = \varphi(R_{oc})$;

5. Сделать вывод по результатам исследования;

Отчет по пункту 8.3.9 должен содержать: заполненную таблицу 8.9; график зависимости $U_{вых} = \varphi(R_{oc})$; вывод по результатам исследования.

8.3.10. Исследование влияния допустимых отклонений сопротивлений резисторов на коэффициент усиления неинвертирующем усилителе

Выполнить исследования влияния допустимых отклонений сопротивлений резисторов на коэффициент усиления неинвертирующем усилителе.

Порядок выполнения исследования:

1. Построить схему (рис. 8.10, а), параметры элементов схемы взять из таблиц 8.2 и 8.6;

2. Задать $U_{вх} = 1 \text{ В}$;

3. Определить коэффициент усиления схемы по напряжению $K_{oc} = U_{вых}/U_{вх}$;

4. Последовательно реализуя опыты (таблица 8.10), определить значение K_{oc} по методу наихудшего случая (R_{oc} имеет максимально большое значение, R_{bx} – минимальное значение); результаты занести в таблицу 8.11;

5. Рассчитать абсолютную погрешность усилителя $\Delta K_{oc} = K'_{oc} - K_{oc}$, где K'_{oc} – значение коэффициента усиления при отклонениях сопротивлений резисторов от номинального значения, K_{oc} – определенные выше значения коэффициенты усиления схемы для номинальных значений сопротивления резисторов (таблица 8.6), результаты занести в таблицу 8.11;

Таблица 8.10

Значения R_{bx} и R_{oc} в схеме (рис. 8.10, а)

Номер опыта	Допуск на отклонение сопротивлений δ , %	Сопротивления резистора R_{bx} , кОм	Сопротивление резистора R_{oc} , кОм
1	5	$R_{bx} - 0,05R_{bx}$	$R_{oc} + 0,05R_{oc}$
2	10	$R_{bx} - 0,10R_{bx}$	$R_{oc} + 0,10R_{oc}$
3	15	$R_{bx} - 0,15R_{bx}$	$R_{oc} + 0,15R_{oc}$
4	20	$R_{bx} - 0,20R_{bx}$	$R_{oc} + 0,20R_{oc}$

Таблица 8.11

Коэффициенты усиления схемы (рис. 8.10, а) в опытах (таблица 8.10)

Допуск на отклонение сопротивлений δ , %	Коэффициент усиления K_{oc}	Абсолютная погрешность ΔK_{oc}	Относительная погрешность γ , %
5			
10			
15			
20			

6. Рассчитать относительную погрешность коэффициента усиления $\gamma = \frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} 100\%$, результаты занести в таблицу 8.11;
7. Построить графики зависимостей $\Delta K_{oc} = \varphi_1(\delta)$ и $\gamma = \varphi_2(\delta)$;
8. Сделать выводы по результатам исследования.

8.4. Контрольные вопросы

1. Какие два входа имеет ОУ?
2. Как взаимосвязаны полярности выходных и входных напряжений ОУ?
3. Подключение ОУ к источнику питания и к нагрузке.
4. Что понимает под дифференциальным напряжением ОУ?
5. Какие два правила справедливы для идеального ОУ?
6. Повторитель напряжения на ОУ.
7. Объясните, почему в повторителе напряжения (схема, рис. 8.4) выходное напряжение равно входному?
8. Поясните характер зависимости (рис. 8.5).
9. Поясните характер зависимости (рис. 8.6).
10. Почему при коротком замыкании выходные цепи ОК не повреждаются?
11. Объясните, почему в схеме (рис. 8.8, б) выходное напряжение отрицательно?
12. Какой вид имеет уравнение для токов выходной цепи ОУ?

13. Выведите формулу для коэффициента усиления инвертирующего усилителя.

14. Чем обусловлена погрешность инвертирующего усилителя?

15. Почему в схеме (рис. 8.9, а) не рекомендуется выбирать большое значение сопротивления обратной связи?

16. Выведите формулу для коэффициента усиления неинвертирующего усилителя.

17. Какой усилитель, инвертирующий или неинвертирующий, обладает большим значением коэффициента усиления?

18. Дайте сравнительную характеристику свойств инвертирующего и неинвертирующего усилителей?

19. При каких условиях может нарушаться правило 1, справедливое для идеального ОУ?

20. Как зависит погрешность усилителя от сопротивления резистора обратной связи?

21. Чему равно входное сопротивление инвертирующего усилителя?

8.5. Требования к ответу по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткую теоретическую справку; отчеты по пунктам 8.3.1 – 8.3.10, включая выводы по каждому пункту исследований; общие выводы по результатам исследований.

8.6. Порядок защиты лабораторной работы

Для защиты работы необходимо: предоставить преподавателю полностью оформленный отчет; ответы на контрольные вопросы; выполнить расчетное задание.

В качестве расчетного задания может быть предложено, например, определение сопротивления резистора (R_{oc} или $R_{вх}$) в схеме инвертирующего (неинвертирующего) усилителя или аналогичное задание.

Пример расчетного задания. Определить, достигнет ли величина выходного напряжения в схеме (рис. 8.11) уровня напряжения насыщения $U_{нас} = \pm 13$ В.

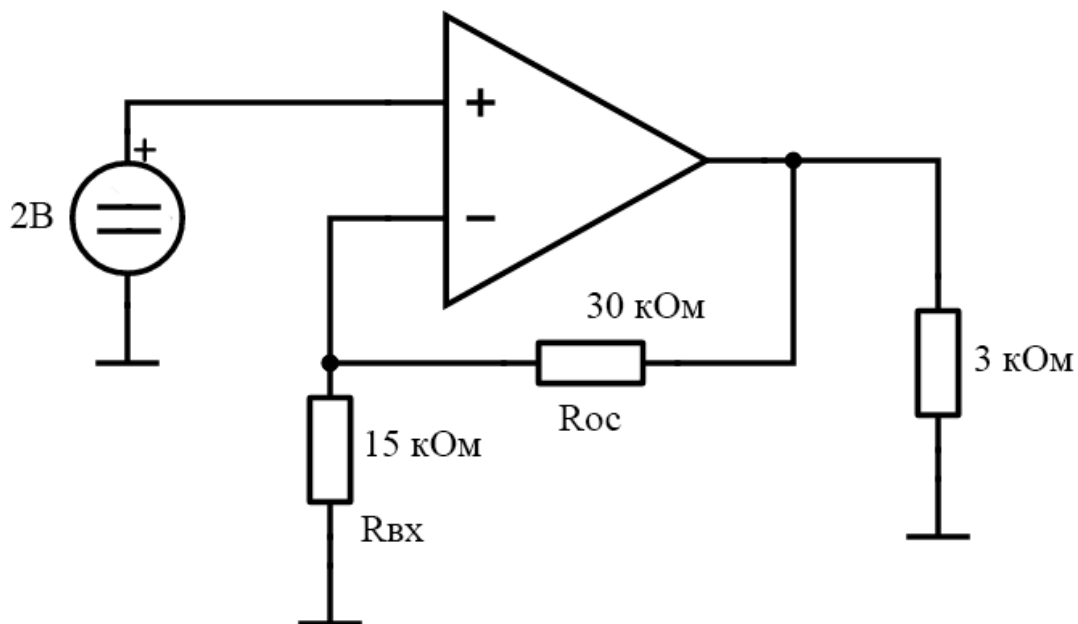


Рис. 8.11. Схема неинвертирующего усилителя для анализа в контрольном задании

В качестве дополнительного задания к данному примеру может быть предложено ответить на вопрос: во сколько раз изменится коэффициент усиления напряжения рассматриваемой схемы, если сопротивление $R_{вх}$ уменьшится с 15 кОм до 10 кОм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные работы при изучении дисциплин «Электроника и микропроцессорная техника» и «Схемотехника» являются важной и обязательной составляющей процесса подготовки бакалавров направлений «Приборостроение» и «Информационные системы». Причем, в соответствии с новыми образовательными стандартами и учебными планами, на выполнение лабораторных работ отводится большая часть аудиторной нагрузки по сравнению с теоретическим курсом (лекциями).

Замена экспериментальных исследований электрических цепей, электро-радиоэлементов и электронных устройств их моделированием предоставляет ряд дополнительных возможностей: исследование большого числа вариантов схем с разнообразными параметрами составляющих их элементов; отсутствие затрат на приобретение и обслуживание дорогостоящих лабораторных стендов; возможность организации учебного процесса в любом классе, оснащенном персональными компьютерами (не требуется создание специальных рабочих мест или лабораторий); простота встраивания лабораторного практикума в систему дистанционного или заочного образования; упрощение процесса обучения в части обеспечения самостоятельной работы студентов.

Наряду с настоящим практикумом предусмотрены экспериментальные исследования электронных устройств и их функциональных узлов, проводимые на лабораторных стендах кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Мартин Хартли Джонс. Электроника : практический курс/ Мартин Хартли Джонс; пер. с англ. Е. В. Воронова и А. Л. Ларина. – Изд. 2-е, испр. – Москва: Техносфера, 2006. – 475 с.
2. Уве Наундорф. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. / Уве Наундорф; пер. с нем. М. М. Ташлицкого. – Москва: Техносфера, 2008. – 385 с.
3. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – Москва: Высшая школа, 2008. – 800 с.
4. Ефимов, И. П. Операционные усилители и их применение : учебное пособие. / И. П. Ефимов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – 70 с.