

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

А.В. Чернов, О.О. Карташов

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Аналоговые устройства

Учебно-методическое пособие
для лабораторных работ

Ростов-на-Дону
2017

УДК 621.38(07) + 06

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Н.М. Нечитайло

Чернов, А.В.

Электроника и схемотехника. Аналоговые устройства: учебно-методическое пособие для лабораторных работ / А.В. Чернов, О.О. Карташов; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – 91 с.

Учебно-методическое пособие содержит описания лабораторных работ, теоретические пояснения, методику построения электронных схем в программно-моделирующих пакетах *LTSpice*, *Proteus*, методику проведения экспериментов, методику обработки экспериментальных результатов и представления результатов в виде документов. В пособии представлен комплект лабораторных работ с использованием виртуального лабораторного оборудования АКТАКОМ АСК-4174.

Предназначено для студентов направлений подготовки «Информатика и вычислительная техника», «Информационные системы и технологии».

Одобрено к изданию кафедрой «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления».

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лабораторная работа №1</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, RC ЦЕПЕЙ, ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	4
<i>Лабораторная работа №2</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И СТАБИЛИТРОНОВ	12
<i>Лабораторная работа №3</i> ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ОСНОВНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ	31
<i>Лабораторная работа №4</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ	48
<i>Лабораторная работа №5</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ И УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ	60
<i>Лабораторная работа №6</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ	70
<i>Лабораторная работа №7</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	88

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, RC ЦЕПЕЙ, ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы:

Ознакомиться с основами работы в пакете *LTSpice*, *Proteus*, исследовать свойства резистивных электрических цепей, *RR* цепей, *RC* цепей, цепей с нелинейными элементами.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводов.

Теоретические пояснения к работе

Электронные схемы делятся на:

- аналоговые (напряжение и ток меняются непрерывно и описываются математическим аппаратом дифференциального и интегрального исчисления и комплексных переменных);
- цифровые (два уровня напряжения меняются дискретно и описываются алгеброй логики).

Принято разделять элементы и схемы на:

- активные (транзисторы: в них имеется возможность усиления по мощности);
- пассивные (резисторы, конденсаторы, диоды, индуктивности);
- линейные (в них ток пропорционален напряжению, соблюдается закон Ома, выполняется принцип суперпозиции);
- нелинейные (характеризуются вольт-амперными характеристиками, имеющими нелинейный вид).

Простейший делитель напряжения – это схема, которая для данного напряжения на входе создает на выходе напряжение, являющееся некоторой частью входного. Делители напряжения часто используются в схемах для получения заданного напряжения из большего.

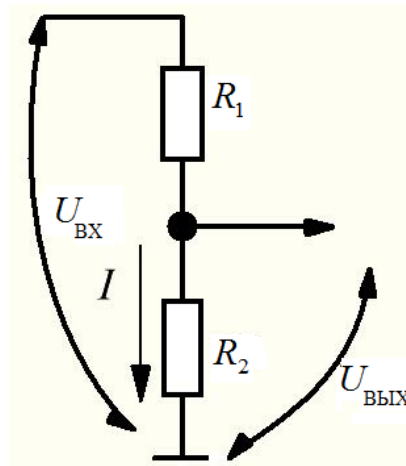


Рис. 1.1. Простейший делитель напряжения

Так как для делителя $I = \frac{U_{\text{BX}}}{R_1 + R_2}$, то $U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot R_2 = \frac{U_{\text{BX}} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$, а коэффициент передачи $K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{BX}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1$.

Для элементов, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики (ВАХ), закон Ома не выполняется. Однако небольшие приращения напряжения ΔU и соответствующие приращения тока ΔI можно считать пропорциональными.

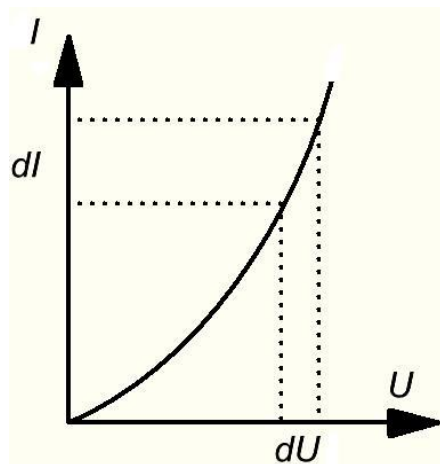


Рис. 1.2. К понятию динамического сопротивления

Сопротивление в данной точке ВАХ называется динамическим сопротивлением: $R_{\text{дин}} = dU/dI$.

Сколько угодно сложную схему, состоящую из резисторов и источников напряжения и имеющую два выхода, можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из одного эквивалентного резистора $R_{\text{ЭКВ}}$, последовательно подключенного к одному источнику эквивалентного напряжения $U_{\text{ЭКВ}}$.

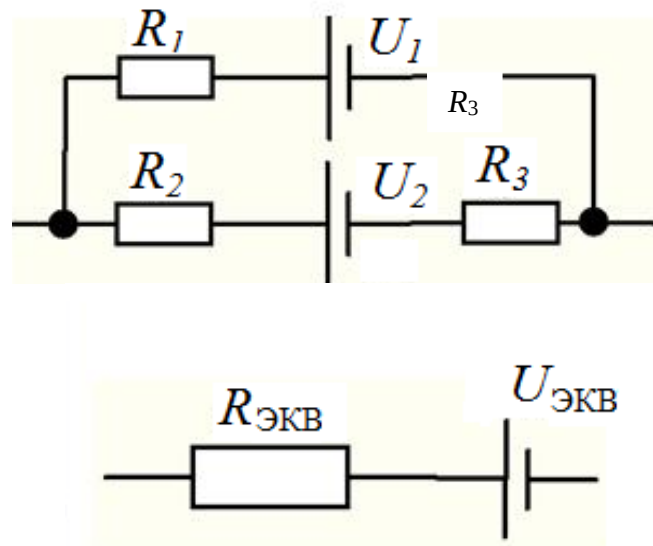


Рис. 1.3. К эквивалентному преобразованию источников напряжения

При этом $U_{\text{ЭКВ}}$ определяется как напряжение на выходе разомкнутой схемы, а $R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_{\text{ЭКВ}}}{I_{\text{ЗАМКН.СХ.}}}$, где $I_{\text{ЗАМКН.СХ.}}$ – ток, протекающий при коротком замыкании выхода схемы. На практике $U_{\text{ЭКВ}}$ и $I_{\text{ЗАМКН.СХ.}}$ можно рассчитать или измерить.

Применим эту теорему к делителю напряжения:

$$U_{\text{ЭКВ}} = U_{\text{ВЫХ}}, \quad R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ЗАМКН.СХ.}}}.$$

Замыкаем R_2 – выход схемы – и получаем $I_{\text{ЗАМКН.СХ.}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$.

С учетом $U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$ получаем $R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Таким образом, эквивалентное сопротивление делителя, состоящего из резисторов R_2, R_1 , является параллельным соединением последних ($R_1 \parallel R_2$).

Для элементов, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики (ВАХ), закон Ома не выполняется. Однако небольшие приращения напряжения ΔU и соответствующие приращения тока ΔI можно считать пропорциональными.

RC-цепи

Процесс разряда конденсатора в RC-цепи описывается дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами: $C \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = 0$, поскольку $I = C \frac{dU}{dt} = -\frac{U}{R}$. Решением такого уравнения является выражение $U = U_0 \cdot e^{-t/RC}$. При $U = \frac{U_0}{e} = \frac{U_0}{2,72} \approx 0,37U_0$.

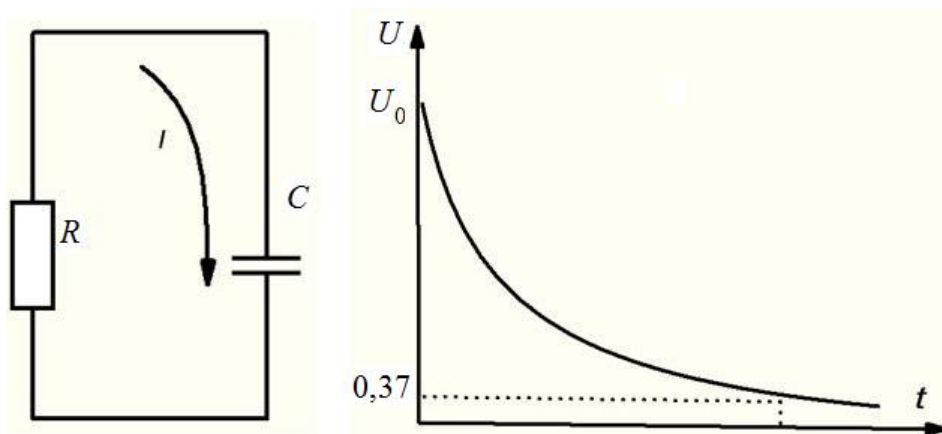


Рис. 1.4. Процесс разряда конденсатора в RC -цепи

Интегрирующая цепь

Фактически это делитель напряжения, в котором один резистор заменен конденсатором. Выходное напряжение снимается с конденсатора. При длительности импульса $t \ll RC = \tau$ проявляются сглаживающие (интегрирующие) свойства цепи: амплитуда выходного сигнала уменьшается по отношению ко входному, так как емкость не успевает полностью зарядиться.

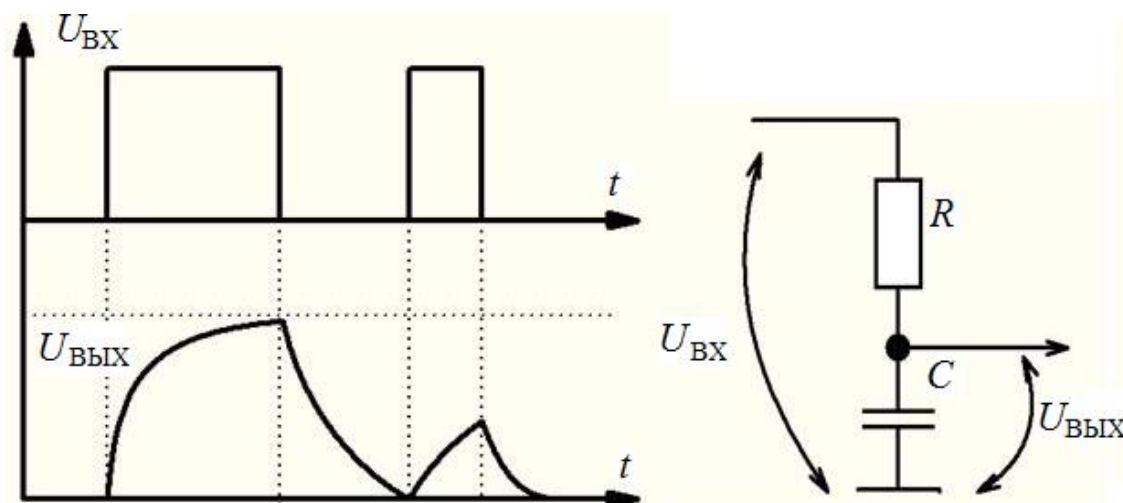


Рис. 1.5. Интегрирующая цепь

Дифференцирующая цепь

В данной RC -цепи выходное напряжение снимается с резистора. При длительности $t \gg RC = \tau$ проявляются дифференциальные свойства цепи, и она генерирует импульсы в виде коротких пиков в моменты переключения входного сигнала.

При $t \ll RC = \tau$ данная RC -цепь является переходной цепью. Уменьшение постоянной времени переходной цепи приводит к искажению плоской части (вершины) импульса.

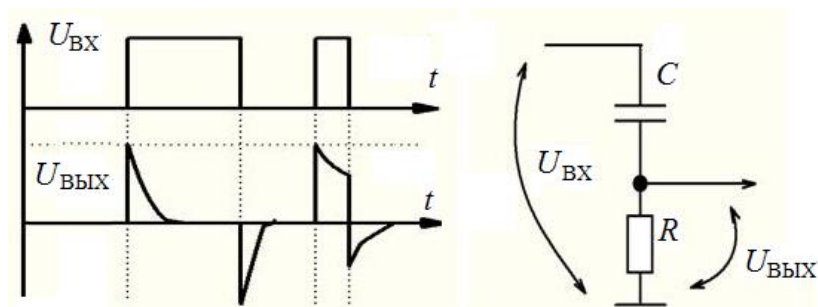


Рис. 1.6. Дифференцирующая цепь

Примеры использования RC-цепей

1. *Схема задержки импульса.* Момент включения буфера 2 определяется достижением уровня лог. 1 на выходе интегрирующей цепи, а момент выключения – спадом напряжения на выходе RC-цепи до уровня лог. 0. Достоинство схемы – простота, недостаток – величина задержки ($t_{\text{зАд}} \approx 0,7RC$) нестабильна.

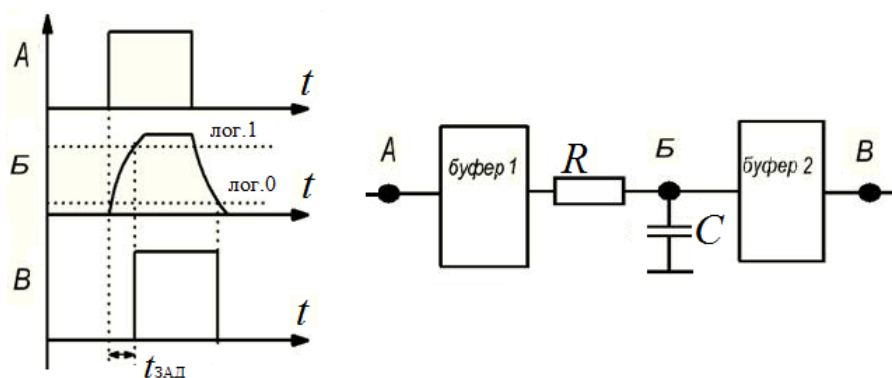


Рис. 1.7. Простейшая схема задержки импульса

2. *Схема выделения переднего фронта импульса.* Момент включения буфера 2 определяется моментом достижения уровня лог. 1 на выходе дифференцирующей цепи (соответствует переднему фронту), а момент выключения – спадом напряжения на выходе RC-цепи до уровня лог. 0. Длительность формируемого импульса $t_{\text{и}} \approx 0,7RC$.

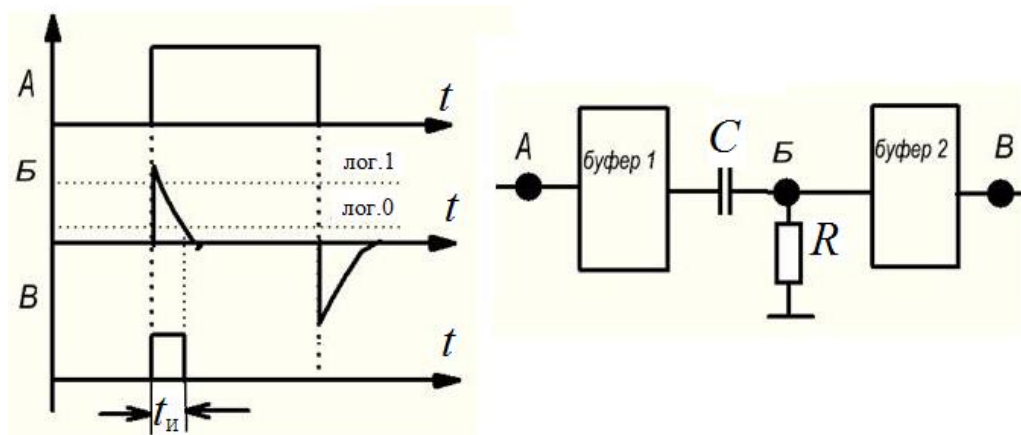


Рис. 1.8. Простейшая схема выделения переднего фронта импульса

3. Генераторы линейно возрастающего напряжения

Поскольку ток в конденсаторе C пропорционален скорости изменения напряжения, то в процессе заряда конденсатора ток, текущий через него, уменьшается. Поэтому линейно возрастающим является лишь начальный участок изменения выходного напряжения на конденсаторе.

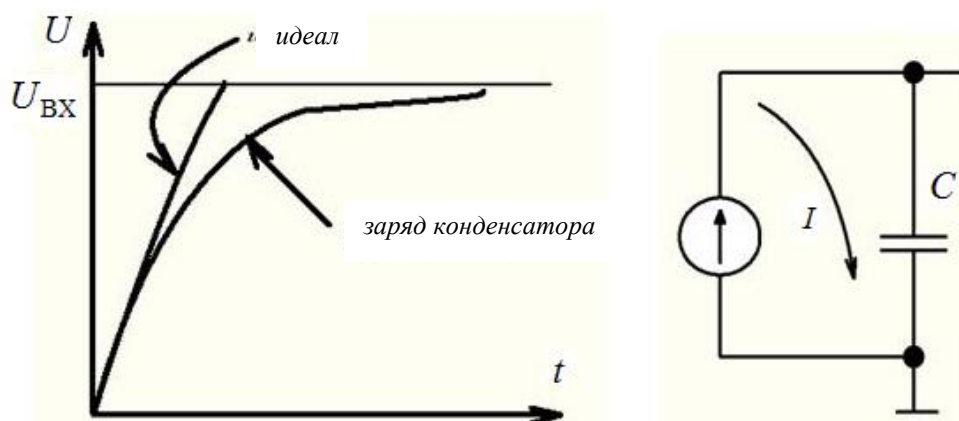


Рис. 1.9. Принцип формирования линейно возрастающего напряжения

Скомпенсировать уменьшение тока можно за счет подключения к конденсатору источника тока. Такой принцип можно использовать для построения генератора линейно меняющегося напряжения.

Нелинейные элементы в делителе напряжения

Стабилитрон (зенеровский диод) характеризуется наличием участка пробоя на обратной ветви ВАХ. Обладает свойством самовосстановления после пробоя. Характеризуется напряжением стабилизации $U_{\text{стаб}}$ при заданном токе $I_{\text{стаб}}$ и динамическим сопротивлением $R_{\text{дин}}$. Стабилитрон используют для получения постоянного напряжения. Простейший стабилизатор напряжения представляет собой делитель напряжения, в котором в качестве второго сопротивления используется динамическое сопротивление стабилитрона.

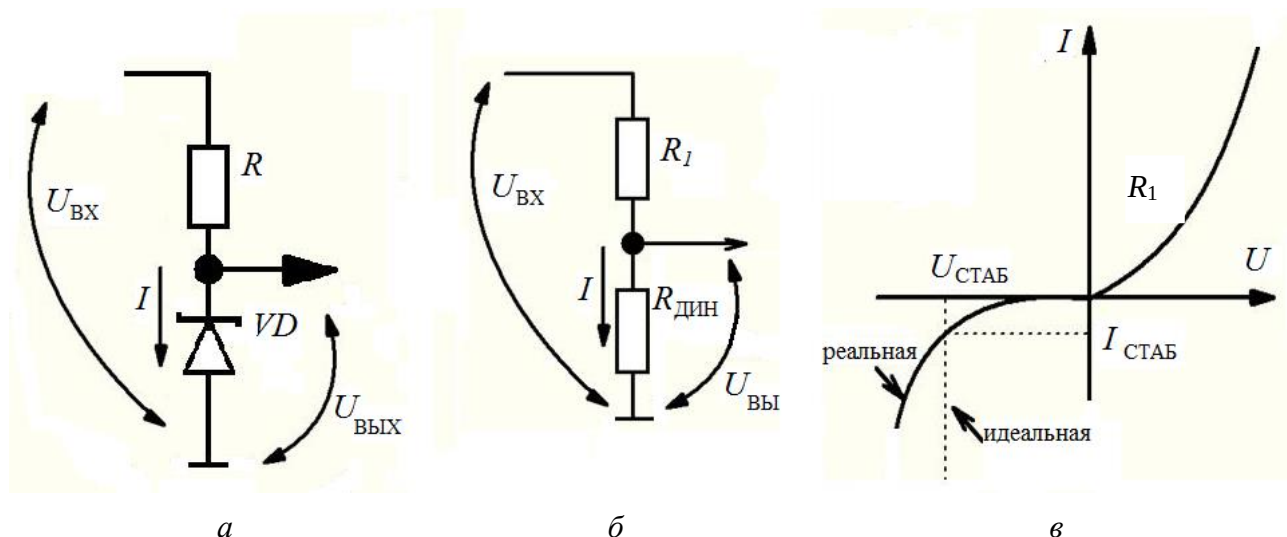


Рис. 1.10. Простейший стабилизатор (а), его эквивалентная схема (б) и вольт-амперная характеристика стабилитрона (в)

Процесс стабилизации осуществляется за счет источника входного напряжения (причем $U_{ВХ} > U_{ВЫХ}$) и может быть представлен в виде следующей цепочки рассуждений:

$$U_{ВХ} \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow R_{ДИН} \downarrow \rightarrow U_{ВЫХ} = I \cdot R_{ДИН} \approx \text{const}$$

и, наоборот,

$$U_{ВХ} \downarrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow R_{ДИН} \uparrow \rightarrow U_{ВЫХ} = I \cdot R_{ДИН} \approx \text{const}.$$

Здесь знаки « $\uparrow$ » (« $\downarrow$ ») означают увеличение (уменьшение) параметра, знак « $\rightarrow$ » означает следствие. Недостатком данной схемы является большой уровень пульсации.

Пример:

Пусть $R_{ДИН} = 10 \text{ Ом}$; $U_{СТАБ} = 5 \text{ В}$; $I_{СТАБ} = 10 \text{ мА}$. Если на 10% изменится ток, то $\Delta U = R_{ДИН} \cdot \Delta I = 10 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ мВ}$. Таким образом, $\frac{\Delta U}{U} = 0,2\%$.

Программа лабораторной работы:

1. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать электрические схемы, снять их характеристики.
2. Задать значения параметров источника напряжения.
3. Провести настройку измерительной аппаратуры.
4. Провести эксперименты и описать их.
6. Собрать электрические схемы (номиналы элементов указывает преподаватель): 1) *RR* делитель напряжения, 2) *RC* интегрирующая цепь, 3) *RC* дифференцирующая цепь, 4) *RVD* простейший стабилизатор.
5. Используя возможности программ получить графики экспериментов, сделать выводы.
6. Выполнить макетирование электрических схем (номиналы элементов указывает преподаватель): 1) *RR* делитель напряжения, 2) *RC* интегрирующая цепь, 3) *RC* дифференцирующая цепь, 4) *RVD* простейший стабилизатор.

7. Измерить характеристики с помощью измерительных приборов (генераторов сигналов, осциллографов, комбинированных приборов АСК-4174).
8. Оформить отчет.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается основное отличие аналоговых схем от цифровых?
2. Каким образом определяется эквивалентное сопротивление делителя напряжения?
3. Что характеризует динамическое сопротивление?
4. В чем состоит принцип работы простейшего стабилизатора на стабилитроне?
5. В чем состоит принцип работы усилителя на туннельном диоде?
6. Каким образом определяется АЧХ схемы?
7. Какими свойствами обладают RC -цепи?
8. Каковы фазовые сдвиги между током и напряжением в реактивных схемах?
9. Что характеризует коэффициент мощности в реактивных схемах?
10. В чем заключается и как применяется обобщенный закон Ома?
11. На чем основано выпрямление сигнала?
12. На чем основано умножение напряжения?
13. В чем состоит принцип работы диодного ограничителя?
14. В чем состоит принцип работы амплитудного селектора?

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И СТАБИЛИТРОНОВ

Цель работы:

Ознакомиться с основами работы в пакете *LTSpice*, *Proteus* исследовать свойства полупроводниковых диодов и стабилитронов.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводов.

Теоретические пояснения к работе

Полупроводниковый диод – конструктивное оформление p - n перехода. Поэтому, когда говорят о снятии вольт – амперных характеристик (ВАХ) диода, то фактически идет речь о характеристиках p - n перехода. Если включить диод в электрическую цепь так чтобы на аноде потенциал был выше чем на катоде, то говорят о прямом смещении p - n перехода (диода), и он находится в проводящем состоянии (прямая ветвь ВАХ). Если потенциал анода будет ниже чем катода, то диод смещен в обратном направлении, и он находится в непроводящем состоянии (обратная ветвь ВАХ).

Возможность использования диода определяется ВАХ, как по току, так и по напряжению. Однако приведение ВАХ в справочниках затруднено, и поэтому достаточно широко в качестве производных статических характеристик используют характеристические сопротивления.

Качество работы диода в электрической схеме помимо статических характеристик определяется и частотными свойствами диодов. Применение низкочастотных диодов в высокочастотных электрических цепях приводит к их неработоспособности или к аварии. Диод является пассивным нелинейным элементом. Представляет собой p - n -переход, обладающий односторонней проводимостью. Характеризуется прямым током, обусловленным рекомбинацией основных носителей на границе p - n -перехода, и обратным током, обусловленным неосновными носителями. Напряжение, достаточное для открывания диода, составляет 0,6–0,7 В. Нелинейность зависимости тока и

напряжения не позволяет использовать закон Ома для диодов. Пример ВАХ полупроводникового диода представлен ниже.

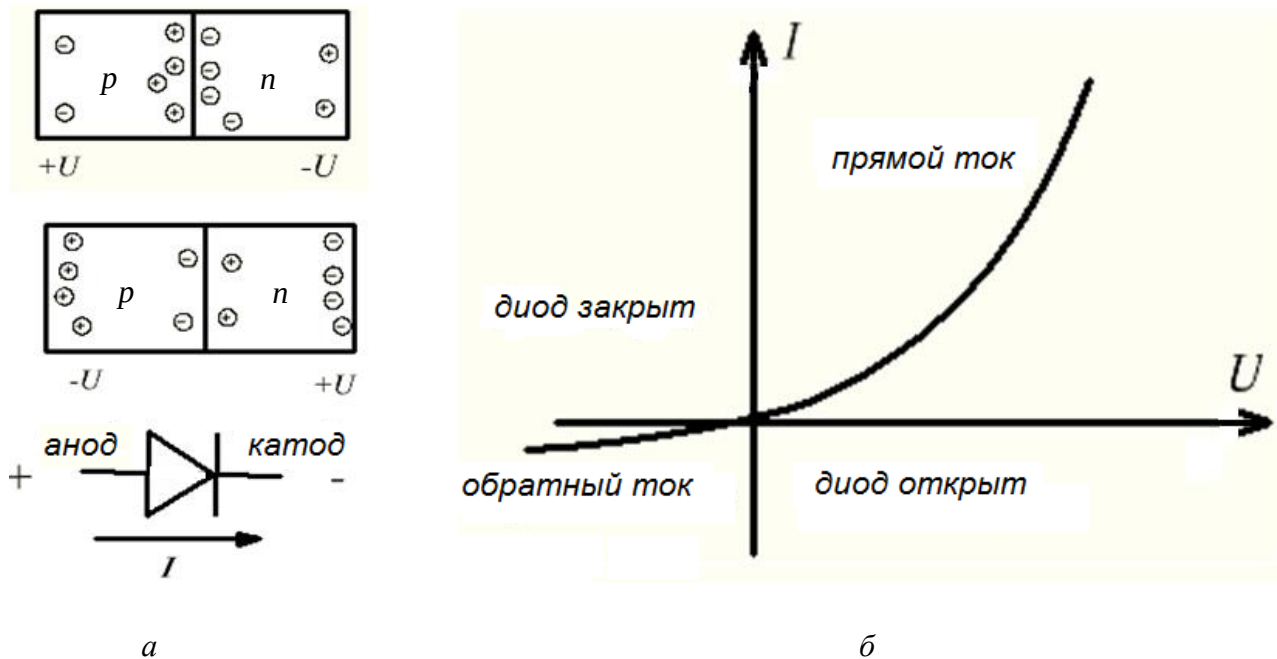


Рис. 2.1. Полупроводниковый диод (а) и его ВАХ (б)

Выпрямление

Выпрямитель преобразует переменный ток в постоянный. Существует несколько схем для выпрямления.

Однополупериодная схема

В однополупериодной схеме используется один полупроводниковый диод, который пропускает только одну полуволну переменного напряжения. Для сглаживания пульсаций используют RC -фильтр с $\tau = RC \gg T$. Недостатком этой схемы является низкий КПД.

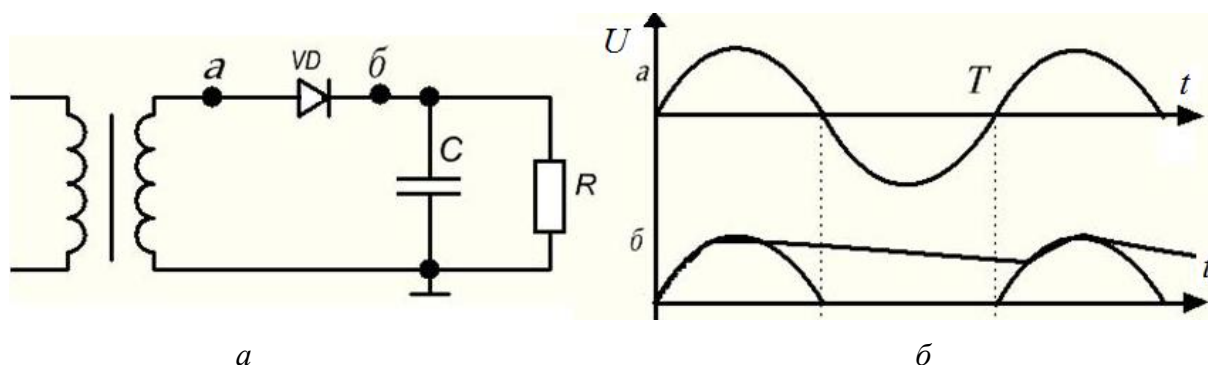


Рис. 2.2. Однополупериодная схема выпрямителя (а) и временные диаграммы ее работы (б)

Мостовая двухполупериодная схема

Данная схема имеет повышенный КПД, так как используются обе половинны входного напряжения.

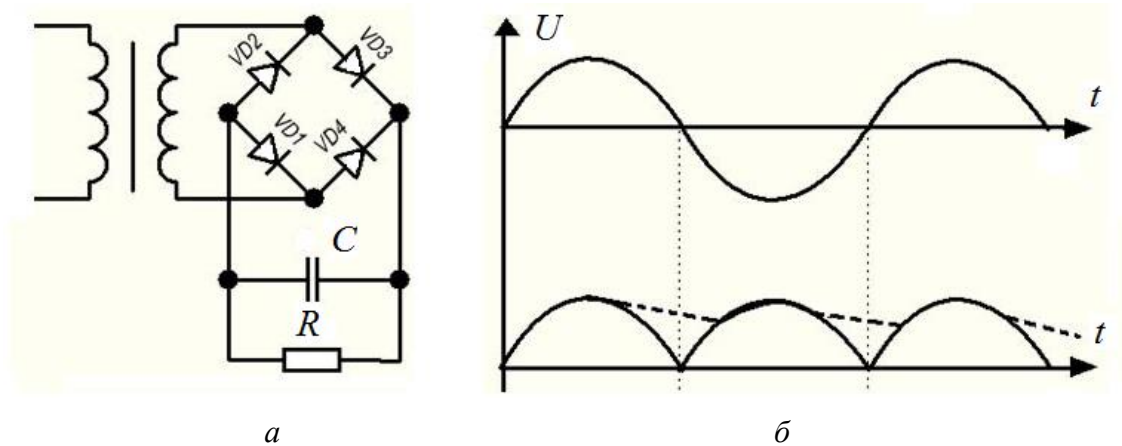


Рис. 2.3. Двухполупериодная схема выпрямителя (а) и временные диаграммы ее работы (б)

Схема для получения двухполярного питания

В данной схеме используется емкостный делитель напряжения.

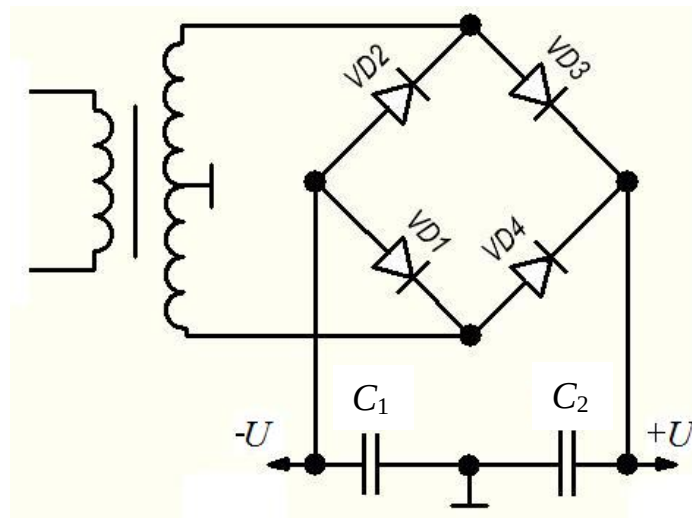


Рис. 2.4. Схема выпрямителя с двухполярным выходным напряжением

Умножители напряжения

Умножитель напряжения формирует на выходе постоянное напряжение из переменного входного напряжения. Его работа основана на заряде и разряде конденсаторов через диоды. Существует ряд схем умножения. Рассмотрим принцип работы некоторых из них.

Схема удвоения напряжения

Сущность работы схемы заключается в следующем. Во время положительной полуволны напряжения U_2 через открывающийся в это время диод $VD1$ конденсатор C_1 заряжается током i_1 до величины $U_{C1} = U_2$. Во время отрицательной полуволны напряжения U_2 конденсатор C_1 разряжается через открывающийся в это время диод $VD2$, а конденсатор C_2 заряжается током i_2 до величины $U_{C2} = U_{\text{ВЫХ}} = U_2 + U_{C1} = 2U_2$. При этом необходимо, чтобы для постоянной времени разряда конденсаторов, зависящей от их емкости и от R_H , выполнялось условие $\tau \gg T$.

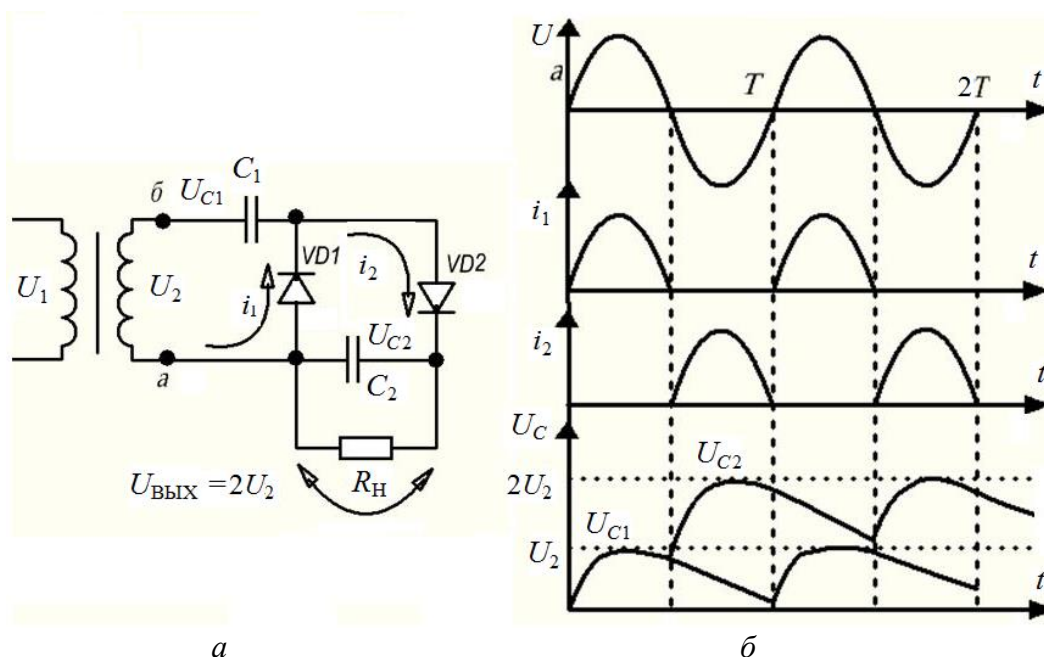


Рис. 2.5. Схема умножителя напряжения (а) и временные диаграммы ее работы (б)

Схема умножения до 4 раз

Разновидности предыдущей схемы позволяют увеличивать напряжение в 3, 4 и более раз. В реальных схемах коэффициент умножения напряжения ниже, чем в рассмотренном выше идеальном случае.

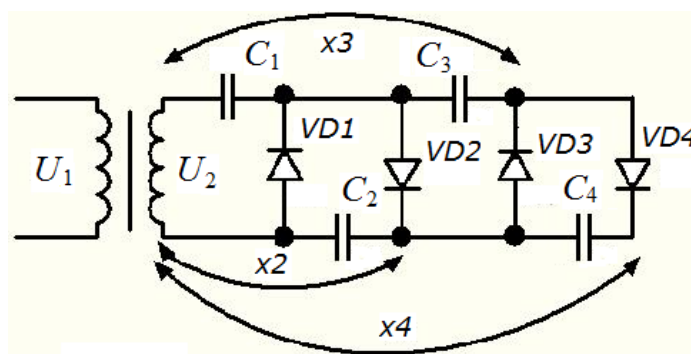


Рис. 2.6. Схема умножителя напряжения до 4 раз

Получение однополярных импульсов

Для выделения переднего и заднего фронтов импульсных сигналов можно использовать дифференцирующую цепь (диаграммы 1 и 2 на рис. 2.7, б). Для такой цепи $\tau = RC \ll t_{\text{имп}}$. Диод пропускает импульсы положительной полярности (диаграмма 3).

На выходе буферного логического элемента формируется короткий импульс, соответствующий переднему фронту (диаграмма 4).

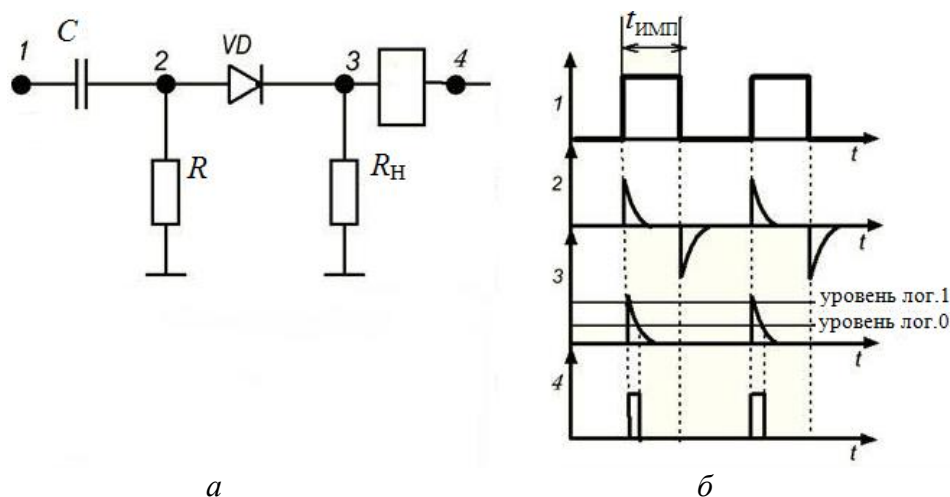


Рис. 2.7. Схема для получения однополярных импульсов (а) и временные диаграммы ее работы (б)

Диодные вентили

Диоды $VD1$, $VD2$ в нижеприведенной схеме позволяют автоматически подключать электронные часы к питанию от батареи при пропадании напряжения от сетевого источника питания.

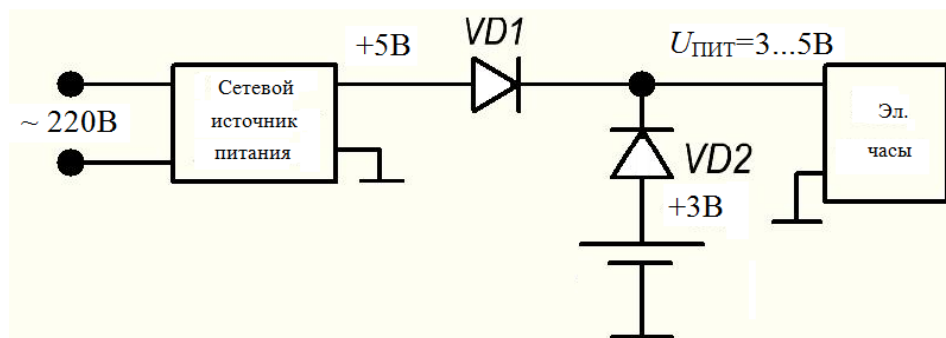


Рис. 2.8. Пример использования диодов для подключения резервного питания

Необходимое условие работы диодных вентилей в схеме: напряжение сетевого источника питания должно быть немного больше (по крайней мере на 0,6 В), чем напряжение батареи. При наличии 5 В от сетевого источника питания это напряжение через открытый диод $VD1$ подается на часы. При этом диод $VD2$ закрыт. При пропадании 5 В диод $VD2$ открывается и на часы поступает питание от батареи +3 В.

Диодные ограничители

Ниже показаны примеры ограничителей сверху и снизу и временные диаграммы, поясняющие их работу.

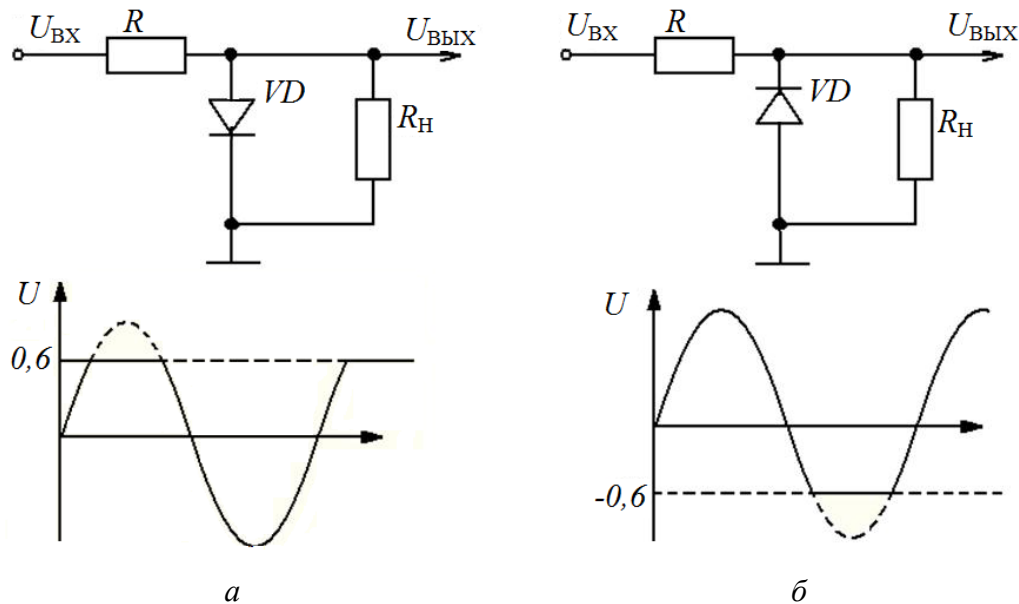


Рис. 2.9. Схемы и временные диаграммы работы диодных ограничителей:
а – сверху; б – снизу

В данных схемах R_H – сопротивление нагрузки; R – сопротивление, ограничивающее ток через диод, R_H и R образуют делитель напряжения. Поэтому $U_{ВЫХ} < U_{ВХ}$. Работа диодного ограничителя основана на шунтировании нагрузки открывающимся p - n -переходом диода при превышении уровня напряжения на его аноде по отношению к катоду приблизительно на $0,6$ – $0,7$ В. Чтобы задать уровень ограничения, на диод надо подать опорное напряжение U_0 . В данном примере $U_0 = 0$.

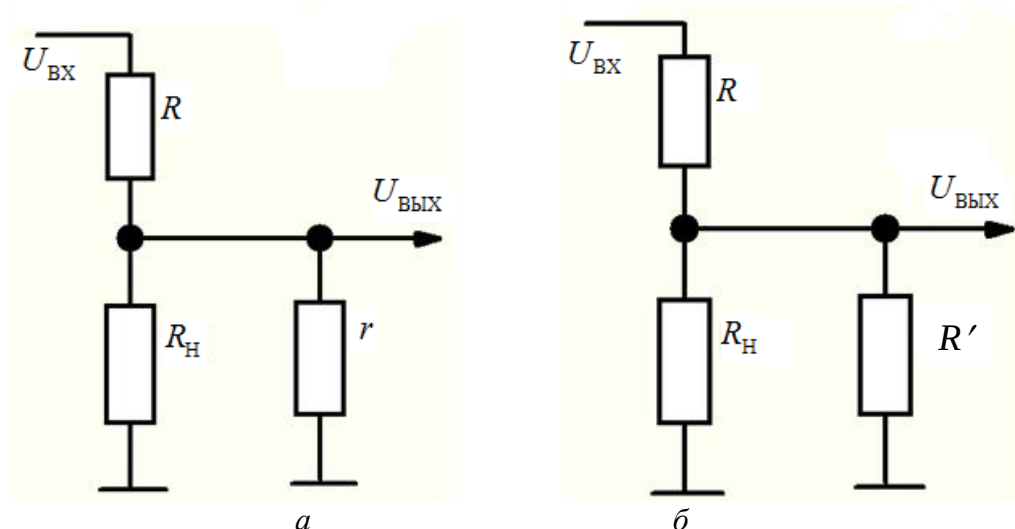


Рис. 2.10. Эквивалентная схема ограничителя:

а – при наличии ограничения; б – при отсутствии ограничения:

r – прямое сопротивление диода $r \ll R_H$, $U_{ВЫХ} \approx U_r = 0,6$ В,

R' – обратное сопротивление диода $R' \gg R_H$, $U_{ВЫХ} \approx U_{ВХ}$ при $R_H \gg R$

Ниже показаны примеры ограничителя сверху с регулируемым уровнем опорного напряжения (рис. 2.11) и двухсторонних ограничителей (рис. 2.12, 2.13).

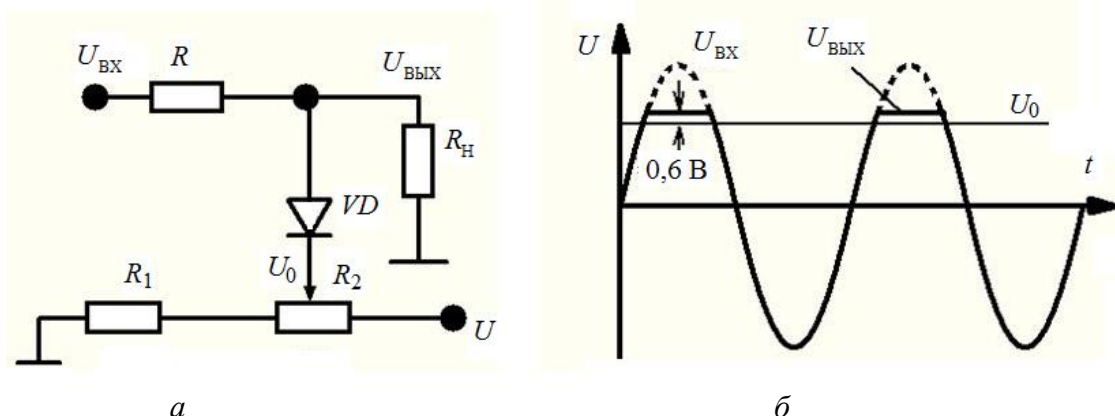


Рис. 2.11. Схема (а) и временная диаграмма работы (б) диодного ограничителя сверху с регулируемым уровнем ограничения

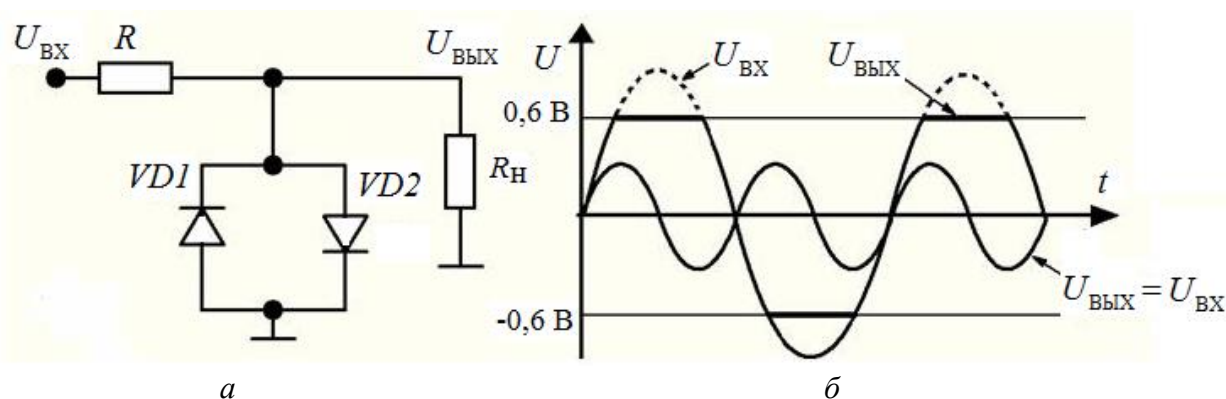


Рис. 2.12. Схема (а) и временная диаграмма работы (б) двухстороннего ограничителя

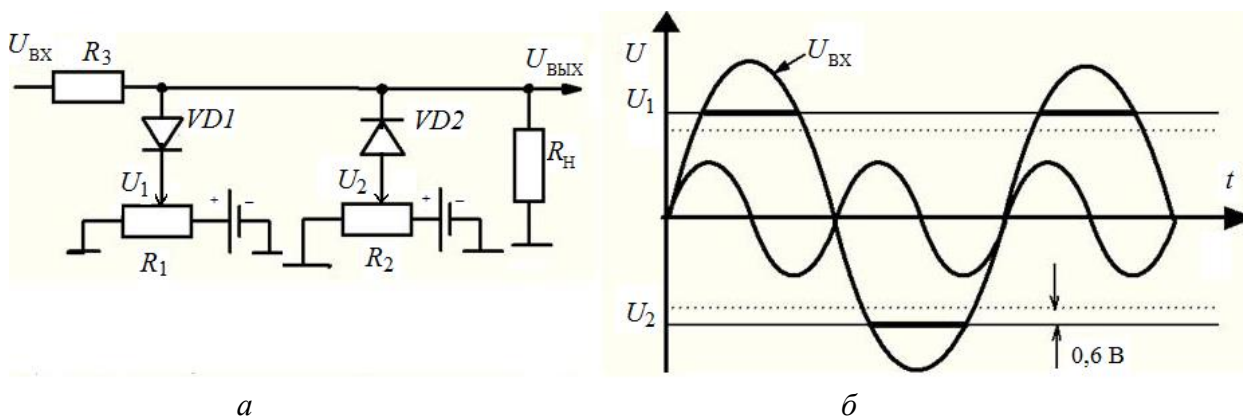


Рис. 2.13. Схема (а) и временная диаграмма работы (б) двухстороннего диодного ограничителя с регулируемыми уровнями ограничения

Потенциометры R_1 и R_2 , задающие опорные уровни напряжения U_1 и U_2 , должны иметь небольшое сопротивление, чтобы не препятствовать прохождению тока через диоды при их открывании. Общее условие –

$R_H \gg R_1 + r$ и, соответственно, $R_H \gg R_2 + r$, где r – сопротивление открытого диода.

Вариантом одностороннего диодного ограничителя является схема, работа которой основана на свойстве односторонней проводимости диода пропускать сигнал выше или ниже опорного уровня, подаваемого на катод или анод диода в зависимости от вида ограничителя.

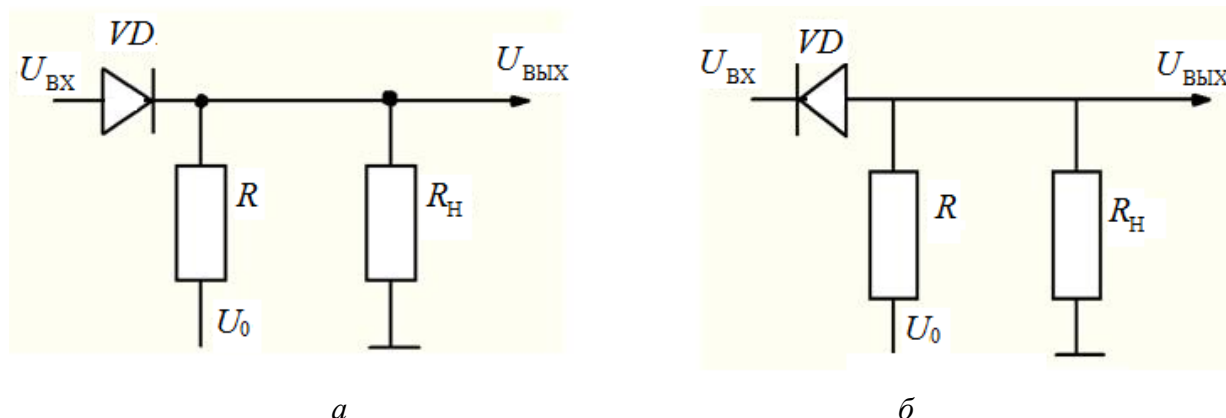


Рис. 2.14. Варианты схем односторонних ограничителей:
а – снизу; б – сверху

Фиксация уровня напряжения

При прохождении через емкость сигнал теряет постоянную составляющую. Постоянная составляющая – это среднее значение, которое при прохождении сигнала через емкостную цепь становится равным нулю: $U_{ВЫХ} = U_R = U_{ВХ} - U_C$. Процесс потери постоянной составляющей U_{CP} и уровня фиксации $U = 0$ при прохождении сигнала через емкость показан на рис. 2.15.

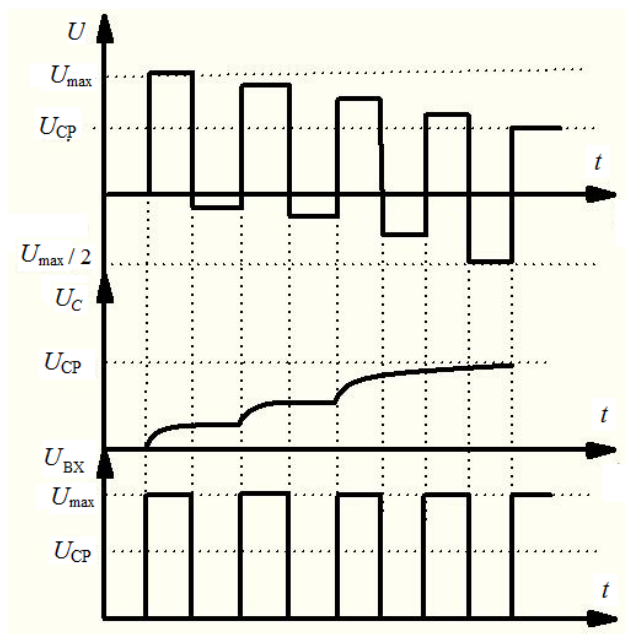


Рис. 2.15. Иллюстрация процесса потери постоянной составляющей при прохождении сигнала через емкость

Для восстановления опорного уровня напряжения (фиксации) может быть использован диод, на который подано некоторое опорное напряжение U_0 . В данном случае $U_0 = 0$ подано на анод диода и для всех отрицательных значений сигнала $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ (а точнее 0,6 В).

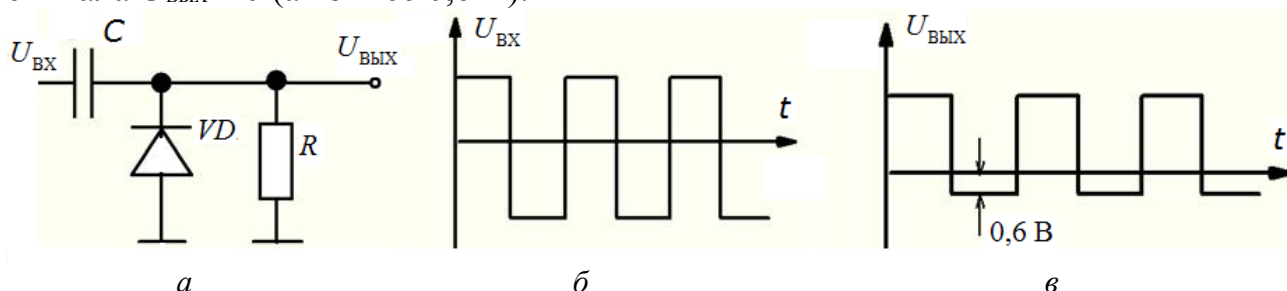


Рис. 2.16. Схема восстановления постоянной составляющей с использованием диода (а) и временные диаграммы, поясняющие ее работу (б, в)

Пример выполнения эксперимента лабораторной работы

Для выполнения лабораторной работы в программах *LTSpice* и *Proteus* нужно собирать все вышеуказанные схемы. Один из примеров использования программы *LTSpice* для эксперимента показан далее по тексту.

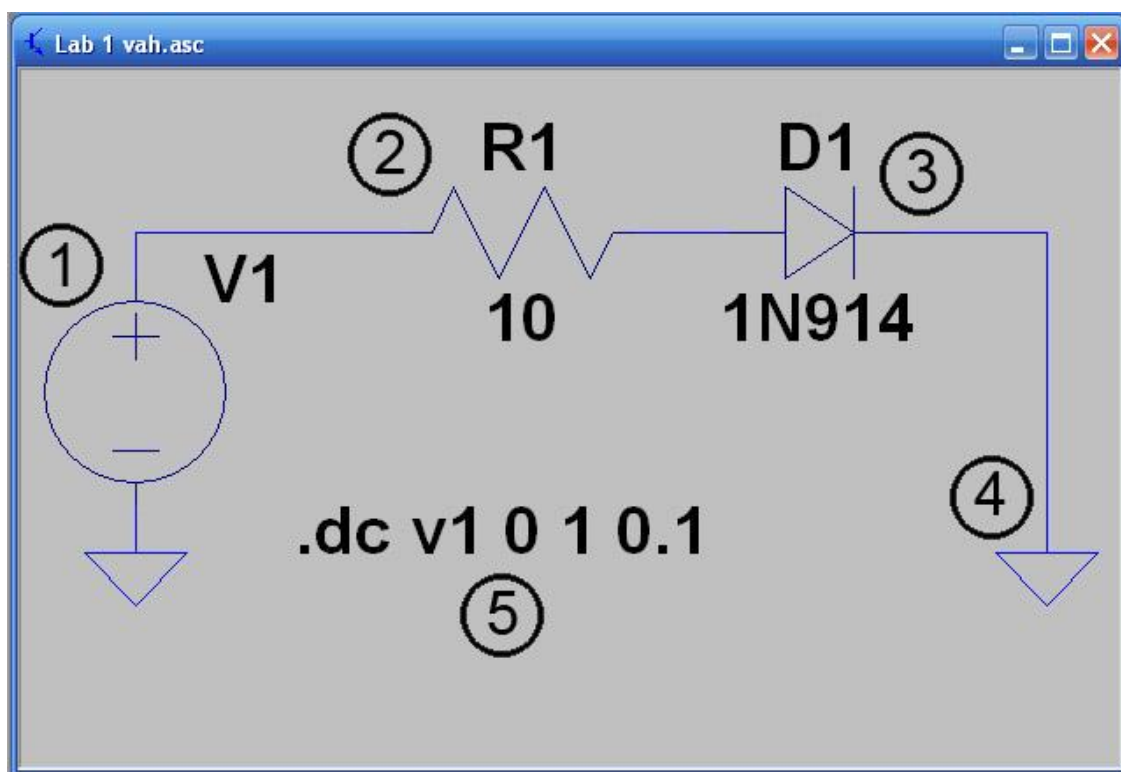


Рис. 2.17. Схема эксперимента лабораторной работы

На рис.2.17 обозначено:

1- источник напряжения необходимой формы либо сигнала, 2- ограничивающий ток резистор, 3- исследуемый диод, 4- заземление

(обязательный элемент пакета), 5- на рабочем поле отображены настройки источника напряжения.

Источник напряжения **V1** настраиваем так, чтобы он генерировал напряжение от 0 до 1 вольта с шагом 0.1 вольта. Для настройки источника напряжения выбираем меню **Simulate\Edit simulate Cmd**, в окошке **DC sweep** настраиваем источник **1 st Source** (рис. 2.18).

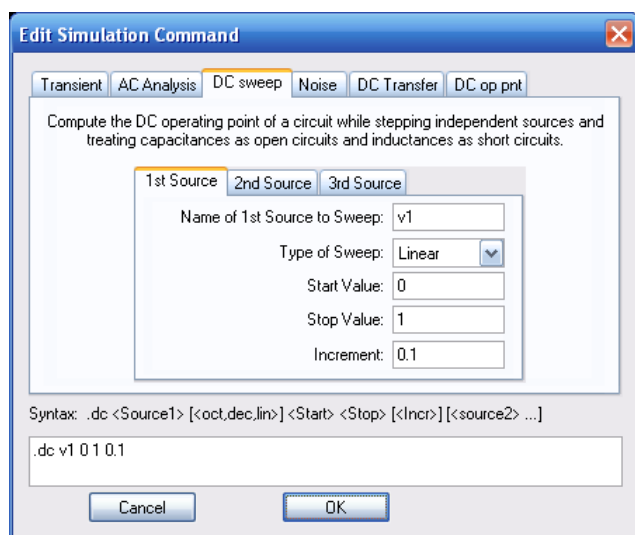


Рис. 2.18. Настройка источника напряжения.

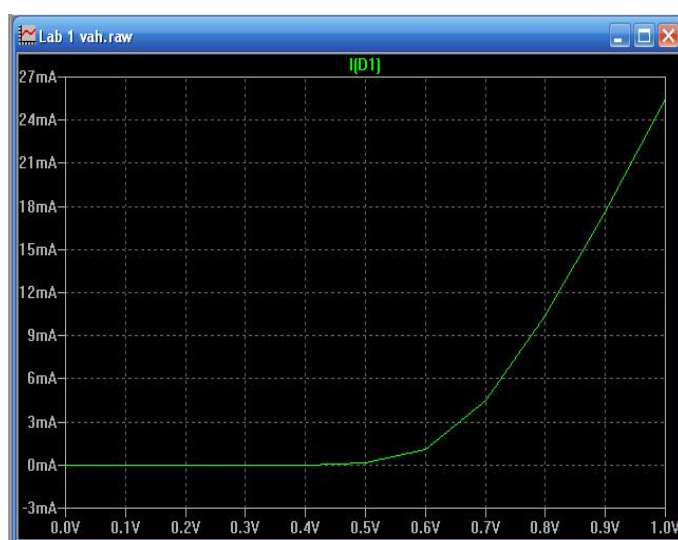


Рис. 2.19. Полученная ВАХ диода 1N914.

Данный источник напряжения имеет внутреннее сопротивление равное нулю, поэтому мы используем ограничивающий резистор **R1**. Для редактирования атрибутов элементов схемы, нужно навести курсор мыши на элемент и нажать правую кнопку мыши.

Чтобы **начать симуляцию**, после настройки всех элементов схемы, нажимаем кнопку **Run** в меню **Simulate**, либо можно кликнуть правой кнопкой мыши на рабочем поле графического редактора и выбрать команду **Run**.

После запуска симуляции, открывается окно графического процессора, где отображаются графики. Для отображения графика вольт – амперной характеристики, в режиме симуляции нужно навести курсор мыши на исследуемый диод и кликнуть левой кнопкой. На поле графического процессора появилась вольт – амперная характеристика диода (рис. 2.19.).

Теперь необходимо получить график зависимости тока диода и напряжения на нем от времени. Для этого изменяем настройки источника напряжения.

Для этого выбираем команду меню **Simulate\Edit simulate Cmd**, в окошке **DC sweep** убираем данные источника **1 st Source** (рис. 2.20).

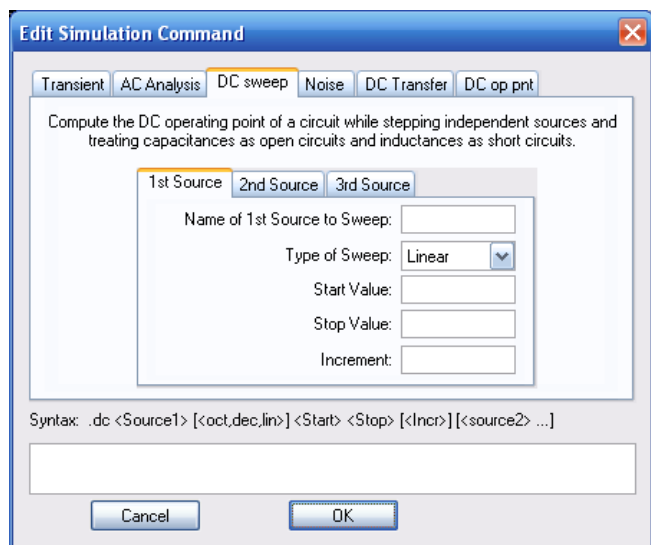


Рис. 2.21. Окно DC sweep.

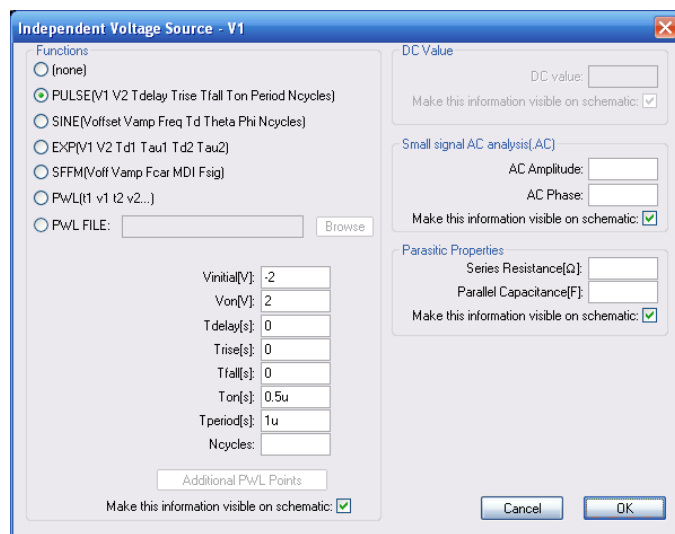


Рис. 2.22. Настройка импульсного источника напряжения.

Нам нужно выбрать импульсный источник напряжения, для этого кликаем правой кнопкой мыши на источнике. Появилось окно настройки источника напряжения. В окне Functions мы выбираем импульсный тип сигнала (Pulse). Далее переходим к настройке его характеристик:

Vinitial[V] – начальное значение, Von[V] – максимальное значение, Tdelay[s] – задержка, Trise[s] – время нарастания, Tfall[s] – время спада, Ton[s] – длительность плоской части импульса, Tperiod[s] – период повторения, Ncycles – количество циклов.

Необходимые настройки приведены на рисунке 2.22. После настройки источника напряжения, нажимаем ОК и еще раз запускаем симуляцию (**Run** в меню **Simulate**). Для снятия напряжения нужно навести курсор мыши на проводник, идущий к аноду и при появлении «щупа» нажать левую кнопку мыши. После этого на поле графического процессора отображается напряжение на аноде исследуемого диода. Чтобы измерить ток, который по нему течет, наводим курсор на диод и при появлении значка «амперметр» нажимаем левую кнопку мыши. Теперь на поле графического процессора отображается и напряжение и ток диода (Рис. 2.23).

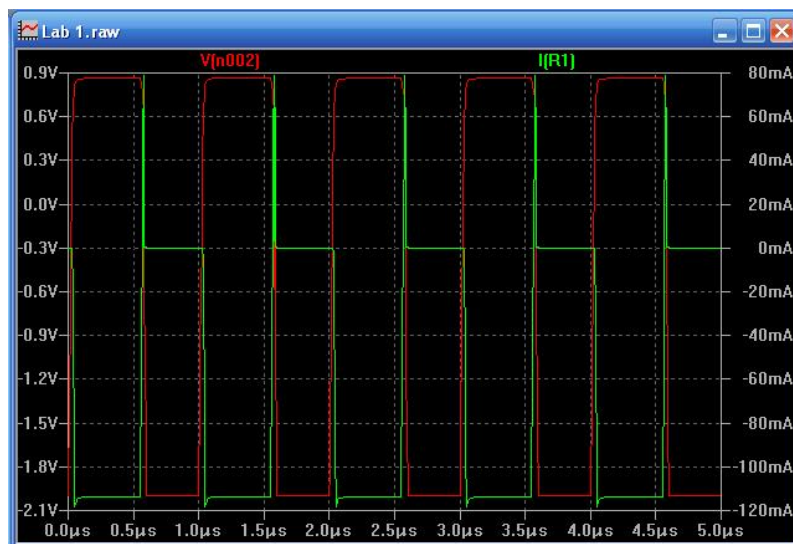


Рис. 2.23. График временной функции.

Программа лабораторной работы:

1. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать электрические схемы, снять их характеристики.
2. Задать значения параметров источника напряжения.
3. Провести настройку измерительной аппаратуры.
4. Провести эксперименты и описать их.
6. Собрать электрические схемы (номиналы элементов указывает преподаватель): 1) Однополупериодного выпрямителя, 2) Мостового двухполупериодного выпрямителя, 3) Выпрямителя с двухполярным выходным напряжением, 4) Схему множителя напряжения и 5) Схему получения импульсов.
5. Используя возможности программ получить графики экспериментов, сделать выводы.
6. Выполнить макетирование электрических схем (номиналы элементов указывает преподаватель): 1) Однополупериодного выпрямителя, 2) Мостового двухполупериодного выпрямителя, 3) Выпрямителя с двухполярным выходным напряжением, 4) Схему множителя напряжения и 5) Схему получения импульсов.
7. Измерить характеристики с помощью измерительных приборов (генераторов сигналов, осциллографов, комбинированных приборов АСК-4174).
8. Оформить отчет.

Экспериментально-расчетное задание №2.1

«Исследование характеристик и параметров германиевых и кремниевых полупроводниковых диодов»

Цель экспериментально-расчетного задания

Ознакомиться с физическими основами работы электронно-дырочных переходов, приобрести навыки экспериментального исследования полупроводниковых приборов, исследовать влияние материала полупроводника и температуры окружающей среды на характеристики и параметры полупроводниковых диодов.

1. Записать параметры исследуемых диодов.
2. Собрать схему измерений для снятия прямой ветви ВАХ германиевого полупроводникового диода (рис. 12).
3. Снять прямую ветвь ВАХ германиевого диода $U_{\text{прям}} = f(I_{\text{прям}})$, изменяя прямой ток в пределах от 0 до 100 мА. Результаты измерений свести в таблицу 2.1.

Это важно!

При снятии прямой ветви ВАХ задаются значением прямого тока, а не напряжения, как следует из определения понятия прямой ветви ВАХ, так как ВАХ имеет экспоненциальный характер и в области больших прямых токов малым изменениям напряжения

соответствуют значительные изменения прямого тока.

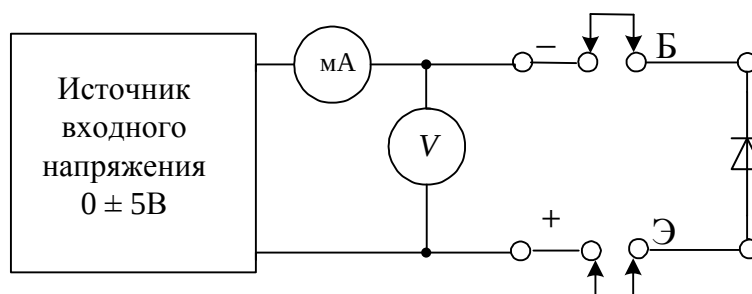


Рис. 2.24. Схема эксперимента для снятия прямой ветви ВАХ полупроводникового диода

Таблица 2.1

Пример оформления экспериментальных данных
при снятии прямой ветви ВАХ

$I_{пр}, \text{мА}$	0	1	5	10	30	50	70	100
$U_{пр}, \text{В}$ при $T_1 =$								
$U_{пр}, \text{В}$ при $T_2 =$								

4. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики германиевого электронно-дырочного перехода (рис. 2.25).

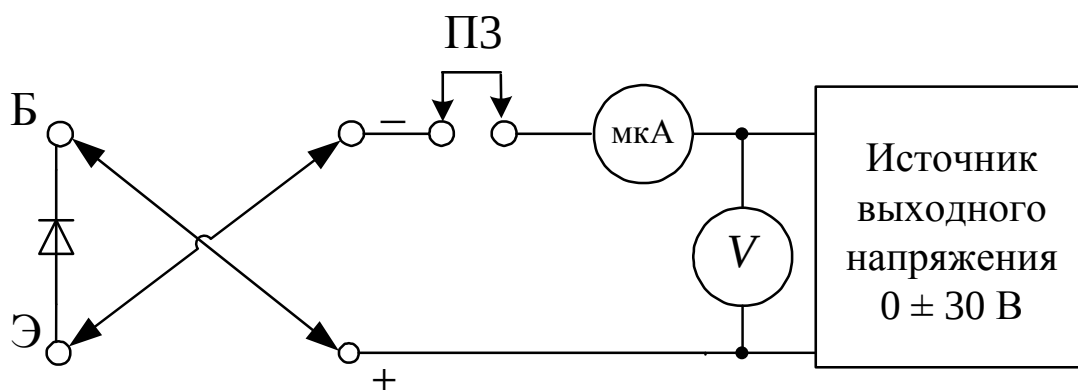


Рис. 2.25. Схема эксперимента для снятия обратной ветви ВАХ полупроводникового диода

5. Снять обратную ветвь ВАХ германиевого диода $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$, изменяя значение обратного напряжения в диапазоне от 0 до 30 В и отмечая при этом получающиеся величины обратного тока. Результаты измерений свести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Пример оформления экспериментальных данных
при снятии обратной ветви ВАХ

$U_{\text{обр}}, \text{В}$	0	0,05	0,1	0,2	1	10	15	25
$I_{\text{обр}}, \text{мкА}$ при $T_1 =$								
$I_{\text{обр}}, \text{мкА}$ при $T_2 =$								

6. Исследуемый германиевый диод нагреть до температуры 50 °С. Через 5 минут повторить пункты 2–5.

7. Собрать схему измерений для снятия прямой ветви ВАХ кремниевого диода (рис. 2.24).

8. Снять при комнатной температуре прямую ветвь ВАХ кремниевого диода $U_{\text{прям}} = f(I_{\text{прям}})$, изменяя прямой ток в пределах от 0 до 100 мА. Результаты измерений свести в таблицу 2.1.

9. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики кремниевого диода (рис. 2.25).

10. Снять при комнатной температуре обратную ветвь ВАХ кремниевого перехода $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$, изменяя значение обратного напряжения в диапазоне от 0 до 30 В и отмечая при этом получающиеся величины обратного тока. Результаты измерений свести в таблицу 2.2.

11. Довести температуру кремниевого диода до 60–70 °С и через 5 минут повторить пункты 7–10.

Обработка результатов эксперимента

1. Построить ВАХ исследованных диодов при комнатной и повышенной температурах.

2. Определить $U_{\text{пр}}$ при $I_{\text{пр. макс}}$ и $I_{\text{обр}}$ при $U_{\text{обр. макс}}$ для комнатной и повышенной температур.

3. Определить дифференциальное сопротивление, используя формулу $r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}}$, в рабочих точках, соответствующих значениям прямого тока: $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$. Приращенные напряжения и тока при определении дифференциального сопротивления необходимо брать в окрестностях указанных рабочих точек.

4. Определить сопротивление прямому току исследованных переходов по формуле $R_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / I_{\text{пр}}$ для трех значений прямого тока: $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$; $I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$.

5. Определить сопротивление обратному току, используя соотношение $R_{\text{обр}} = U_{\text{обр}} / I_{\text{обр}}$, при $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$ для комнатной и повышенной температур.

6. Рассчитать дифференциальное сопротивление теоретической ВАХ при $T = 300$ К и $\phi_T = 25$ мВ, используя соотношение $r_{\text{диф}} \approx 25/I_{\text{пр}}$ (значение тока подставляется в миллиамперах, тогда значение $r_{\text{диф}}$ получается в Омах), для тех же значений прямого тока, что и в пункте 3.

7. По измеренному у германиевого диода при комнатной температуре значению обратного тока I_0 и уравнению ВАХ $I = I_0 \cdot (\exp[U/\phi_T] - 1)$, где при комнатной температуре $T = 300$ К $\phi_T \approx 25$ мВ, построить теоретическую ВАХ.

8. Для кремниевого диода по измеренному значению $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}/2$ и соответствующему ему напряжению $U_{\text{пр}}$ для комнатной температуры вычислить значение I_0 по формуле: $I_0 = I_{\text{пр}}/\exp[U_{\text{пр}}/\phi_T]$, считая $\phi_T \approx 25$ мВ.

9. Определить для исследованных диодов температурные коэффициенты:

$$\text{ТКН}_{\text{пр}} = \Delta U_{\text{пр}}/\Delta T, \text{ при } I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}} \quad (2.1)$$

$$\text{ТКИ}_{\text{обр}} = \frac{(T_1 - T_2)}{\sqrt[10]{I_2/I_1}}, \quad (2.2)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$; $I_{\text{обр}1}$ и $I_{\text{обр}2}$ значения обратного тока при температурах окружающей среды, соответственно, T_1 и T_2 и $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$.

Справочные данные и рассчитанные параметры свести в сводную таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Справочные и расчетные данные исследованных диодов

Тип диодов			
Параметры			
Справочные данные			
$I_{\text{пр}}$, мА			
$U_{\text{пр}}$, В			
$U_{\text{обр}}$, В			
$I_{\text{обр}}$, мкА			
Экспериментальные данные			
$U_{\text{пр}}$, В, при $I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$	$T_1 =$		
	$T_2 =$		
$I_{\text{обр}}$, мкА, при $U_{\text{обр}} = U_{\text{обр. макс}}$	$T_1 =$		
	$T_2 =$		
$r_{\text{диф}}$, Ом	$I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
Расчетные данные			
$r_{\text{диф}} = 25/I_{\text{пр}}$, Ом			
$I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$			
$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$			
$I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$			
$R_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/I_{\text{пр}}$, Ом	$I_{\text{пр}} = I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,5 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
	$I_{\text{пр}} = 0,1 \cdot I_{\text{пр. макс}}$		
$R_{\text{обр}} = U_{\text{обр}}/I_{\text{обр}}$, кОм	$T_1 =$		
	$T_2 =$		

Экспериментально-расчетное задание № 2.2

«Исследование характеристик и параметров стабилитронов»

Цель экспериментально-расчетного задания

Исследовать влияние материала полупроводника и температуры окружающей среды на характеристики и параметры полупроводниковых стабилитронов.

1. Записать параметры типового режима исследуемых стабилитронов.
2. Определить величину сопротивления R_B по формуле

$$R_B = \frac{U_{\text{ВХ. МАКС}} - U_{\text{СТ. НОМ}}}{I_{\text{СТ. МАКС}}}, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{ВХ. МАКС}}$ – максимальное значение напряжения получаемого от источника, $U_{\text{СТ. НОМ}}$ – напряжение стабилизации (справочный параметр), $I_{\text{СТ. МАКС}}$ – максимальное значение тока стабилизации (справочный параметр).

3. Собрать схему для снятия прямой ветви ВАХ перехода, для этого использовать источник входного напряжения (рис. 2.26).

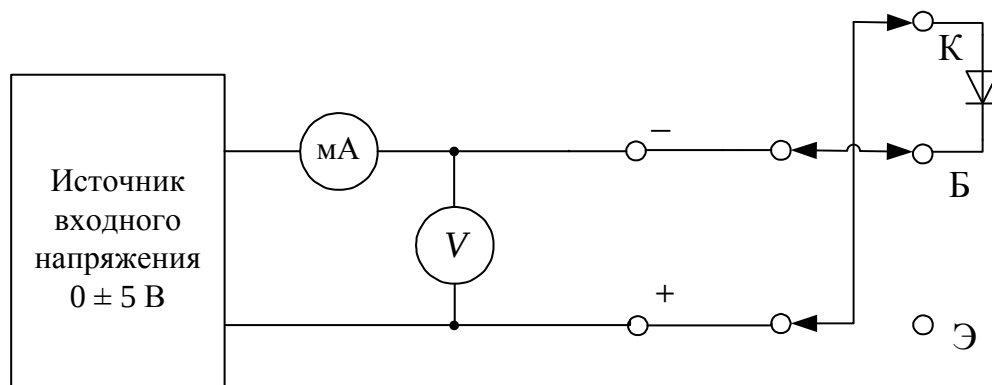


Рис. 2.26. Схема эксперимента для снятия прямой ветви ВАХ стабилитрона

4. Снять прямую ветвь ВАХ перехода $U_{\text{ПРЯМ}} = f(I_{\text{ПРЯМ}})$, изменяя прямой ток в пределах от 0 до 50 мА.

5. Собрать схему для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона (рис. 2.27). Для этого необходимо подключить к соответствующим гнездам макетной платы переменный резистор R_6 и цифровой вольтметр (V1) для измерения напряжения стабилизации $U_{\text{СТ}}$.

Таблица 2.4

Справочные и расчетные данные исследованных стабилитронов

Тип стабилитронов		
Параметры		
Справочные данные		
$I_{\text{пр}}$, мА		
$U_{\text{пр}}$, В		
$U_{\text{обр}}$, В		
$I_{\text{обр}}$, мкА		
Экспериментальные данные		

$U_{пр}$, В, при	$T1=$		
$I_{пр} = I_{пр. макс}$	$T2=$		
$I_{обр}$, мкА, при	$T1=$		
$U_{обр} = U_{обр. макс}$	$T2=$		
$r_{диф}$, Ом	$I_{пр} = I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,5 \cdot I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$		
Расчетные данные			
$r_{диф} = 25/I_{пр}$, Ом			
$I_{пр} = I_{пр. макс}$			
$I_{пр} = 0,5 \cdot I_{пр. макс}$			
$I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$			
$R_{пр} = U_{пр}/I_{пр}$, Ом	$I_{пр} = I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,5 \cdot I_{пр. макс}$		
	$I_{пр} = 0,1 \cdot I_{пр. макс}$		
$R_{обр} = U_{обр}/I_{обр}$, кОм	$T1 =$		
	$T2 =$		

6. Подготовить схему эксперимента (рис. 2.27), для чего установить регулятор переменного резистора R_B в положение, соответствующее максимальному значению сопротивления. Установить напряжение выходного источника $U_{ВЫХ} = 25$ В. Плавное уменьшая величину сопротивления R_B , выставить на миллиамперметре значение $I_{СТ. МАКС}$ исследуемого стабилитрона. Цифровым прибором типа «мультиметр» измерить величину сопротивления R_B .

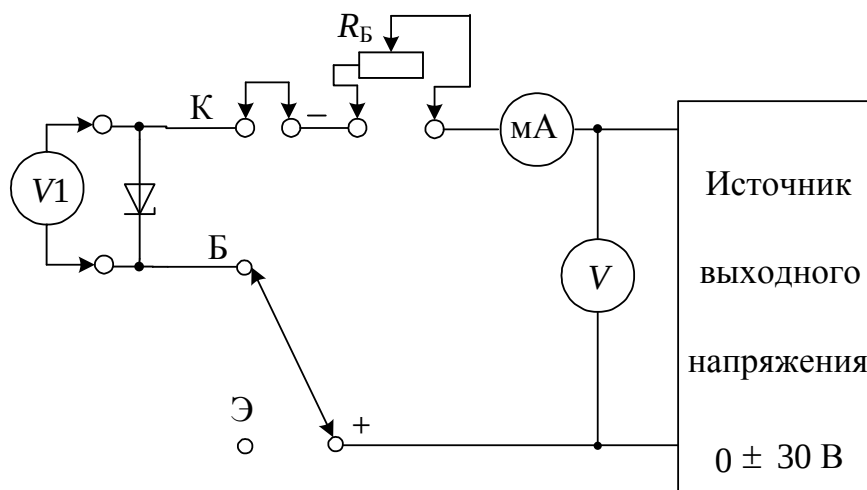


Рис. 2.27. Схема эксперимента для снятия обратной ветви ВАХ стабилитрона

7. Снять зависимость $U_{СТ} = f(I_{СТ})$ при комнатной температуре. При снятии обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона, работающего в режиме электрического пробоя, удобнее задавать ток и отмечать при этом напряжение стабилизации $U_{СТ}$. Ток стабилитрона изменять в пределах от 0 до $I_{СТ. МАКС}$. Результаты измерения свести в таблицу 2.5.

8. Исследуемый переход нагреть до температуры 50° С. Через 5 минут повторить пункты 7 и 3, 4, 5.

Таблица 2.5

Пример оформления экспериментальных данных

$I_{СТ}, \text{мА}$	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	10	15	20	25	$I_{СТ. \text{МАКС}}$
$U_{СТ}, \text{В}$ $T = \text{ } ^\circ \text{С}$											
$U_{СТ}, \text{В}$ $T = \text{ } ^\circ \text{С}$											

9. Заменить один исследуемый стабилитрон на другой. Повторить пункты с 1 по 8.

Обработка результатов эксперимента

1. Для всех исследуемых стабилитронов, предназначенных для работы в режиме электрического пробоя, определить значения $I_{СТ. \text{МАКС}}$, $I_{СТ. \text{МИН}}$. Номинальный ток стабилизации перехода определить по формуле

$$I_{СТ. \text{НОМ}} = 1/2 \cdot (I_{СТ. \text{МАКС}} + I_{СТ. \text{МИН}}). \quad (2.4)$$

2. Для всех исследуемых стабилитронов, используя прямые ветви характеристик, снятые при комнатной и повышенной температурах, определить значения температурного коэффициента напряжения прямой ветви

$$\text{ТКН}_{\text{ПРЯМ}} = \frac{\Delta U_{\text{ПРЯМ}}}{\Delta T} \text{ при } I_{\text{ПРЯМ}} = I_{СТ. \text{НОМ}}. \quad (2.5)$$

3. Для всех исследуемых стабилитронов, используя обратные ветви вольтамперных характеристик, снятые при различных температурах, определить значение температурного коэффициента напряжения стабилизации

$$\text{ТКН}_{СТ} = \frac{\Delta U_{СТ}}{\Delta T} \text{ при } I_{СТ} = I_{СТ. \text{НОМ}}. \quad (2.6)$$

4. Для всех исследуемых стабилитронов по вольтамперным характеристикам, снятым при комнатной температуре, определить для номинального режима:

а) дифференциальное сопротивление обратносмещенного перехода в рабочей точке

$$r_{СТ} = \frac{\Delta U_{СТ}}{I_{СТ. \text{МАКС}} - I_{СТ. \text{МИН}}}, \quad (2.7)$$

где $\Delta U_{СТ}$ соответствует изменениям тока от $I_{СТ. \text{МАКС}}$ до $I_{СТ. \text{МИН}}$,

б) статическое сопротивление перехода $R_{СТ} = U_{СТ. \text{НОМ}} / I_{СТ. \text{НОМ}}$.

5. Для стабилитронов с различным механизмом пробоя определить сопротивление базы. Для этого рассчитать дифференциальное сопротивление

перехода в области «больших» токов прямой ветви вольтамперной характеристики:

$$r_{\text{Б}} \approx r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{ПРЯМ}} / \Delta I_{\text{ПРЯМ}} = (U_2 - U_1) / (I_2 - I_1), \quad (2.8)$$

где I_2 – максимальное измеренное значение прямого тока перехода, I_1 составляет примерно $0,8 \cdot I_2$, значения прямого напряжения U_2 , U_1 соответствуют значениям тока I_2 , I_1 . Сравнить полученные значения.

Содержание отчетов по экспериментально-расчетным заданиям

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования.
2. Типовые параметры исследуемых диодов и стабилитронов.
3. Схемы для экспериментальных исследований.
4. Таблицы экспериментальных данных.
5. Графики вольтамперных характеристик исследуемых диодов и стабилитронов при комнатной и повышенной температурах.
6. Графики теоретической ВАХ диодов и стабилитронов.
7. Расчет параметров исследованных диодов и стабилитронов.
8. Таблицы со справочными, экспериментальными и расчетными данными.
9. Анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы:

1. Что такое прямое смещение p-n перехода?
2. Что такое обратное смещение p-n перехода?
3. Что такое характеристические сопротивления диода?
4. Чем определяются частотные свойства диодов?
5. Каковы фазовые сдвиги между током и напряжением в реактивных схемах?
6. Что характеризует коэффициент мощности в реактивных схемах?
7. В чем заключается и как применяется обобщенный закон Ома?
8. На чем основано выпрямление сигнала?
9. На чем основано умножение напряжения?
10. Как связаны концентрации основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике n-типа?
11. Что такое «равновесная концентрация электронов и дырок» и как она зависит от материала полупроводника, температуры?
12. Как зависит концентрация основных и неосновных носителей заряда от степени легирования и температуры?
13. Объясните механизм образования p-n-перехода.
14. Нарисуйте распределение объемных и подвижных зарядов, напряженности электрического поля и потенциала в области несимметричного p-n-перехода в равновесном состоянии.
15. В чем заключаются условия равновесия p-n-перехода?
16. Что такое «контактная разность потенциалов» и от чего она зависит?

17. Как зависит ширина p - n -перехода от концентрации примеси и от приложенного напряжения?

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ОСНОВНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ

Цель работы:

Ознакомиться с основами работы в пакете *LTSpice*, *Proteus* исследовать свойства биполярных транзисторов, уметь рассчитывать и реализовывать основные схемы включения на основе биполярных транзисторов.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводов.

Теоретические пояснения к работе

Транзистор – активный элемент, который обеспечивает усиление входного сигнала по мощности. Транзистор имеет три вывода: коллектор (К), эмиттер (Э), базу (Б). Структура содержит два *p-n*-перехода: коллекторный и эмиттерный. Различают транзисторы типа *n-p-n* и *p-n-p*.

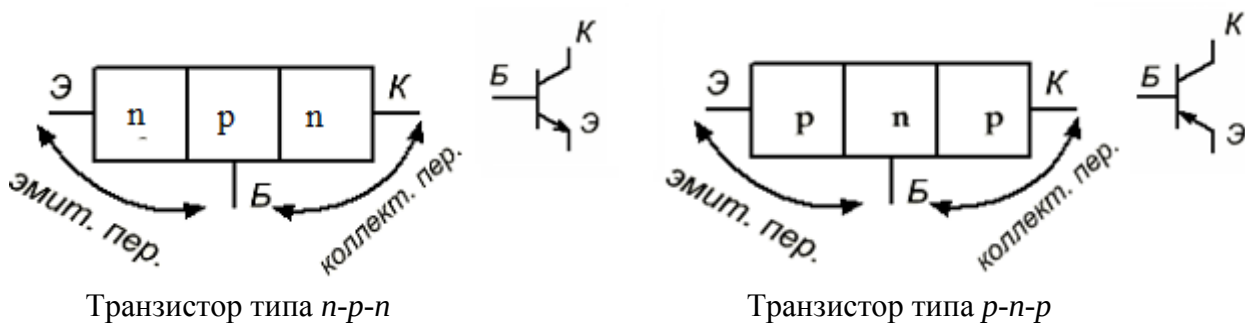


Рис. 3.1. Структуры и условные обозначения биполярных транзисторов

Различают три режима работы транзистора:

1. *Режим насыщения.* В этом режиме коллекторный и эмиттерный переходы открыты (смещены в прямом направлении), поэтому через транзистор течет максимальный неуправляемый ток.

2. *Режим отсечки.* В этом режиме оба перехода закрыты (смещены в обратном направлении), при этом ток практически не течет, за исключением обратного неуправляемого тока коллектора I_{K0} , который обусловлен неосновными носителями заряда.

3. *Активный (усилительный) режим.* В этом режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный – закрыт. Через транзистор течет управляемый ток. Управление током осуществляется напряжением базы U_B .

Простейшая модель транзистора

В простейшей модели транзистор представляется токовым узлом, в котором выполняется закон Кирхгофа: $I_Э = I_B + I_K$. При этом $I_K = f(I_B)$, а именно: $I_K = \beta I_B$, где β – коэффициент усиления по току (соответствует параметру $h_{21Э}$). Коэффициент усиления β зависит от типа транзистора и обычно лежит в диапазоне 10–300. Для простоты оценки работы схемы часто принимается среднее значение в этом диапазоне – $\beta = 100$. Чем больше коэффициент β , тем меньше ток базы I_B , и, следовательно, для больших β выполняется условие $I_K \approx I_Э$. Необходимо при этом иметь в виду, что с ростом β растет уровень собственных шумов транзистора.

Таким образом, основное свойство транзистора (усиление) простейшая модель объясняет тем, что малый ток базы управляет большим током коллектора, который, в свою очередь, берется от внешнего источника питания.

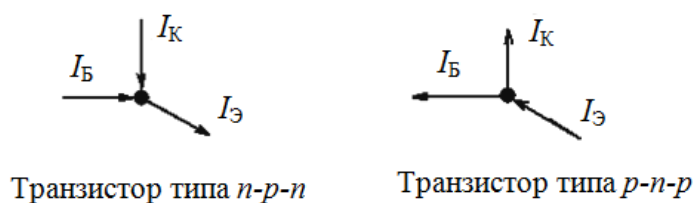


Рис. 3.2. Представление биполярного транзистора в виде токового узла

Для обеспечения активного режима $n-p-n$ -транзистора, если на его эмиттер подано отрицательное напряжение, на базу надо подать положительный потенциал, а на коллектор – еще более положительный потенциал. И, наоборот, для обеспечения активного режима $p-n-p$ -транзистора, если на его эмиттер подано положительное напряжение, на базу надо подать отрицательный потенциал, а на коллектор – еще более отрицательный потенциал.

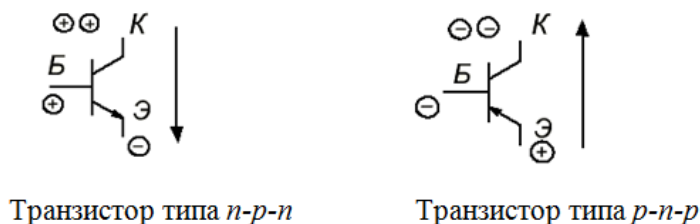


Рис. 3.3. Относительные потенциалы активного режима в биполярном транзисторе

Поскольку для открывания p - n -перехода кремниевого транзистора достаточно между базой и эмиттером подать напряжение $U_{БЭ} = 0,6$ В (для германиевых транзисторов это напряжение немного меньше и составляет около 0,4 В), то напряжение на базе и эмиттере связано соотношениями: для n - p - n -транзистора – $U_{Б} = U_{Э} + 0,6$ В, а для p - n - p -транзистора – $U_{Б} = U_{Э} - 0,6$ В. Напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ не следует увеличивать более чем на 0,6 В, так как возрастает ток через транзистор.

Отношение $\frac{I_{К}}{I_{Э}} = \alpha$ определяет коэффициент передачи эмиттерного тока. Коэффициенты β и α взаимосвязаны. Так как $I_{Э} = I_{Б} + I_{К}$, а $I_{К} = \beta I_{Б}$, то $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$. Таким образом, при $\beta \approx 10 \dots 300$ $\alpha = 0,9 \dots 0,99$.

Схемы включения транзистора и коэффициент передачи по току

Схема с общей базой (ОБ)

В схеме с ОБ входной цепью является цепь эмиттера, а выходной цепью – цепь коллектора, следовательно, коэффициент передачи по току

$K_i = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_{К}}{I_{Э}} = \alpha < 1$. Таким образом, схема с ОБ не усиливает по току.

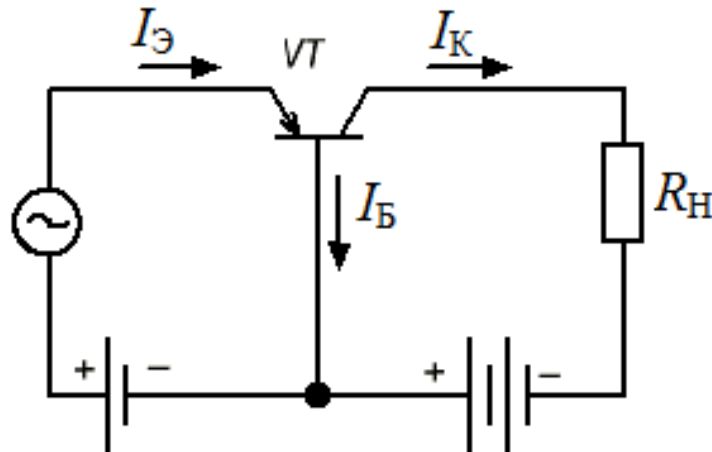


Рис. 3.4. Схема включения транзистора с ОБ

Схема с общим эмиттером (ОЭ)

В схеме с ОЭ входной цепью является цепь базы, а выходной цепью – цепь коллектора, следовательно, $K_i = \frac{I_{К}}{I_{Б}} = \beta$.

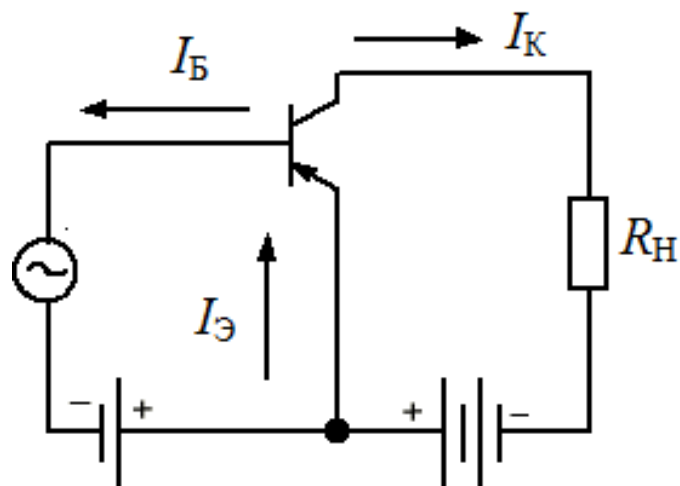


Рис. 3.5. Схема включения транзистора с ОЭ

Схема с общим коллектором (ОК)

В схеме с ОК входной цепью является цепь базы, а выходной цепью – цепь эмиттера, следовательно, $K_i = \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta$.

Таким образом, схема с ОК имеет наибольший коэффициент передачи по току. Если $\beta \gg 1$, то $K_i \approx \beta$.

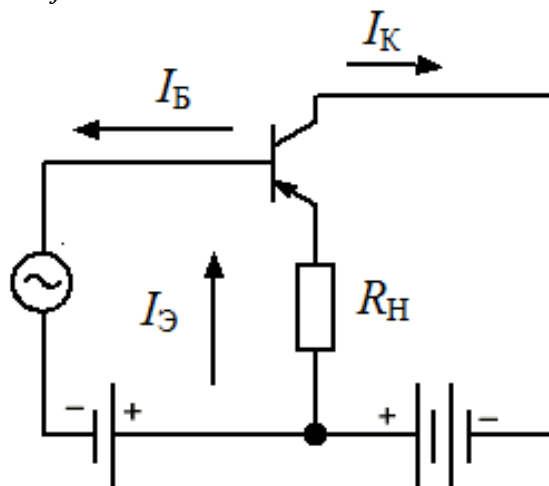


Рис. 3.6. Схема включения транзистора с ОК

Схема с разделенной нагрузкой

В схеме с разделенной нагрузкой входной цепью является цепь базы, а выходной цепью – цепь коллектора с $K_i = \beta$ и цепь эмиттера с $K_i = 1 + \beta \approx \beta$, где K_i – коэффициент передачи по току.

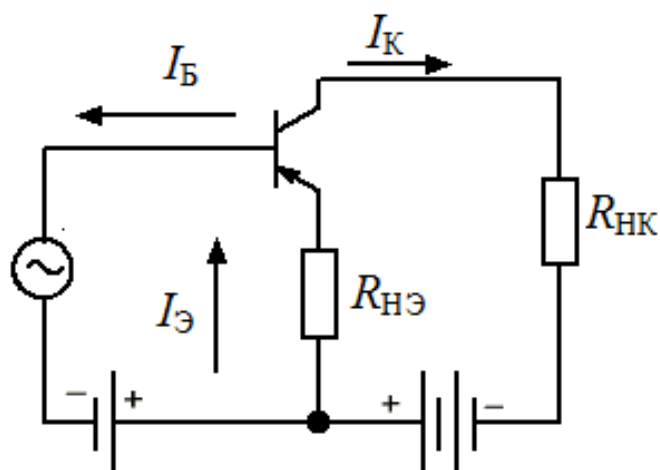


Рис. 3.7. Схема включения транзистора с разделенной нагрузкой

Усиление по мощности

Так как $P = I^2 \cdot R$ и $P = \frac{U^2}{R}$, то коэффициент передачи по мощности схемы определяется следующим выражением:

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}^2 R_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}^2 R_{\text{ВХ}}} = K_i^2 \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2 R_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}^2 R_{\text{ВЫХ}}} = K_U^2 \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВЫХ}}},$$

где K_U – коэффициент передачи по напряжению, $R_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление схемы, $R_{\text{ВХ}}$ – входное сопротивление схемы.

Следовательно, $K_U = K_i \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}}.$

Величина $S = \frac{K_i}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}} R_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ – крутизна входной характеристики

транзистора, которая определяет основные усилительные свойства транзистора и характеризует то, насколько изменяется $I_{\text{ВЫХ}}$ при изменении $U_{\text{ВХ}}$ на один вольт. Если известна крутизна транзистора, то коэффициент передачи схемы по напряжению определяется выражением $K_U = S R_{\text{ВЫХ}}.$

Виды характеристик транзисторов

Входные характеристики

Для схемы с общим эмиттером входной характеристикой называют зависимость тока базы I_B от напряжения базы U_B при заданном напряжении на коллекторе: $I_B = f(U_B)$ при $U_K = \text{const}.$

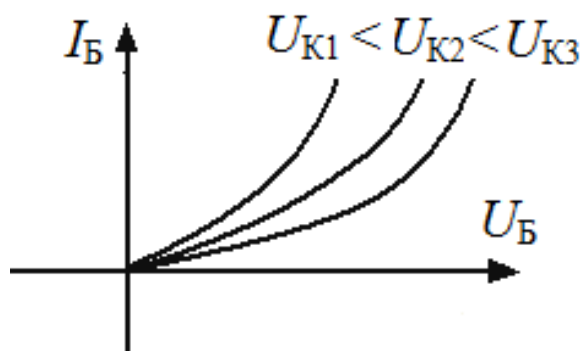


Рис. 3.8. Пример входных характеристик транзистора

Выходные характеристики

Выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора от напряжения коллектора при заданном токе базы: $I_K = f(U_K)$ при $I_B = \text{const}$.

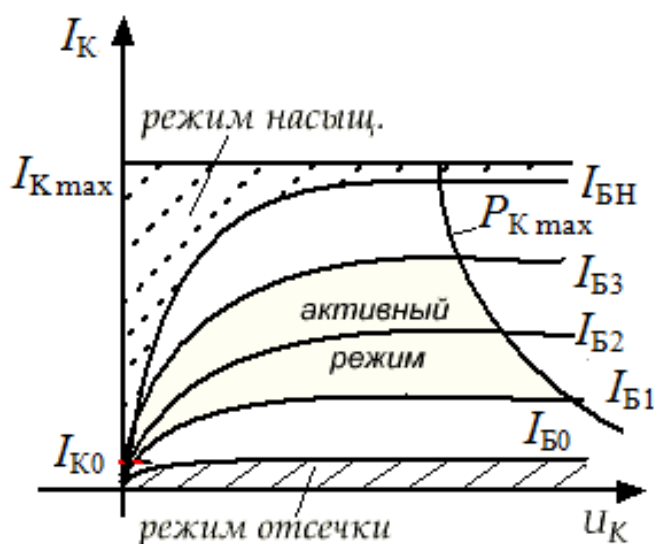


Рис. 3.9. Пример выходных характеристик транзистора

Режим отсечки соответствует зоне, расположенной ниже кривой I_{B0} . Через транзистор протекает неуправляемый обратный ток коллектора I_{K0} .

Режим насыщения соответствует зоне, расположенной выше кривой I_{BH} . Коллекторный ток, протекающий в этом режиме, не должен превышать I_{Kmax} . Область, расположенная между кривыми I_{B0} и I_{BH} , соответствует активному (усилительному) режиму. Справа от кривой P_{Kmax} — область превышения максимально допустимой мощности рассеивания на коллекторе.

Сквозные характеристики

Примером сквозной характеристики является зависимость тока коллектора от тока базы при неизменном напряжении коллектора: $I_K = f(I_B)$ при $U_K = \text{const}$.

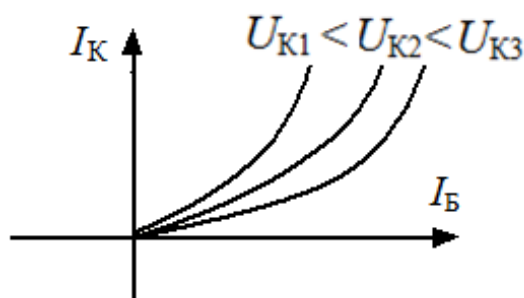


Рис. 3.10. Пример сквозных характеристик транзистора

Наиболее часто используются входные и выходные характеристики транзистора, в частности для выбора рабочей точки (смещения) графическим методом.

Пример выполнения эксперимента лабораторной работы

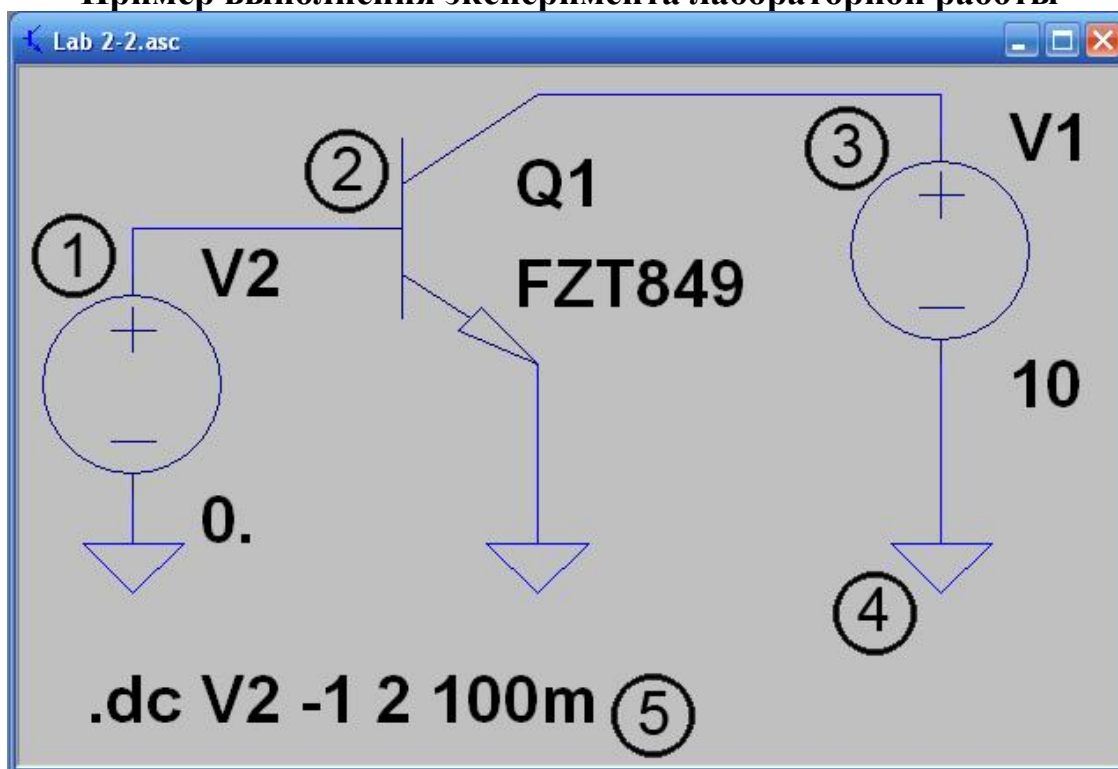


Рис. 3.11. Схема снятия входной характеристики биполярного транзистора.

Для снятия входной статической характеристики программы *LTSpice* нужно собрать схему, показанную на рис 3.11, где обозначено: 1 - источник напряжения необходимой формы; 2 - исследуемый транзистор; 3 - источник напряжения 10 вольт; 4 - заземление (обязательный элемент программы *LTSpice*); 5 - на рабочем поле отображены настройки источника напряжения.

Источник напряжения V1 настраивается так, чтобы он изменял напряжение от -1 до 2 вольт с шагом 100мВ. Источник напряжения V1 настраивается на постоянное напряжение 10В.

Для установки значений параметров компонентов схемы нужно кликнуть правой кнопкой на компоненте после чего откроется окно настройки.

Эксперимент нужно провести для различных транзисторов, согласно своему варианту задания, выдаваемому преподавателем (три различных модели биполярных транзисторов). Для каждого транзистора снимается характеристика при напряжении на коллекторе равном нулю, и при напряжении на коллекторе равном 10В. Для снятия характеристики при напряжении на коллекторе равном нулю нужно воспользоваться инструментом «ножницы» и удалить проводник, который идет от источника V1 к коллектору исследуемого транзистора.

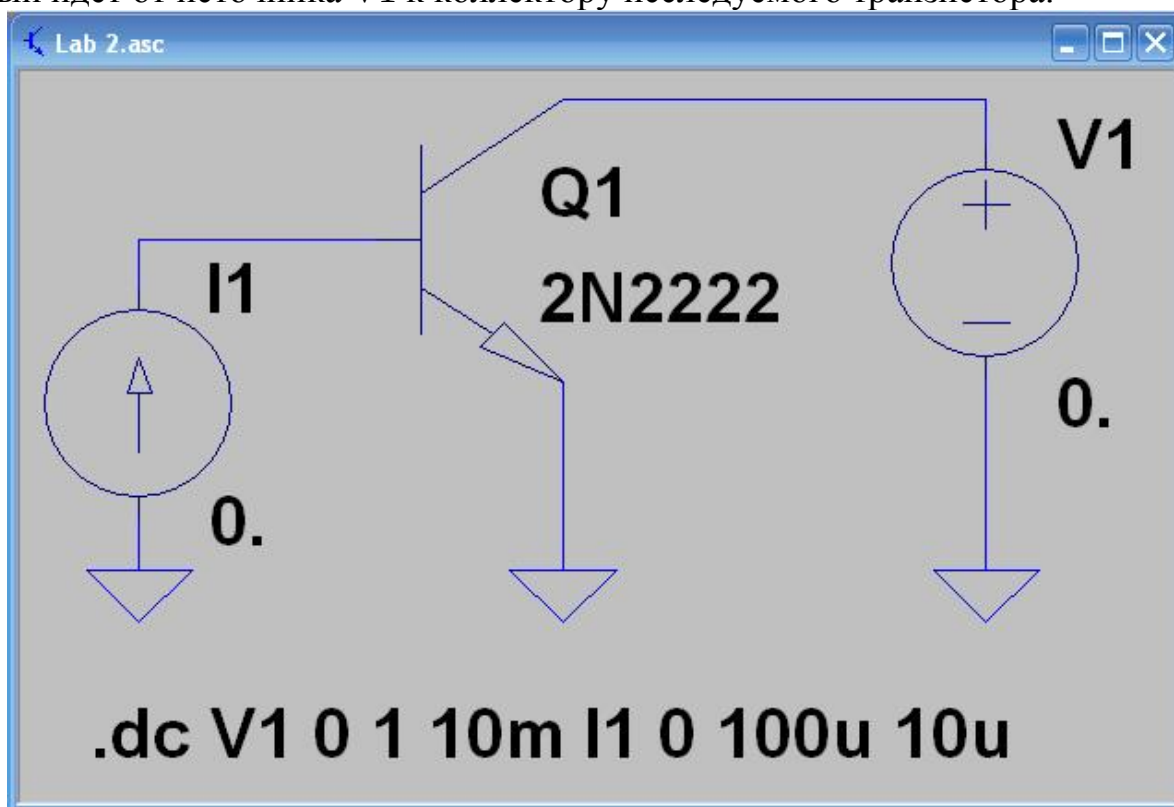
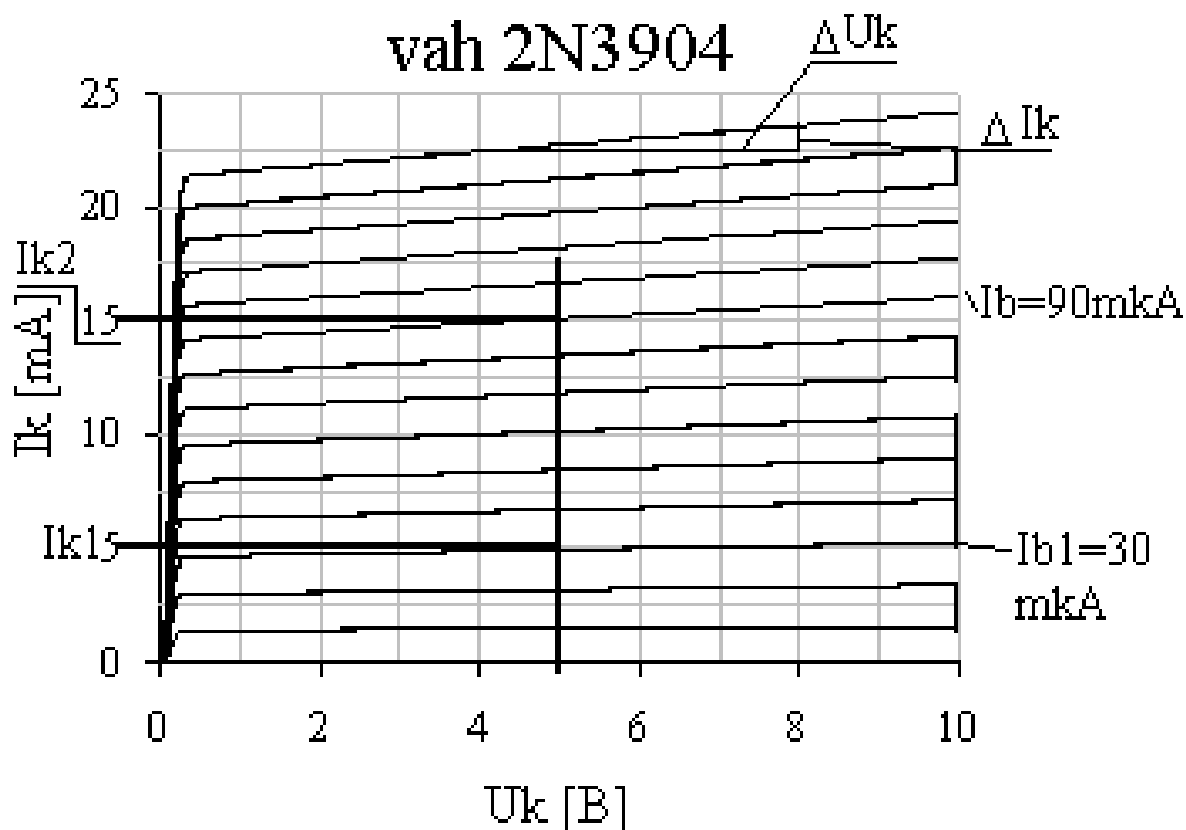


Рис. 3.12. Схема для снятия семейства выходных характеристик биполярного транзистора.

Вторая часть эксперимента состоит в снятии семейства выходных статистических характеристик для ранее выбранных типов транзисторов. Для выполнения необходимо в программе *LTSpice* собрать схему, показанную на рис 3.12. Источник напряжения V1 настраивается на изменение напряжения от 0 до 1 вольт с шагом 10мВ., источник тока I1 настраивается на изменение тока от 0 до 100u с шагом 10u.

В результате проведенных экспериментов должны получить 6 графиков входных характеристик и 3 графика выходных характеристик. После распечатки графиков проводите сравнительный анализ входных характеристик, в котором отражаете их зависимость от типа транзистора, от напряжения на коллекторе, а также определяете дифференциальное сопротивление базово-эмиттерного перехода в области рабочих точек.

На выходных характеристиках выполните построения с целью определения производных параметров: дифференциального сопротивления коллектора и коэффициента передачи базового тока в цепь коллектора.



Учитывая то, что в нормальном режиме работы транзистора базово - эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а входной сигнал обычно подается на базу транзистора, дифференциальное сопротивление этого перехода является определяющим во входном сопротивлении устройства.

Важнейшим параметром биполярного транзистора является коэффициент передачи базового тока в цепь коллектора - $\beta = h_{21э} = dI_k / dI_b$. При переходе к конечным приращениям $h_{21э} = \Delta I_k / \Delta I_b$, где в числителе приращение тока коллектора, а в знаменателе приращение тока базы. Подобная интерпретация позволяет определять этот коэффициент с помощью статических характеристик. Важную роль при определении выходного сопротивления устройства имеет дифференциальное сопротивление коллектора определяемое соотношением $r_k = dU_k / dI_k$. Возможность определения этих параметров транзистора показана на рис. 3.13.

Определение дифференциального сопротивления коллектора осуществляется с помощью прямоугольного треугольника со сторонами параллельными осям координат, достроенного к касательной проведенной к характеристике в рабочей точке. Для примера этот треугольник достроен к верхней линии семейства характеристик в точке $U_k = 3,5V$, $I_k = 22,5mA$, при этом имеем $\Delta U_k = 3,5V$, $\Delta I_k = 1,25mA$ и $r_k = 2,8 \text{ кОм}$. Определение β состоит в

последовательности действий: - в линейной части характеристики (в примере $U_k = 4В$) проводим вертикальную линию, - каждая линия семейства строится при известном токе базы (в примере $I_{b1} = 30 \text{ мкА}$ и $I_{b2} = 90 \text{ мкА}$) и для каждой линии определяем токи коллектора $I_{k1} = 5 \text{ мА}$, $I_{k2} = 15 \text{ мА}$, - при этом получаем $\Delta I_b = 60 \text{ мкА}$, $\Delta I_k = 10 \text{ мА}$. После подстановки получаем $\beta = 167$. Такие построения и расчеты нужно выполнить для всех исследуемых транзисторов.

Программа лабораторной работы:

1. В программах *Proteus* и *LTSpice* собрать электрические схемы для снятия входной статической характеристики транзисторов. Тип транзистора соответствует варианту задания, выдаваемому преподавателем.
2. Задать значения параметров источника напряжения.
3. Провести настройку измерительной аппаратуры.
4. Провести эксперименты и описать их.
5. Используя возможности программ *Proteus* и *LTSpice* получить графики экспериментов, сделать выводы.
6. Выполнить макетирование электрических схем (номиналы элементов указывает преподаватель): 1) Схема включения транзистора с ОБ, 2) Схема включения транзистора с ОК, 3) Схема включения транзистора с ОЭ.
7. Оформить отчет.

Экспериментально-расчетное задание № 3.1

«Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общей базой»

Цель экспериментально-расчетного задания

Ознакомиться с физическими свойствами работы биполярного транзистора, исследовать характеристики и параметры транзистора в схеме включения с общей базой и изучить влияние температуры окружающей среды на ход характеристик.

1. Записать паспортные параметры исследуемого транзистора и зарисовать схему расположения его выводов.
2. Рассчитать и построить кривую допустимой мощности, рассеиваемой транзистором.
3. Собрать схему для исследования транзистора в схеме включения с ОБ (рис. 3.14). Прибор (мА) источника входного напряжения измеряет ток эмиттера (I_E), а вольтметр (V) служит для измерения входного напряжения транзистора ($U_{ЭБ}$). В выходной цепи прибор (мА) измеряет ток коллектора (I_K), а вольтметр V – напряжение между коллектором и базой ($U_{КБ}$). Для повышения точности измерения входного напряжения во входную цепь целесообразно включить цифровой вольтметр (V1), а выходную цепь цифровой миллиамперметр.

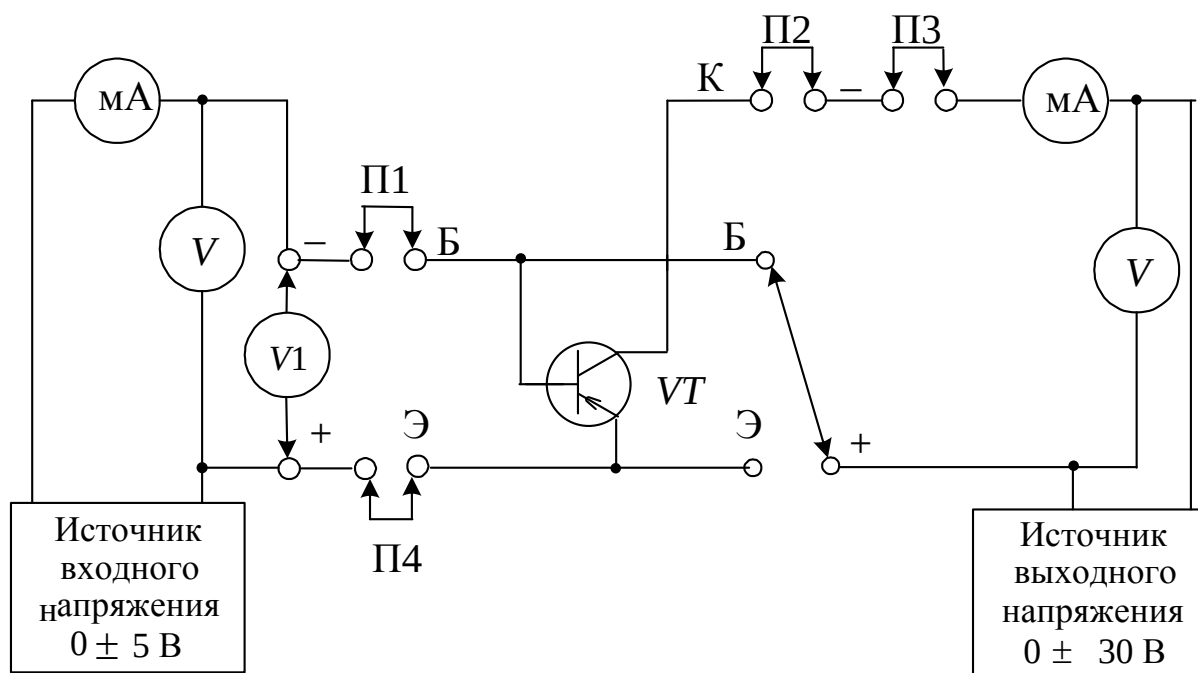


Рис. 3.14. Схема эксперимента

4. Снять семейство входных характеристик $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \big|_{U_{\text{КБ}} = \text{const}}$ для трех значений напряжения на коллекторе $U_{\text{КБ}} = 0, -2 \text{ В}, -10 \text{ В}$ при комнатной температуре. При снятии входных характеристик задаваться током эмиттера и отмечать напряжение на эмиттере. Для удовлетворительного воспроизведения хода характеристик необходимо измерить не менее 7–9 точек, причем их максимальное число должно приходиться на самый нелинейный участок характеристики (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Экспериментальные входные характеристики схемы

	$I_{\text{Э}}, \text{ мА}$									
	0	0,1	0,3	0,5	1	2	4	6	8	10
$U_{\text{ЭБ}}, \text{ В}$ $T_1 = \text{ } ^\circ\text{С}$										
$U_{\text{ЭБ}}, \text{ В}$ $T_2 = \text{ } ^\circ\text{С}$										

5. Снять семейство выходных характеристик $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}}) \big|_{I_{\text{Э}} = \text{const}}$ для четырех значений тока эмиттера $I_{\text{Э}} = 0, 4, 6, 8 \text{ мА}$ при комнатной температуре. Выходные характеристики биполярного транзистора исследуются лишь в активном режиме его работы. При экспериментальных исследованиях необходимо поддерживать ток эмиттера постоянным и не допускать превышения максимально-допустимых значений тока коллектора $I_{\text{К МАКС}}$, напряжения коллектор-

эмиттер $U_{КЭ}$ доп и мощности $P_{К \text{ макс}}$. При этом следует использовать построенную ранее в п. 2 зависимость допустимой мощности $P_{К \text{ макс}}$, рассеиваемой коллектором биполярного транзистора. Чтобы снять выходную характеристику при токе $I_Э = 0$, разомкнуть перемычку П4.

При снятии характеристик при $I_Э > 0$ в рабочем режиме ($U_{КБ} \geq |2| \text{ В}$) вместо перемычек П2 и П4 поставить цифровые приборы в режиме измерения тока.

6. Исследуемый транзистор нагреть до температуры 50°C . Через 5 минут повторить пункты 4, 5.

Обработка результатов эксперимента

1. По построенным характеристикам транзистора, снятых при комнатной температуре, определить H_6 -параметры. При определении H_6 -параметров режимы работы на входных и выходных характеристиках выбирать приблизительно одинаковыми. Расчет H -параметров проводить с использованием соотношений (3.1)-(3.4).

$$H_{11Б} = \left. \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_Э} \right|_{U_{КБ} = \text{const}} = \left. \frac{U_{ЭБ2} - U_{ЭБ1}}{I_{Э2} - I_{Э1}} \right|_{U_{КБ2}} , \quad (3.1)$$

$$H_{12Б} = \left. \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta U_{КБ}} \right|_{I_Э = \text{const}} = \left. \frac{U_{ЭБ2} - U_{ЭБ1}}{U_{КБ2} - U_{КБ1}} \right|_{I_{Э1}} , \quad (3.2)$$

$$H_{21Б} = \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Э} \right|_{U_{КБ} = \text{const}} = \left. \frac{I_{К3} - I_{К2}}{I_{Э2} - I_{Э1}} \right|_{U_{КБ2}} , \quad (3.3)$$

$$H_{22Б} = \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КБ}} \right|_{I_Э = \text{const}} = \left. \frac{I_{К2} - I_{К1}}{U_{КБ2} - U_{КБ1}} \right|_{I_{Э1}} . \quad (3.4)$$

2. По вычисленным H_6 -параметрам подсчитать параметры Т-образной эквивалентной схемы (рис. 3.15) по формулам (3.5)–(3.10).

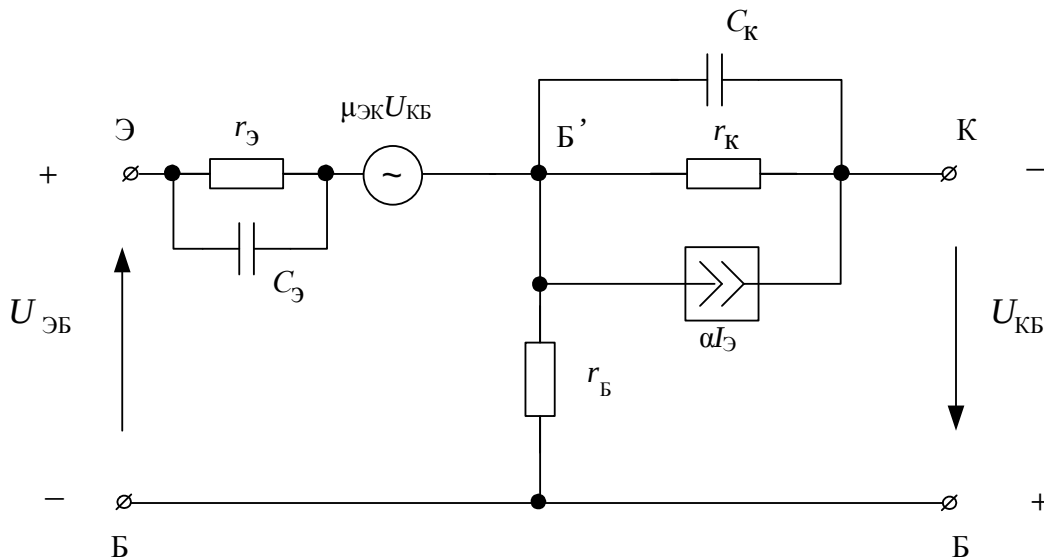


Рис. 3.15. Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора в схеме включения с общей базой на высоких частотах

На рис. 3.15 введен генератор напряжения $\mu_{ЭК}U_{КБ}$, который отражает наличие внутренней обратной связи в транзисторе. Величина $\mu_{ЭК}$ является коэффициентом обратной связи по напряжению и в соответствии с эффектом модуляции толщины базы находится из выражения

$$\mu_{ЭК} = \left. \frac{dU_{ЭК}}{dU_{КБ}} \right|_{I_Э = \text{const}} \cong (10^{-3} - 10^{-4}).$$

Остальные элементы рис. 53 были определены ранее.

Параметры Т-образной эквивалентной схемы биполярного транзистора в схеме включения с общей базой связаны с соответствующими H -параметрами следующими соотношениями:

$$\alpha = -H_{21Б} ; \quad (3.5)$$

$$\mu = -H_{12Б} ; \quad (3.6)$$

$$r_k = \frac{1}{H_{22Б}} ; \quad (3.7)$$

$$r_Б = \frac{H_{12Б}}{H_{22Б}} ; \quad (3.8)$$

$$r_Э = H_{11Б} - (1 - |H_{21Б}|) \frac{H_{12Б}}{H_{22Б}} ; \quad (3.9)$$

$$S = \frac{H_{21Б}}{H_{11Б}} . \quad (3.10)$$

3. Справочные и расчетные значения параметров свести в табл. 3.2.

4. Используя входную характеристику по данным эксперимента при $U_{КБ} = -10$ В и комнатной температуре, рассчитать и построить график зависимости $H_{11Б} = f(I_Э)$.

Таблица 3.2

Расчетные характеристики параметров

	Параметры									
	$h_{11Б}$	$h_{12Б}$	$h_{21Б}$	$h_{22Б}$	$r_Э$	$r_Б$	r_k	α	μ	S
Размерность										
Паспортные значения										
Расчетные значения										

Содержание отчета по экспериментально-расчетному заданию

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования.
2. Схему лабораторной установки для исследования транзистора.
3. Таблицы результатов измерений.
4. Графики семейства входных характеристик при комнатной и повышенной температурах.

5. Графики семейства выходных характеристик при комнатной и повышенной температурах. На выходных характеристиках построить кривую допустимой мощности рассеяния исследованного транзистора.
6. На графиках входных и выходных характеристик транзистора, полученных при комнатной температуре показать области определения H_6 -параметров.
7. График зависимости $H_{11б} = f(I_э)$ при $U_{КБ} = -10$ В.
8. Таблицу со справочными и расчетными параметрами.
9. Анализ полученных результатов.

Экспериментально-расчетное задание № 3.2

«Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером»

Цель работы

Исследовать характеристики и параметры биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером и изучить влияние температуры окружающей среды на ход характеристик и изменение параметров.

1. Записать паспортные параметры исследуемого транзистора и зарисовать схему расположения его выводов.

2. Рассчитать и построить кривую допустимой мощности, рассеиваемой транзистором.

3. Собрать схему для исследования транзистора в схеме включения с ОЭ (рис. 3.16).

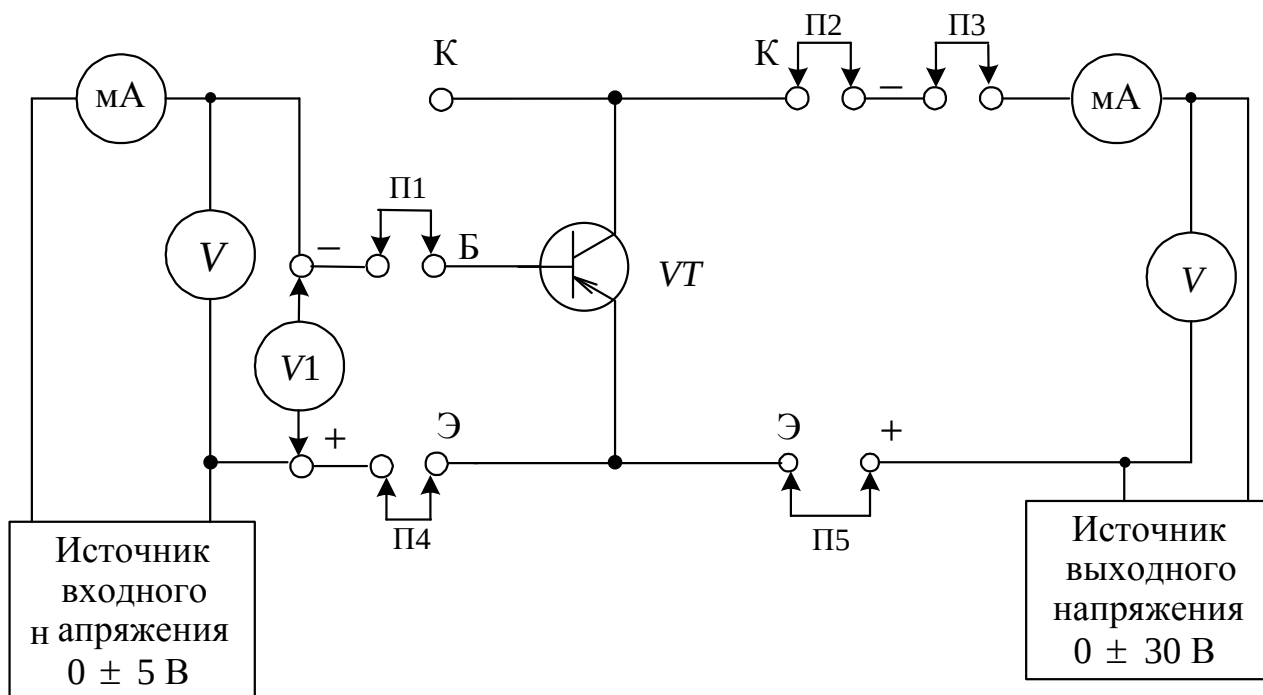


Рис. 3.16. Схема эксперимента

Прибор (мА) источник входного напряжения измеряет ток базы (I_B), а вольтметр (V) служит для измерения входного напряжения транзистора ($U_{БЭ}$). В выходной цепи прибор (мА) измеряет ток коллектора (I_K), а вольтметр V – напряжение между коллектором и эмиттером ($U_{КЭ}$). Для повышения точности измерения входного напряжения $U_{КЭ}$ во входную цепь целесообразно включить цифровой вольтметр (V1).

4. Снять семейство входных характеристик $I_B = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ при комнатной температуре для двух значений напряжения на коллекторе: $U_{КЭ} = 0$, -5 В.

При снятии входных характеристик задаваться током базы от 0 до 100 мкА и при этом отмечать значения напряжения на базе.

При отрицательных значениях напряжений на коллекторе найти напряжение на базе, при котором ток станет равным нулю.

5. Снять семейство выходных характеристик $I_K = f(U_{БЭ})|_{I_B = \text{const}}$ для четырех значений тока базы: $I_B = 0, 30, 60, 90$ мкА при комнатной температуре. При снятии выходных характеристик задаваться напряжением на коллекторе и не превышать максимальных значений тока и напряжений, а также мощности, рассеиваемой на коллекторе транзистора. При снятии характеристики для $I_B = 0$, цепь базы следует разорвать, т. е. убрать перемычку П1.

6. Снять проходную характеристику транзистора $I_K = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ и входную характеристику $I_B = f(U_{БЭ})|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ при напряжении на коллекторе $U_{КЭ} = -5$ В. При снятии характеристик задаваться током базы от 0 до 100 мкА и отмечать при этом величину тока коллектора и напряжения на базе.

Результаты эксперимента свести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты эксперимента

I_B , мкА	0	2	10	20	30	40	60	80	100
I_K , мА									
$U_{БЭ}$, В									
β									
S мА/В									

7. Исследуемый транзистор нагреть до температуры 50°C , и через 5 минут повторить пункт 5 задания.

Обработка результатов эксперимента

1. По построенным характеристикам транзистора, снятым при комнатной температуре, определить $H_{Э}$ – параметры. Параметр $H_{12Э}$ принять равным 10^{-4} .

Система уравнений для H -параметров биполярного транзистора представляется в виде $\begin{cases} dU_1 = H_{11}dI_1 + H_{12}dU_2, \\ dI_2 = H_{21}dI_1 + H_{22}dU_2. \end{cases}$. А матрица H -параметров:

$$H = \begin{vmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

Для биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером входным током является ток базы ($I_1 = I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}$), выходным током – ток коллектора ($I_2 = I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}$), входным напряжением – напряжение «база – эмиттер» ($U_1 = U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}$), выходным напряжением – напряжение «коллектор – эмиттер» ($U_2 = U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$). При этом H -параметры записываются в виде (с учетом связи с H -параметрами биполярного транзистора в схеме включения с общей базой):

1) входное сопротивление – $H_{11\text{э}}$,

$$H_{11\text{э}} = \left. \frac{dU_{\text{бэ}}}{dI_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{кэ}} = \text{const}} = \frac{H_{11\text{б}}}{(1-\alpha)} = (\beta+1)H_{11\text{б}}, \quad (3.12)$$

то есть $H_{11\text{э}} \gg H_{11\text{б}}$ и составляет значения сотни Ом, единицы кОм;

2) коэффициент обратной связи по напряжению – $H_{12\text{э}}$,

$$H_{12\text{э}} = \left. \frac{dU_{\text{бэ}}}{dU_{\text{кэ}}} \right|_{I_{\text{б}} = \text{const}}, \quad (3.13)$$

$$H_{12\text{э}} \cong H_{22\text{б}} = (10^{-3} - 10^{-4});$$

3) коэффициент передачи по току – $H_{21\text{э}}$,

$$H_{21\text{э}} = \left. \frac{dI_{\text{к}}}{dI_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{к}} = \text{const}} = \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad (3.14)$$

$$H_{21\text{э}} = (20 - 200);$$

4) выходная проводимость – $H_{22\text{э}}$,

$$H_{22\text{э}} = \left. \frac{dI_{\text{к}}}{dU_{\text{кэ}}} \right|_{I_{\text{б}} = \text{const}} = \frac{H_{22\text{б}}}{1-\alpha}, \quad (3.15)$$

$$H_{22\text{э}} = (3 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}) \text{ Сим.}$$

2. По вычисленным $H_{\text{э}}$ – параметрам подсчитать параметры Т-образной эквивалентной схемы по формулам:

$$r_3 = \frac{H_{12\text{э}}}{H_{22\text{э}}}; r_6 = H_{21\text{э}} - (1 + H_{21\text{э}}) \frac{H_{12\text{э}}}{H_{22\text{э}}}; r_k = \frac{1 + H_{21\text{э}}}{H_{22\text{э}}};$$

$$\alpha = \frac{H_{21\text{э}}}{1 + H_{21\text{э}}}; \mu = \frac{H_{21\text{э}}}{1 + H_{21\text{э}}} \cdot H_{12\text{э}}; S = \frac{H_{21\text{э}}}{H_{11\text{э}}}.$$

3. Используя данные табл. 3.3, определить:

а) значение крутизны характеристики $S = \left. \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{бэ}}} \right|_{U_{\text{кэ}}}$;

б) величину коэффициента усиления по току $\beta = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}} \big|_{U_{\text{кэ}}}$ для всех значений тока базы. Вычисленные значения β и S внести в табл. 3.3;

в) построить графики зависимости $\beta = f(I_k)$ и $S = f(U_{бэ})$. Заполнить табл. 3.4.

Таблица 3.4

Расчетные значения параметров эксперимента

Параметры	$H_{11э}$	$H_{12э}$	$H_{21э}$	$H_{22э}$	$r_э$	$r_б$	r_k	α	μ	S
Размерность										
Паспортные значения										
Расчетные значения										

Содержание отчета по экспериментально-расчетному заданию

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования.
2. Схему для исследования транзистора.
3. Таблицы результатов измерений.
4. График семейства входных характеристик при комнатной температуре с указанием области определения $H_э$ – параметров.
5. График семейства выходных характеристик при комнатной и повышенной температурах. На этом графике построить кривую допустимой мощности и указать область определения $H_э$ – параметров.
6. График проходной характеристики.
7. График зависимости $\beta = f(I_k)$.
8. График зависимости $S = f(I_k)$.
9. Таблицу со справочными и расчетными параметрами.
10. Анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы.

1. Какие основные включения транзистора вам известны?
2. Как влияет напряжение на коллекторе на входную характеристику?
3. Нарисуйте и объясните зависимость α от тока эмиттера.
4. Нарисуйте семейство входных характеристик в схеме включения с ОБ. Поясните влияние $U_{кб}$ и температуры на ход характеристик.
5. Нарисуйте семейство выходных характеристик в схеме включения с ОБ и поясните их ход.
6. Что такое «ток $I_{к0}$ », каковы причины его возникновения и как он изменяется с изменением температуры?

7. На семействе выходных характеристик транзистора укажите режимы работы и дайте их определение.

Лабораторная работа №4 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

Цель работы:

Исследовать свойства полевых транзисторов, получить модельные и экспериментальные характеристики.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводы.

Теоретические пояснения к работе

В отличие от биполярных транзисторов, полевые транзисторы (ПТ) имеют токопроводящий канал, управление которым осуществляется электрическим полем. При этом полностью открытый канал имеет сопротивление 20–100 Ом, а полностью закрытый – более 10–20 МОм.

Достоинства ПТ: высокое входное сопротивление; отличные ключевые свойства; низкий уровень собственных шумов. Недостатки ПТ: чувствительность к статическому электричеству; разброс параметров в десятки раз больше, чем у биполярных транзисторов.

ПТ принято классифицировать следующим образом:

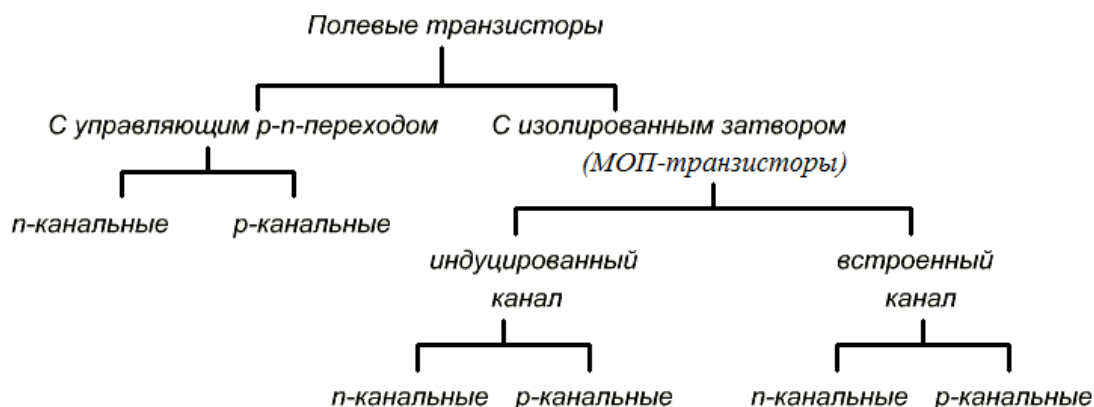


Рис. 4.1. Классификация ПТ

ПТ с управляющим p - n -переходом

Данный вид ПТ имеет токопроводящий канал с проводимостью n - или p -типа, располагающийся между электродами, называемыми «исток» (И) и «сток» (С). Затвор (З) – электрод, управляющий током канала, – соединен с областью противоположной проводимости. Управление током канала осуществляется за счет явления электростатической индукции, которая проявляется при обратном смещении p - n -перехода и приводит к его расширению и перекрытию канала. Проводимость канала двусторонняя. Это означает, что исток и сток можно менять местами. Однако, как правило, током через канал (током стока) управляют, регулируя $U_{зи}$.

Зависимость тока стока, текущего через токопроводящий канал, от напряжения затвор – исток при постоянном напряжении сток – исток: $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ – называют *стоково-затворной характеристикой*.

Для n -канального транзистора при подаче напряжения отсечки $U_{отс} = U_{зи} \approx -4$ В канал закроется, и ток через него течь не будет, а при напряжении $U_{зи} \approx 0,5$ В ток стока достигает насыщения. Для p -канального транзистора стоково-затворная характеристика имеет зеркально-симметричный вид.

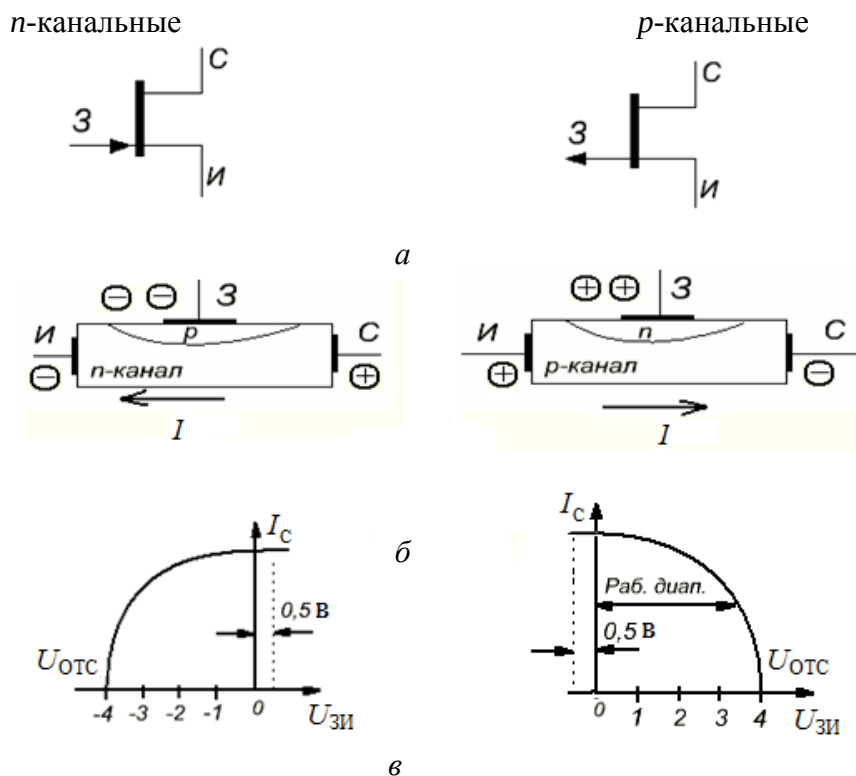


Рис. 4.2. Условное обозначение (а), структура (б) и стоково-затворные характеристики (в) ПТ с управляющим p - n -переходом

Зависимость тока стока от напряжения между стоком и истоком при постоянном напряжении затвор – исток: $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ – называют *стоковой характеристикой*. Напряжение $U_{зи}$ положительное для n -канального транзистора и отрицательное для p -канального транзистора.

Стоковая характеристика имеет участок, близкий к линейному (при $U_{си} < U_{син}$), и участок насыщения (при $U_{си} > U_{син}$).

На линейном участке, увеличивая напряжение между стоком и истоком при постоянном напряжении на затворе, добиваемся увеличения тока, текущего через канал. При дальнейшем росте U_c происходит увеличение обратного смещения p - n -перехода из-за роста напряжения $U_{сз}$ при $U_{зи} = \text{const}$. Это приводит к перекрытию канала в области стока и прекращению роста тока через него.

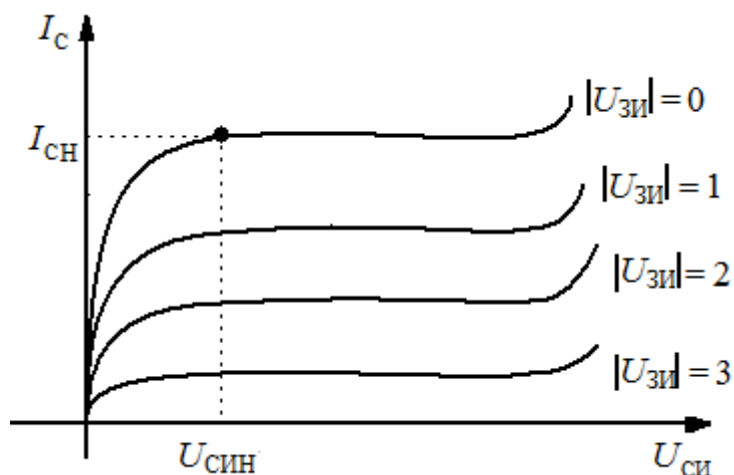


Рис. 4.3. Пример стоковой характеристики ПТ с управляющим p - n -переходом:
 $I_{сн}$ — ток стока насыщения; $U_{син}$ — напряжение сток — исток насыщения

Транзистору с управляющим p - n -переходом присущ недостаток: существует обратная проводимость p - n -перехода, создающая ток через затвор при достижении напряжения отсечки. Обратный ток в цепи затвора ухудшает ключевые свойства, входное сопротивление определяется сопротивлением обратно смещенного p - n -перехода и зависит от полярности напряжения, подаваемого на затвор.

МОП-транзистор с индуцированным каналом

Металл–окисел–полупроводник, МОП-транзистор с индуцированным каналом имеет подложку с зонами противоположной проводимости для стока и истока, перекрытыми тонким слоем диэлектрика (SiO_2), на котором установлен затвор.

Для n -канального МОП-транзистора при приложении положительного напряжения $U_{зи}$ вблизи затвора индуцируется токопроводящий канал n -типа. Образование канала можно объяснить, исходя из того, что электроны — неосновные носители заряда — из подложки «притягиваются» к положительному потенциалу затвора, образуя область проводимости n -типа.

Для p -канального МОП-транзистора канал p -типа индуцируется при подаче на электроды напряжений противоположных полярностей по отношению к транзистору n -типа.

Подложка транзистора обычно соединена с истоком или, если предусмотрен ее отдельный вывод, может подключаться к источнику напряжения ниже (выше), чем напряжение истока n -канального (p -канального) транзистора. При подаче такого дополнительного напряжения на подложку относительно истока она начинает действовать как дополнительный затвор, уменьшающий ток стока.

Стоковые характеристики МОП-транзисторов с индуцированным каналом аналогичны стоковым характеристикам ПТ с управляющим p - n -переходом.

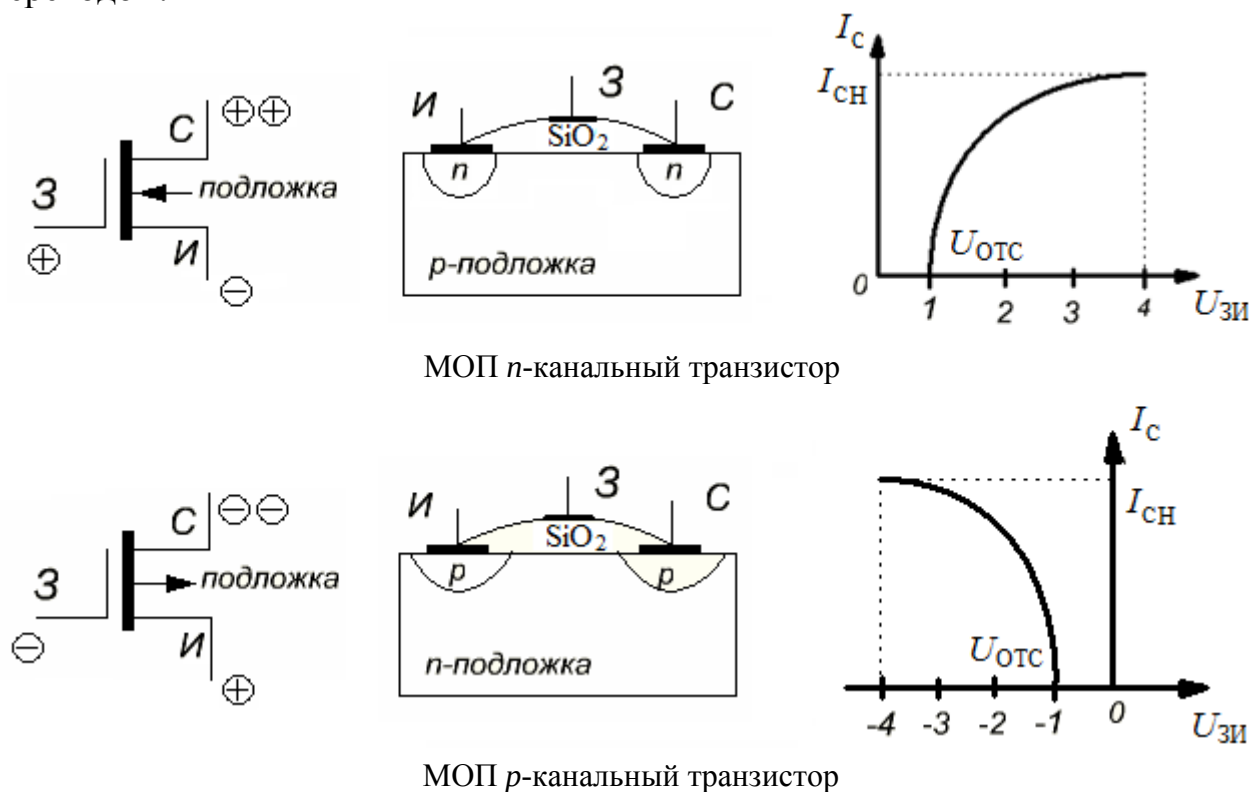


Рис. 4.4. МОП-транзисторы: условное обозначение, структура и стоково-затворные характеристики

Основным достоинством МОП-транзисторов является их высокое входное сопротивление (ток через изолированный затвор практически не течет).

Общим недостатком МОП-транзисторов является их чувствительность к статическому электричеству (выходят из строя при напряжении $U_{зи} > 20$ В).

Недостаток МОП-транзисторов с индуцированным каналом заключается в необходимости работы с напряжением одной определенной полярности.

МОП-транзисторы со встроенным каналом

МОП-транзистор со встроенным каналом отличается от МОП-транзистора с индуцированным каналом лишь тем, что зоны истока и стока соединены токопроводящим каналом, содержащим некоторое количество основных носителей, соответствующих этим зонам. Наиболее часто

встречаются транзисторы со встроенным каналом n -типа. В МОП-транзисторе со встроенным каналом на затвор может подаваться напряжение обеих полярностей. При подаче положительного напряжения электроны «втягиваются» в n -канал, тем самым обогащая его основными носителями заряда (режим обогащения). При подаче отрицательного напряжения электроны из канала «выталкиваются» в подложку, тем самым канал будет обедняться основными носителями заряда (режим обеднения).



Рис. 4.5. Структура МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Стоково-затворные характеристики такого транзистора смещены по горизонтальной оси и располагаются в районе нулевых значений $U_{зи}$.

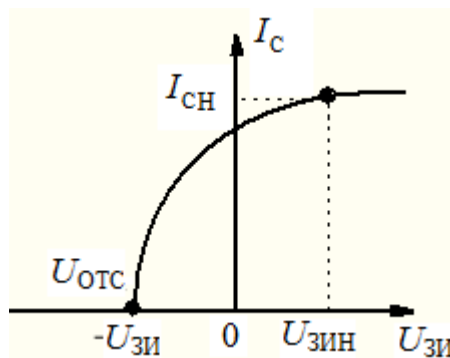


Рис. 4.6. Стоково-затворная характеристика МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа ($U_{зин}$ — напряжение затвор – исток насыщения)

Стоковые характеристики отличаются только наличием значений $\pm U_{зи}$.

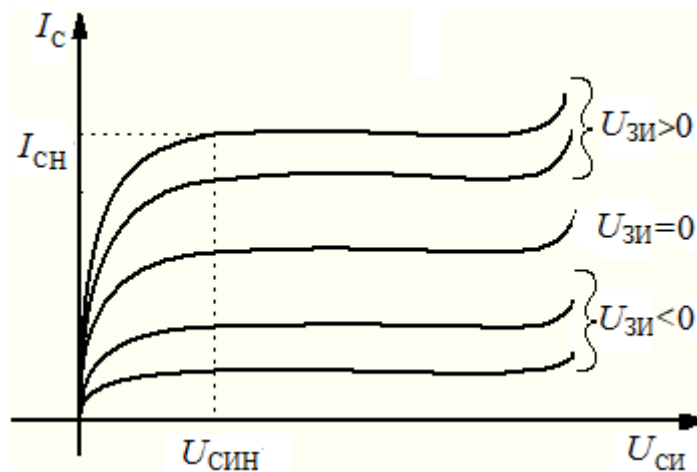


Рис. 4.7. Стоковая характеристика МОП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Статические дифференциальные параметры полевых транзисторов

1. Крутизна стоково-затворной характеристики – это отношение приращения тока стока к приращению напряжения затвор – исток при постоянном напряжении сток – исток: $S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}}$ при $U_{СИ} = \text{const}$.

2. Внутреннее дифференциальное сопротивление – это отношение приращения напряжения сток – исток к приращению тока стока при постоянном напряжении затвор – исток: $R = \frac{dU_{СИ}}{dI_C}$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$.

3. Коэффициент усиления по напряжению – это отношение приращения напряжения сток – исток к приращению напряжения затвор – исток при постоянном токе стока: $\mu = -\frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}}$ при $I_C = \text{const}$.

В справочных данных часто указывается разность между напряжением $U_{ЗИ}$ и напряжением отсечки $U_{ОТС}$. Поэтому ток стока принято определять выражением $I_C = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} - U_{ОТС} = \text{const}$. В результате на стоковых характеристиках принято выделять линейный участок, на котором $I_C \sim (U_{ЗИ} - U_{ОТС})$, и участок насыщения, на котором $I_C \sim (U_{ЗИ} - U_{ОТС})^2$.



Рис. 4.8. Участки стоковой характеристики МОП-транзистора

Более точно линейный участок стоковой характеристики характеризуется выражением $I_C = 2k[(U_{зи} - U_{отс}) \cdot U_{си} - 0,5U_{си}^2]$, а участок насыщения – выражением $I_C = k[(U_{зи} - U_{отс})^2]$, где $k \sim \frac{1}{\sqrt[3]{T^2}}$ – некоторый коэффициент, зависящий от температуры.

Для насыщения ПТ требуется достаточно большое значение $U_{си}$, при котором получают максимальный I_C при данной величине $U_{зи}$. Именно этот участок стоковой характеристики используется в источниках тока и усилителях на ПТ.

Пример выполнения эксперимента лабораторной работы

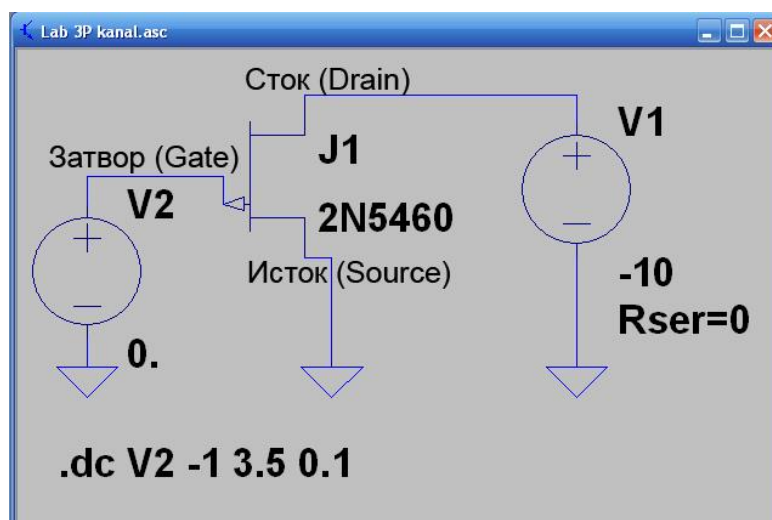


Рис. 4.9. Схема для снятия переходной характеристики полевого р-канального транзистора.

Для снятия переходной статической характеристики полевого п-канального транзистора на рабочем столе *LTSpice* нужно собрать схему, показанную на рис 4.9. Источник напряжения V2 настраивается так, чтобы он

генерировал напряжение от -1 до 3,5в с шагом 0,1в. Источник V1 настраиваем на постоянное напряжение -10 вольт. Для снятия переходной статической характеристики полевого р-канального транзистора на рабочем столе *LTSpice* нужно собрать схему, показанную на рис 4.10.

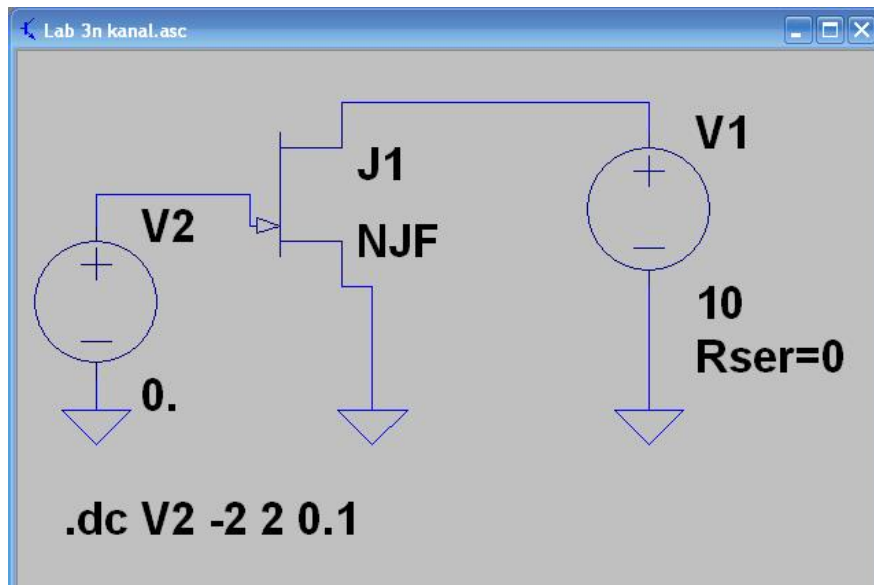


Рис. 4.10. Схема для снятия переходной характеристики полевого п-канального транзистора.

Источник напряжения V2 настраивается так, чтобы он генерировал напряжение от -2 до 2в, с шагом 0,1в. Источник V1 настраиваем на постоянные 10 вольт.

Вторая часть работы состоит в снятии семейства выходных статистических характеристик полевых транзисторов. Для ранее выбранных п-канальных транзисторов, необходимо собрать схему, показанную на рисунке 4.11.

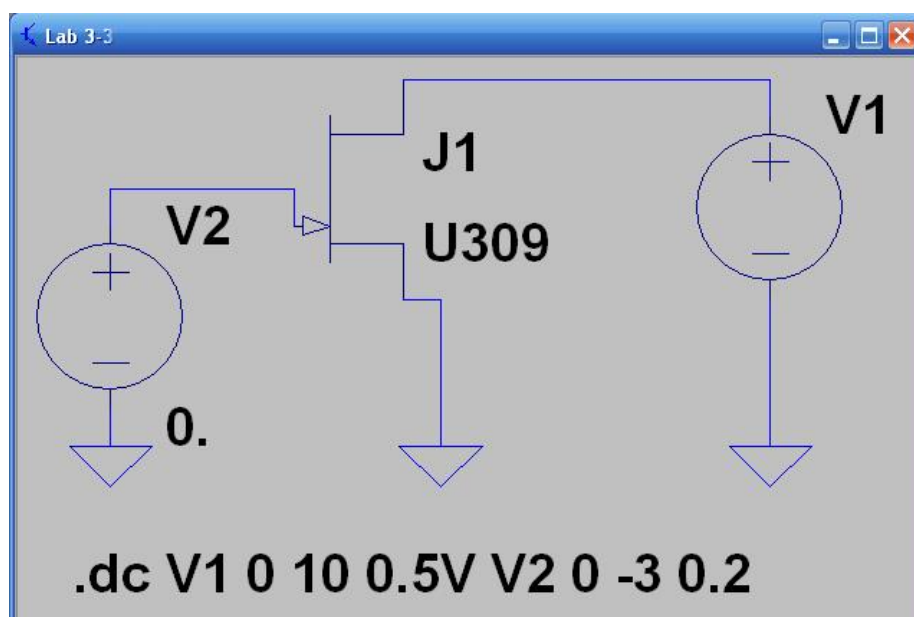


Рис. 4.11. Схема для снятия выходных характеристик полевого п-канального транзистора.

Источник напряжения V1 настраивается так, чтобы он генерировал напряжение от 0 до 10в, с шагом 0,5в. Источник V2 настраиваем так, чтобы он генерировал напряжение от 0 до -3в, с шагом 0,2вольта.

Для снятия семейства выходных статистических характеристик р-канальных полевых транзисторов, собираем схему, показанную на рис. 4.12.

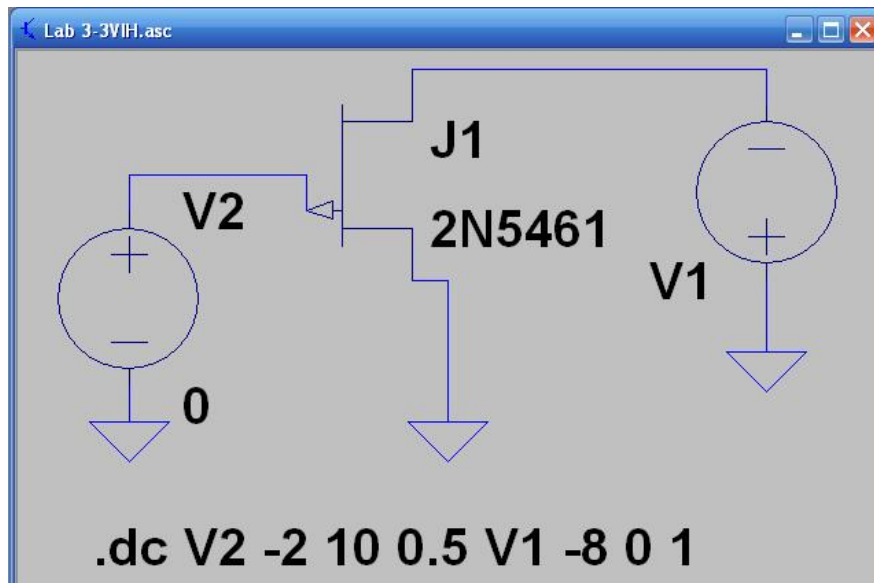


Рис. 4.12. Схема для снятия выходных характеристик полевого р-канального транзистора.

Источник напряжения V1 настраивается так, чтобы он генерировал напряжение от -8 до 0в, с шагом 1в. Источник V2 настраиваем так, чтобы он генерировал напряжение от -2 до 10в, с шагом 0,5 вольта.

В результате моделирования на экране получается семейство статических выходных характеристик для выбранного транзистора.

После получения графиков проведите сравнительный анализ переходных и выходных характеристик. На характеристиках проводите построения с целью определения производных параметров: крутизны передаточной характеристики, начального сопротивления канала, дифференциального сопротивления канала.

Переходная характеристика $I_c = f(U_{зи})$ имеет очень незначительную зависимость от напряжения на стоке, и поэтому она снимается при одном напряжении на стоке.

Выходная характеристика $I_c = f(U_{си})$ существенно зависит от напряжения на затворе, и поэтому выходная характеристика представляет семейство указанной зависимости при различных напряжениях на затворе. Источник напряжения на затворе генерирует ступенчатое изменение напряжения начиная с заданного. Поэтому верхняя для n - канальных кривая семейства получена при $U_{зи} = 0В$.

А нижняя для р - канальных кривая семейства получена при $U_{зи} = -2В$.

Если на рабочем участке переходной характеристики, к какой - либо точке кривой провести касательную, к которой достроить прямоугольный треугольник, стороны которого составят ΔI_c и $\Delta U_{зи}$, получаем $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$ -- крутизна переходной характеристики.

Начальное сопротивление канала определяется выражением $R_{каннач} = dU_{си}/dI_c$ при $U_{си} = 0$. Это выражение показывает, что этот параметр может быть найден как отношение $\Delta U_{си}/\Delta I_c$, где приращения переменных величины сторон прямоугольного треугольника, построенного к касательной проведенной в начале координат выходной статической характеристики к кривой полученной при $U_{зи} = 0$.

Программа лабораторной работы:

1. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать электрические схемы для снятия переходной статической характеристики транзисторов, выбрать транзистор, согласно своему варианту, указываемому преподавателем.
2. Задать значения параметров источника напряжения.
3. Провести настройку измерительной аппаратуры.
4. Провести эксперименты и описать их.
5. Используя возможности программ *LTSpice* и *Proteus* получить графики экспериментов, сделать выводы.
6. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать схемы для снятия выходной статической характеристики транзистора и повторить пункты 2 - 3 для ранее выбранных транзисторов.
7. Оформить отчет.

Экспериментально-расчетное задание № 4.1

«Исследование характеристик и параметров полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом»

Цель экспериментально-расчетного задания

Ознакомиться с конструкцией полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом, их принципом действия, характеристиками и параметрами различных транзисторов. Исследовать влияние температуры на характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом, а также зависимость параметров от режима работы транзистора.

1. Определить по справочным данным тип канала исследуемого полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, зарисовать схему расположения его выводов и нарисовать схему экспериментального исследования, воспользовавшись примером, представленным на рис. 4.13.

2. Записать паспортные параметры исследуемого полевого транзистора, особо обратив внимание на предельно допустимые значения напряжений и токов.

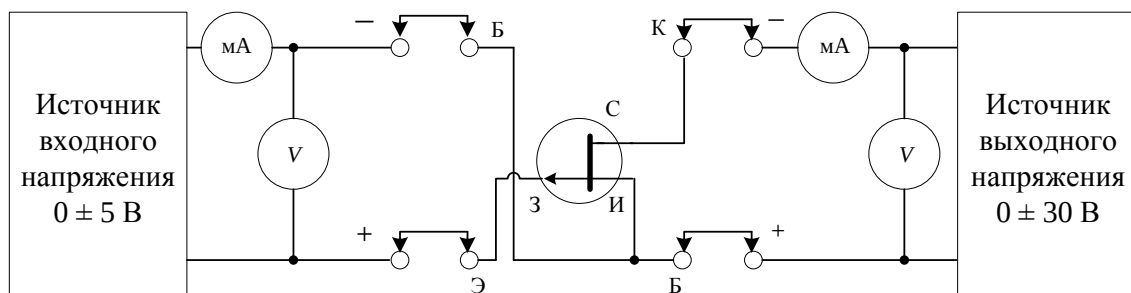


Рис. 4.13. Схема снятия характеристик полевого транзистора

3. Собрать разработанную схему для исследования полевого транзистора на лабораторном стенде, подключив все необходимые внешние измерительные приборы.

4. Снять семейство выходных характеристик $I_C = f(U_{СИ})$ при комнатной температуре для трех значений напряжения на затворе. Одно значение напряжения «затвор - исток» равно нулю, а два других значения напряжения «затвор - исток» необходимо выбрать на интервале от нуля до напряжения отсечки.

При снятии выходных характеристик необходимо задаваться напряжением на стоке от нуля до $U_{СИ} = U_{СИ.НОМ}$ и при этом отмечать значения тока стока. Результаты измерений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

$U_{ЗИ}=0$		$U_{СИ}$ В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$U_{СИ.НОМ}$ =12 В
	T= °C	I_C , мА												
	T= °C	I_C , мА												
$U_{ЗИ}=0,75$ В	T= °C	I_C , мА												
	T= °C	I_C , мА												
$U_{ЗИ}=1,5$ В	T= °C	I_C , мА												
	T= °C	I_C , мА												

5. Снять сток-затворную характеристику полевого транзистора $I_C = f(U_{ЗИ})$ при постоянном напряжении на стоке равном $U_{СИ} = U_{СИ.НОМ}$.

Для точного снятия сток-затворной характеристики необходимо сначала определить напряжения отсечки, для этого нужно выставить требуемое напряжение $U_{СИ.НОМ}$ от выходного источника, затем, плавно увеличивая напряжение $U_{ЗИ}$ от входного источника, добиться прекращения тока через транзистор ($I_C \approx 0$).

Это важно! Напряжение на затворе изменять от напряжения отсечки до нуля, причем до тока стока, равного $I_C = 500$ мкА, изменять

напряжение на затворе с шагом 0,2 В, а далее с шагом 0,5 В.

6. Исследуемый полевой транзистор нагреть до температуры +60 °C, и через 5 минут повторить пункты 4, 5.

Обработка результатов эксперимента

1. По экспериментальным данным построить графики выходных и сток-затворных характеристик.
2. По выходным характеристикам $I_C = f(U_{си})$, снятым при комнатной температуре, определить основные статические параметры S , R_i , μ на рабочем участке.
3. На сток-затворных характеристиках $I_C = f(U_{зи})$ определить термостабильную точку и термостабильную область.
4. Используя сток-затворную характеристику $I_C = f(U_{зи})$, снятую при комнатной температуре, рассчитать и построить график зависимости $S = f(U_{зи})$ при $U_{си} = U_{си.ном}$.
5. Проанализировать результаты измерения и расчетов, найдя причинное объяснение хода характеристик и полученных значений параметров.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Формулировку цели исследования.
2. Схему для исследования полевого транзистора.
3. Паспортные данные и схему расположения выводов исследуемого полевого транзистора.
4. Таблицы результатов экспериментальных измерений.
5. Расчет статических параметров исследованного полевого транзистора.
6. Семейство выходных характеристик исследованного полевого транзистора при комнатной и повышенной температурах.
7. Семейство сток-затворных характеристик исследованного полевого транзистора с обозначением термостабильной точки (области).
8. Таблицу расчетных значений и график зависимости $S = f(U_{зи})$ при напряжении стока $U_{си} = U_{си.ном}$.
9. Анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Какие структуры полевых транзисторов вам известны?
2. Что такое переходная характеристика полевого транзистора?
3. Что такое напряжение отсечки?
4. Чем отличаются n-канальные транзисторы от p-канальных?
5. Что такое омический режим работы транзисторов?
6. Какой структуры используют транзисторы в цифровых микросхемах?
7. На чем основано управление током в полевом транзисторе?
8. Объясните устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом.
9. Как зависит сопротивление канала от электропроводности полупроводника, площади и длины канала?
10. Какую роль в полевых транзисторах выполняет затвор?
11. Как влияет сечение канала на ток полевого транзистора?

12. Какой полярности напряжение должно подаваться на затвор для эффективного управления током транзистора?
13. Как зависит сечение канала от величины напряжения, приложенного к стоку?
14. Нарисуйте выходные (стоковые) характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и объясните их ход.
15. Нарисуйте сток-затворные характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и объясните их ход.
16. Как влияет температура окружающей среды на ход сток-затворных и выходных характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом?
17. Что называется напряжением отсечки?
18. Какой электрический режим полевого транзистора называется режимом насыщения?
19. Какое напряжение стока носит название напряжения насыщения?
20. Какие основные отличия полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом от биполярных транзисторов вы знаете?
21. В чем преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными?
22. Назовите основные статические параметры полевых транзисторов.
23. Поясните методы определения статических параметров полевых транзисторов.

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ И УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы:

Исследовать усилительные каскады с целью оценки их свойств и особенностей работы.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводов.

Теоретические пояснения к работе

Стабилизирующие каскады на биполярных транзисторах

Эмиттерный повторитель (ЭП)

ЭП обладает высоким входным сопротивлением $R_{ВХ}$ и малым выходным сопротивлением $R_{ВЫХ}$ и поэтому используется для согласования источника сигнала и нагрузки. Условие согласования для источников сигналов в виде напряжений – $R_{ИСТ} \ll R_{Н}$. На практике принимают $R_{ИСТ} \leq 0,1R_{Н}$. При невыполнении этого условия ставят буферный элемент, например, ЭП, у которого $R_{ВХ}$ и $R_{ВЫХ}$ обеспечивают условие $R_{ИСТ} \leq 0,1R_{ВХ}$ и $R_{ВЫХ} \leq 0,1R_{Н}$.

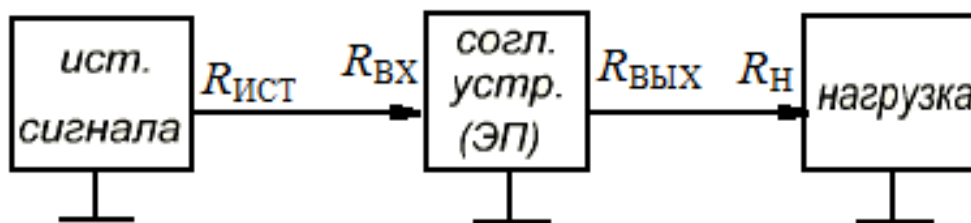


Рис. 5.1. Согласование источника сигнала и нагрузки при помощи ЭП

В ЭП коллектор транзистора непосредственно подключен к источнику питания. На базу подается напряжение смещения для задания активного режима. Выходной сигнал снимается с эмиттерного резистора. В зависимости от

полярности транзистора и источника питания возможен ряд вариантов включения.

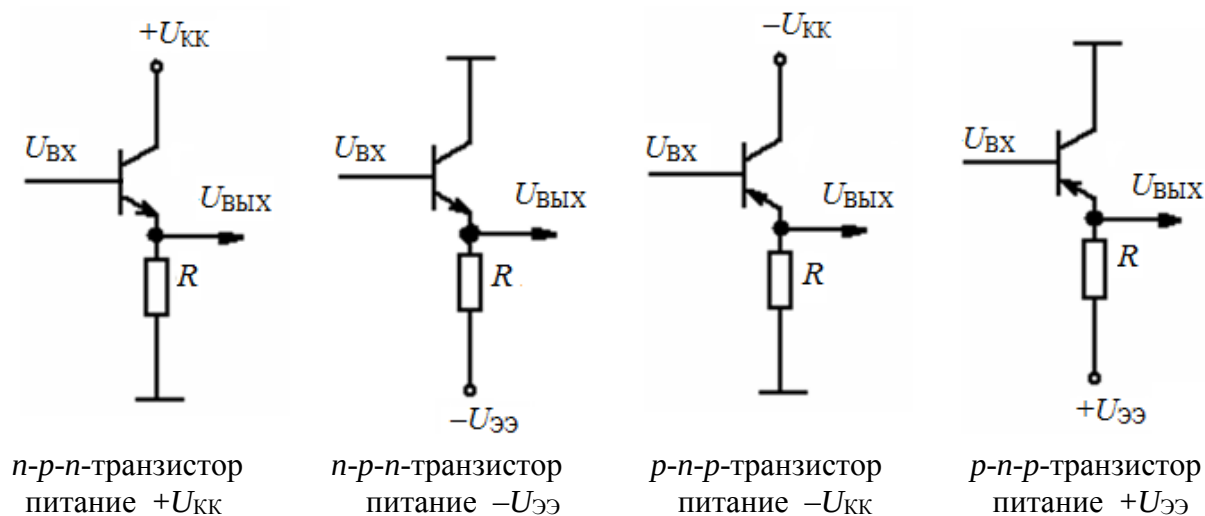


Рис. 5.2. Варианты подключения ЭП к источнику питания

Рассмотрим вариант ЭП на *n-p-n*-транзисторе и определим его R_{BX} , используя простейшую модель транзистора.

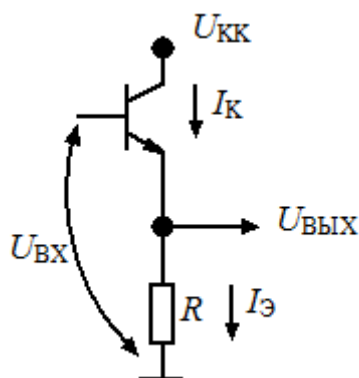


Рис. 5.3. К определению входного сопротивления ЭП

Так как транзистор – нелинейный элемент, рассматриваем малые приращения напряжений и токов, для которых можно использовать закон Ома. Пренебрегая падением напряжения на открытом эмиттерном переходе, считаем, что $\Delta U_B \approx \Delta U_{Э} = \Delta I_{Э} \cdot R$. Из простейшей модели транзистора

$I_{Э} = I_B + I_K = I_B + \beta \cdot I_B = I_B(1 + \beta)$ следует: $\Delta I_B = \frac{\Delta I_{Э}}{(1 + \beta)}$. Тогда

входное сопротивление, определяемое приращением тока базы и напряжения

базы: $R_{BX} = \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} = R \cdot (1 + \beta) \approx \beta \cdot R$.

Таким образом, входное сопротивление ЭП, соответствующее сопротивлению со стороны базы транзистора, приблизительно в β раз больше сопротивления, стоящего в эмиттере.

ЭП с двухполярным питанием

В схеме ЭП с двухполярным питанием возможно непосредственное подключение источника $U_{ВХ}$ к базе транзистора. В этом случае напряжение смещения $U_B \approx 0$ будет подаваться через внутреннее сопротивление источника сигнала $R_{ИСТ}$. При этом $R_{ИСТ} \leq 0,1\beta R$. Смещение $U_B \approx 0$ обеспечивает $U_Э = -0,6$ В, что практически соответствует условию симметричности изменения выходного сигнала в диапазоне амплитуд, ограничиваемом источниками питания.

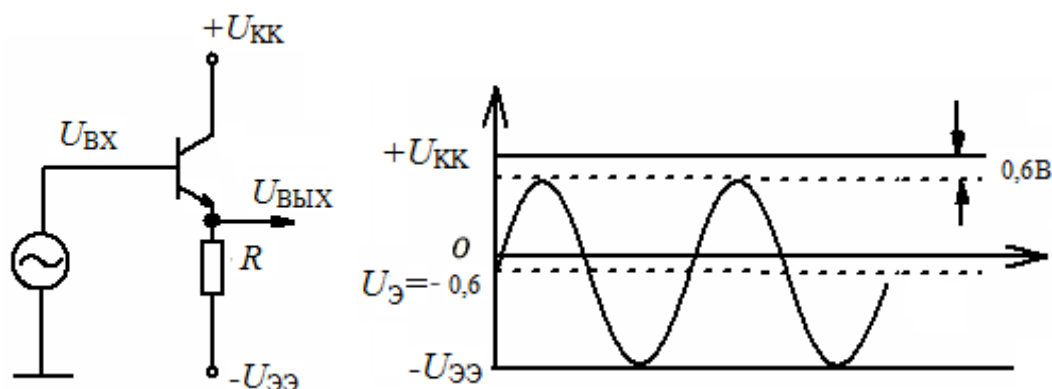


Рис. 5.4. Вариант задания смещения в ЭП с двухполярным питанием при непосредственном подключении к источнику сигнала

Если между каскадами требуется обеспечить развязку по постоянному току при помощи конденсатора, то необходимо предусмотреть задание $U_B \approx 0$ резистором, соединенным с корпусом, и выполнить условие согласования $R_B \leq 0,1\beta R$. В свою очередь, должно обеспечиваться условие $R_{ИСТ} \leq 0,1R_B$.

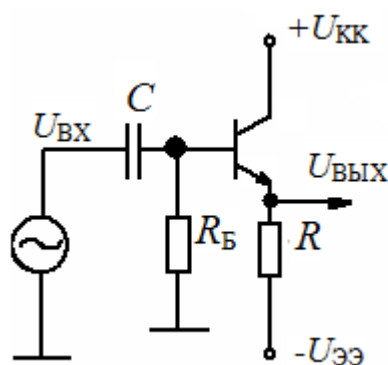


Рис. 5.5. Вариант задания смещения в ЭП с двухполярным питанием при развязке по постоянному току между каскадами

ЭП с однополярным питанием

Рассмотрим схему на рис. 5.6. В ней предпринята попытка задать смещение резистором R_B , который образует делитель со входным сопротивлением транзистора $R'_B = \beta \cdot R_Э = 750 \text{ кОм}$ при $\beta = 100$.

На первый взгляд условие симметричности выполнено, однако смещение не будет стабильным, так как β зависит от различных условий, например от температуры. Так, при изменении β в два раза $U_B = 10 \text{ В}$, что может привести к ограничению входного сигнала сверху.

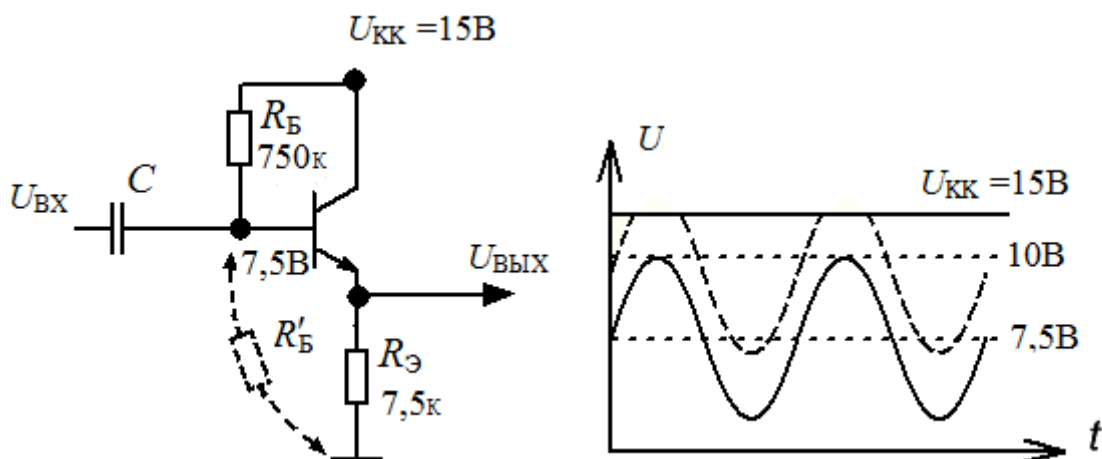


Рис. 5.6. Пример неправильного задания смещения в ЭП с однополярным питанием, приводящего к ограничению сигнала при изменении β

Для постоянного смещения используют делитель напряжения. Точное выполнение условия симметричности обеспечивается при $U_Э = 0,5U_{КК}$, что определяет необходимое смещение $U_B = U_Э + 0,6 \text{ В}$, задаваемое делителем $R_1 < R_2$, эквивалентное сопротивление которого $R_{ЭКВ} = R_1 \parallel R_2$. В схеме необходимо обеспечить условия согласования $R_{ИСТ} \ll R_{ЭКВ} \ll R_B$, что для практической реализации составляет $R_{ИСТ} \leq 0,1R_{ЭКВ} \leq 0,1R_B \approx 0,1\beta R_Э$.

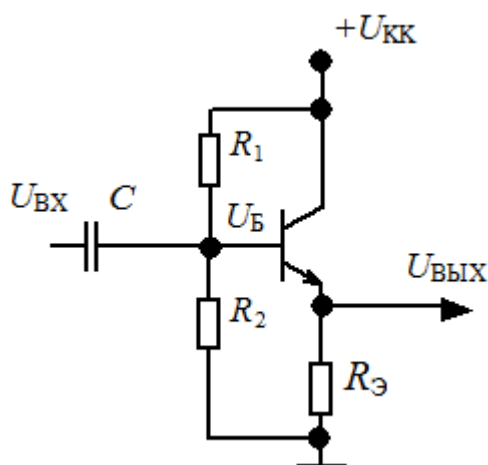


Рис. 5.7. Пример задания стабильного смещения в ЭП при помощи делителя

Пример выполнения эксперимента лабораторной работы

При выполнении данной работы требуется выполнение нескольких экспериментов:

1. Экспериментально проверить соотношения, определяющие коэффициент усиления каскада.
2. Экспериментально оценить влияние, как наличия, так и величины конденсатора, шунтирующего сопротивление в цепи эмиттера.

Для проведения экспериментов на рабочем столе нужно собрать схему, показанную на рис. 5.8. Настройка источника сигнала необходимой формы:

Тип сигнала: синусоидальный; DC offset[V] – смещение по постоянному току: 0; Amplitude[V] – амплитуда: 0,22 вольта; Freq[Hz] – частота: 100 Гц.

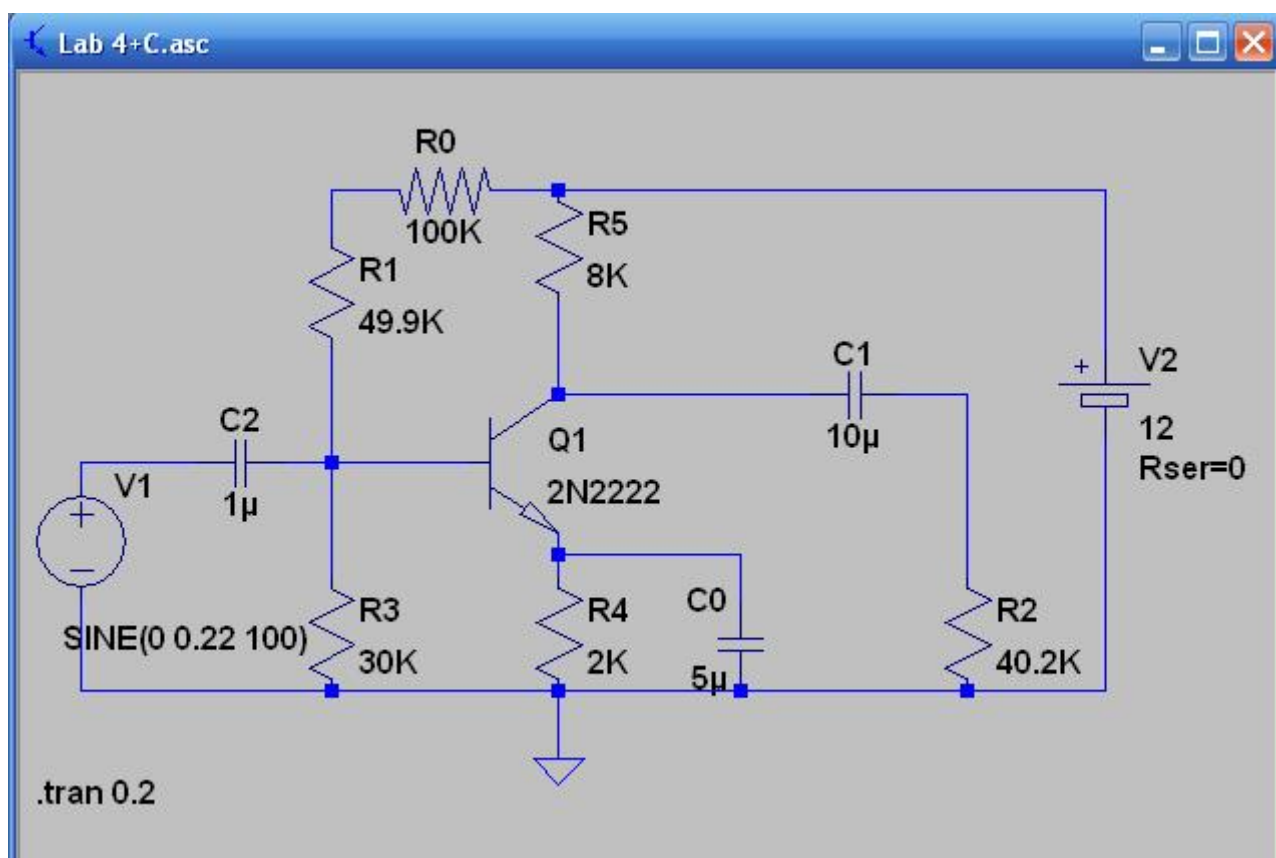


Рис. 5.8. Схема усилительного каскада

Схема, представленная на рисунке — это усилительный каскад на биполярном транзисторе с отрицательной обратной связью по току. Задание начальной рабочей точки транзистора осуществляется делителем напряжения, выполненном на резисторах R0, R1 и R3, причем изменение значение резистора R0 позволяет изменять (настраивать) начальную рабочую точку.

Резистор R5 — резистор в цепи коллектора, R4 — резистор в цепи эмиттера, R2 — резистор нагрузки. Конденсаторы C1 и C2 разделительные предназначенные для отделения источника сигнала и нагрузки от усилительного каскада по постоянному току. Если этого разделения не

выполнять, то выходное сопротивление источника сигнала и сопротивление нагрузки изменяют режим работы каскада по постоянному току.

Конденсатор C0 шунтирует сопротивление R4 в цепи эмиттера, что позволяет увеличить усиление каскада в определенном частотном диапазоне.

Для получения сигнала с малыми искажениями необходимо транзистору задать начальную рабочую точку, т.е. задать начальное напряжение на коллекторе. Начальное в данном случае означает напряжение на электроде транзистора при условии, что на вход каскада не подается сигнал. Поэтому при выполнении установки начальной точки входной сигнал от источника напряжения должен отсутствовать. Для этого отсоедините от схемы источник V1, запустите моделирование и, измеряя напряжение на коллекторе транзистора, изменением резистора R0, добейтесь минимальных показаний вольтметра. Если показания вольтметра будут мало отличаться от величины $U_{п}/2$, то можно считать, что начальная рабочая точка установлена. Если же показания вольтметра будут существенно отличаться от указанного значения, изменяя величину резистора R0, установите требуемое значение.

При проведении первого эксперимента необходимо убедиться, что $K_u = R_k/R_э$. Для этого уберите из схемы C0 и настройте источник напряжения, кликнув на нем правой кнопкой: Тип сигнала: синусоидальный; DC offset[V] – смещение по постоянному току: 0; Amplitude[V] – амплитуда: 1,3 вольта; Freq[Hz] – частота: 100 Гц.

Примеры результатов моделирования приведены на рис. 5.9.

По полученным экспериментальным данным необходимо оценить реальный коэффициент усиления и сравнить с теоретическим.

Далее в цепи коллектора изменить величину резистора и повторить этот же эксперимент.

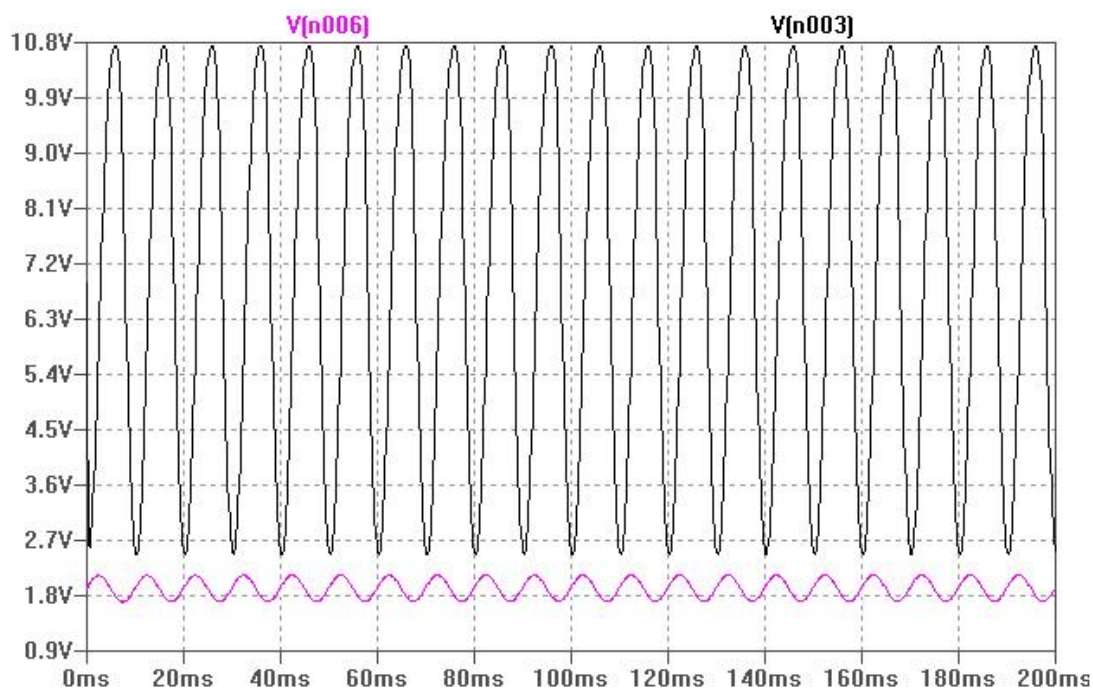


Рис. 5.9. Графики входного и выходного сигналов

Продолжение этого эксперимента состоит в том, что параллельно резистору в цепи эмиттера установить конденсатор, и повторить эксперимент (нужно устанавливать два различных по величине конденсатора, сначала $C_0 = 100\text{нФ}$ затем $C_0 = 10\text{мкФ}$). Последний эксперимент провести при величине резистора в цепи эмиттера равной нулю. При этом придется изменить установку начальной рабочей точки. Все эксперименты должны быть документированы, и необходимо провести сравнительный анализ. В анализе указать как зависит коэффициент усиления от величин резисторов, как влияет конденсатор C_0 на коэффициент усиления.

График входного и выходного сигналов позволяет определить коэффициент усиления, если в качестве приращений указанных напряжений использовать их амплитуды. $K_u = \Delta U_{\text{out}} / \Delta U_{\text{in}}$.

Программа лабораторной работы:

1. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать электрическую схему усилительного каскада, установить величины всех резисторов, выбрать тип транзистора.
2. Установить начальную рабочую точку транзистора.
3. Задать значения параметров источника напряжения.
4. Провести настройку измерительной аппаратуры.
5. Провести эксперименты и описать их.
6. Используя возможности пакета получить графики экспериментов, сделать выводы.
7. Оформить отчет.

Экспериментально-расчетное задание № 5.1 «Расчет схемы эмиттерного повторителя»

Цель экспериментально-расчетного задания

Освоение методики расчета простого однокаскадного эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе.

Рассмотрим схему эмиттерного повторителя на рис. 5.10. Пусть $U_{\text{КК}} = 15\text{В}$, $I_{\text{ОК}} = 1\text{мА}$ – ток покоя транзистора. Диапазон рабочих частот $\Delta f = 20\text{Гц} - 20\text{кГц}$.

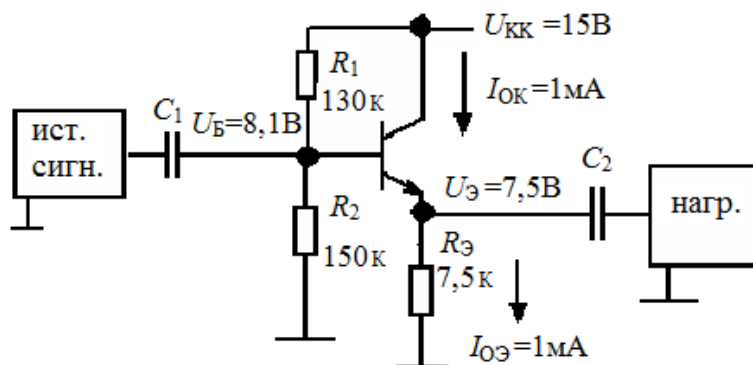


Рис. 5.10. К расчету эмиттерного повторителя

1. Определяем напряжение покоя в эмиттере, исходя из того, что сигнал на выходе должен быть симметричным: $U_{\text{Э}} = 0,5U_{\text{КК}} = 7,5 \text{ В}$.

2. Определяем напряжение смещения: $U_{\text{Б}} = U_{\text{Э}} + 0,6 \text{ В} = 8,1 \text{ В}$.

3. Выбираем сопротивление $R_{\text{Э}}$, исходя из тока покоя $I_{\text{ОК}} \approx I_{\text{ОЭ}} \approx 1 \text{ мА}$:

$$R_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{Э}}}{I_{\text{ОЭ}}} = 7,5 \text{ к.}$$

4. Выбираем сопротивления R_1 и R_2 , обеспечивающие смещение и удовлетворяющие условию согласования $R_{\text{ЭКВ}} \leq 0,1R_{\text{Б}}$. Так как при $\beta = 100$ $R_{\text{Б}} = \beta \cdot R_{\text{Э}} = 750 \text{ к}$, то $R_{\text{ЭКВ}} = (R_1 \parallel R_2) \leq 0,1R_{\text{Б}} = 75 \text{ к}$. Поскольку $\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{\text{КК}} - U_{\text{Б}}}{U_{\text{Б}}} = 0,85$, то, если $R_2 = 150 \text{ к}$, $R_1 = 127 \text{ к}$. Выбираем $R_1 = 130 \text{ к}$ из нормированного ряда. В результате $R_{\text{ЭКВ}} = (R_1 \parallel R_2) = 70 \text{ к}$, а входное сопротивление схемы $R_{\text{ВХ}} = (R_{\text{ЭКВ}} \parallel R_{\text{Б}}) = 64 \text{ к}$. Таким образом, данный ЭП обеспечивает работу с источником сигнала, имеющим $R_{\text{ИСТ}} \leq 0,1R_{\text{ВХ}} \approx 6 \text{ к}$.

5. Определяем C_1 , исходя из эквивалентной схемы ФВЧ и $f_{\text{Н}}$. Так как $f_{\text{Н}} = \frac{1}{2\pi \cdot RC}$, где $R = (R_{\text{ЭКВ}} \parallel R_{\text{Б}})$, то $C = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot f_{\text{Н}}} = 1 \text{ мкФ}$.

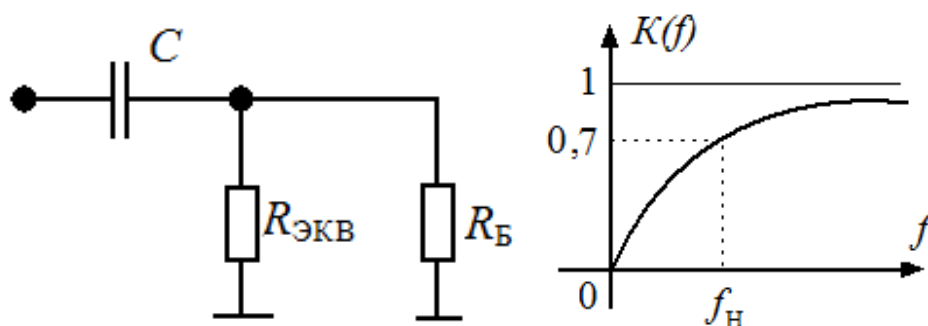


Рис. 5.11. К выбору переходного конденсатора

6. Емкость конденсатора C_1 должна быть в 3–5 раз больше рассчитанной емкости для обеспечения условия $K(f) = 1$, начиная с нижней граничной частоты $f_{\text{Н}}$. Поэтому выбираем $C_1 = 5 \text{ мкФ}$. Аналогичным образом определяем C_2 , исходя из того, что C_2 и сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$ также образуют ФВЧ с нижней граничной частотой $f_{\text{Н}}$.

7. Заполнить табл. 5.1. расчетными значениями схемы при заданных вариантах значений.

Таблица 5.1.

Расчетные значения параметров эмиттерного повторителя

№ пп	$U_{\text{КК}}, \text{В}$	$I_{\text{ОК}}, \text{мА}$	$\Delta f, \text{кГц}$	$U_{\text{Э}}$	$U_{\text{Б}}$	R_1	R_2	C_1	C_2
1	12	3	0,02-25						
2	11	2	0,01-35						
3	10	4	0,01-45						
4	14	5	0,03-65						

5	16	1	0,07-50						
6	13	6	0,02-40						
7	18	7	0,06-30						
8	19	8	0,01-18						
9	15	3	0,03-30						
10	17	6	0,04-75						

Экспериментально-расчетное задание № 5.2

«Расчет схемы двухкаскадного усилителя»

Цель экспериментально-расчетного задания

Освоение, компьютерное моделирование и макетирование двухкаскадного усилителя на комплементарной паре биполярных транзисторов.

1. Собрать в программах *LTSpice* и *Proteus* схему усилителя, показанную на рис. 5.12.

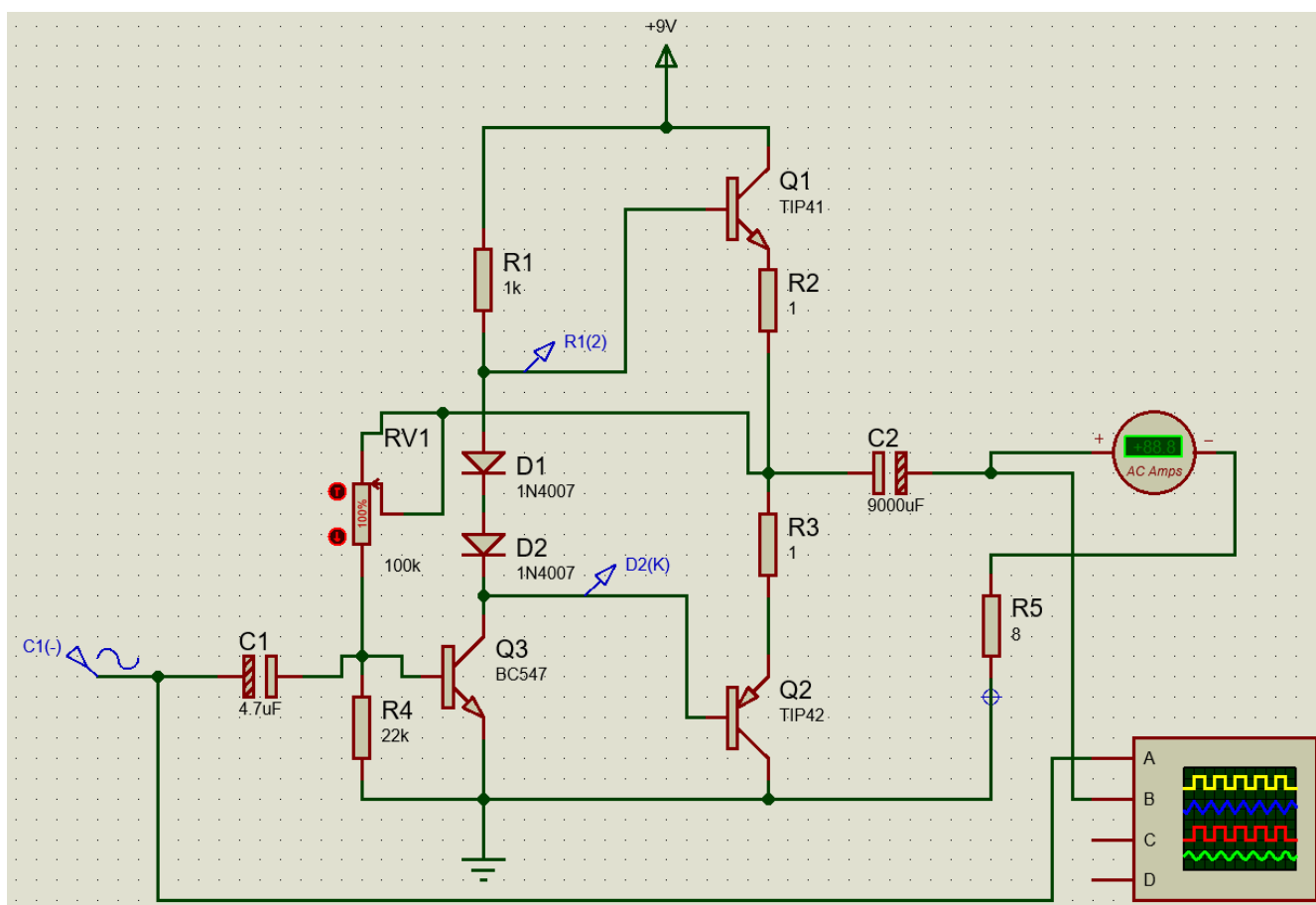


Рис. 5.12 Схема экспериментального двухкаскадного усилителя

2. Снять амплитудную характеристику усилителя. Для этого подать на вход усилителя от генератора синусоидальный сигнал частотой $f = 1\text{кГц}$ и, меняя амплитуду входного сигнала в пределах $U_{\text{вх}} = 0,1 \dots 2\text{ В}$, замерить с

помощью мультиметра или осциллографа амплитуду выходного сигнала $U_{\text{вых.}}$ и выходной ток $I_{\text{вых.}}$. Результаты записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Экспериментальная амплитудная характеристика усилителя

$U_{\text{вх}}$								
$U_{\text{вых}}$								
$I_{\text{вых.}}$								

3. Построить амплитудную характеристику усилителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$.

4. Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению K_U .

5. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя. Для этого подать на вход усилителя сигнал $U_{\text{вх}}=0,2\text{В}$ и измерять выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ при различных частотах входного сигнала, при этом уровень входного напряжения поддерживать постоянным ($U_{\text{вх}}=0,2\text{В}$). Значение частоты входного сигнала изменять в пределах от 20Гц до 30000 Гц. Результаты измерений занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика усилителя

$f(\text{Гц})$	20								30000
$U_{\text{вых}}$									
K_U									
$\lg f$									

6. Для каждого значения частоты определить значение коэффициента усиления по напряжению $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$.

7. Построить график зависимости изменения коэффициента усиления от частоты в логарифмическом масштабе. Из графика определить нижнюю f_H и верхнюю f_B частоты.

Контрольные вопросы

2. Каково назначение усилительного каскада?
3. Какие виды усилительных каскадов вам известны?
4. Что такое коэффициент усиления?
5. Что такое обратная связь?
6. Какие виды обратной связи вам известны?
7. Что такое начальная рабочая точка?
8. Как определяются частотные свойства усилителя?

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы:

Исследовать свойства операционного усилителя.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводы.

Теоретические пояснения к работе:

ОУ представляют собой дифференциальные усилители с очень большим коэффициентом усиления и очень большим входным сопротивлением. ОУ используются с отрицательной обратной связью (ООС).

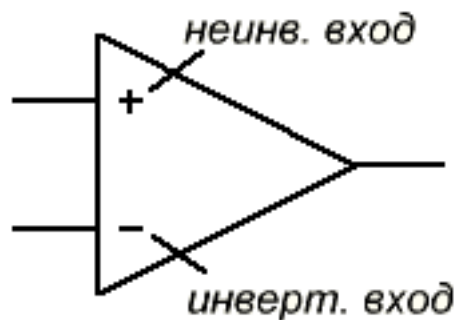


Рис. 6.1. Условное обозначение ОУ

ООС – это процесс передачи выходного сигнала обратно на вход, при котором погашается часть входного сигнала. ООС может быть зависимой по какому-то параметру, например по амплитуде или частоте. За счет ООС и высокого коэффициента усиления ОУ «сводит» разность напряжений между входами к нулю. За счет высокого сопротивления входы тока почти не потребляют.

Рассмотрим влияние ООС на свойства ОУ. Пусть $A \gg 1$ – коэффициент усиления ОУ, не охваченного ООС (фактически это коэффициент усиления дифференциального сигнала), а $B < 1$ – коэффициент передачи цепи ООС. Таким образом, $A = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} - BU_{\text{ВЫХ}}}$. Тогда коэффициент усиления ОУ, охваченного ООС, $K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{A}{1 + AB}$, где AB – петлевое усиление, а $(1 + AB)$ – глубина ООС.

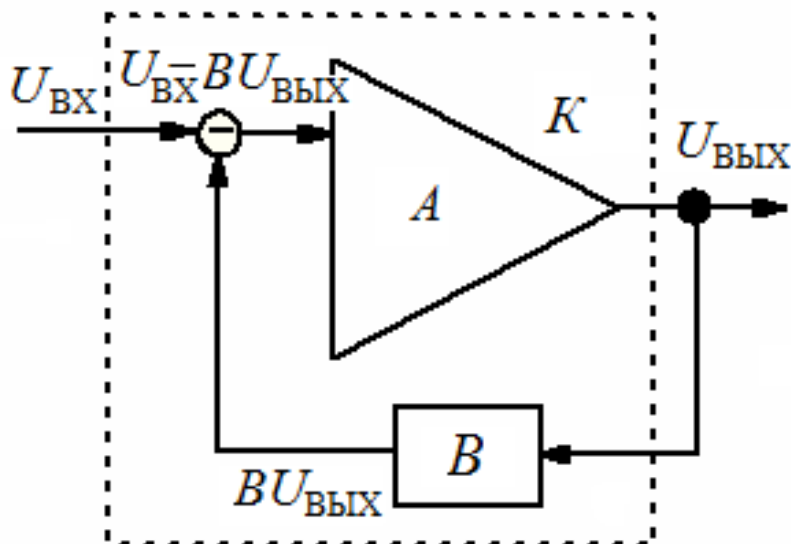


Рис. 6.2. Обратная связь в ОУ

При больших значениях $A \rightarrow \infty$ $K \rightarrow \frac{1}{B}$. Таким образом, чем глубже ООС, тем больше свойства ОУ начинают от нее зависеть и в пределе определяются исключительно параметрами цепи обратной связи. ОУ схемотехнически строятся на основе дифференциальных схем усиления.

Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель (ДУ) – это классическая транзисторная схема, предназначенная для усиления разности двух входных сигналов. ДУ является основой операционных усилителей, применяется в устройствах автоматического регулирования для сравнения входного сигнала с эталонным напряжением, используется для уменьшения уровня шумов.

Если на входах ДУ сигналы изменяются одновременно и одинаково, то такое изменение называется *синфазным*. Если сигналы на первом и втором входах изменяются по-разному, то такое изменение называется *дифференциальным*, а сигнал на выходе – *разностным* или *дифференциальным*.

Полезным является дифференциальный сигнал, поэтому хороший ДУ характеризуется высоким коэффициентом усиления дифференциального сигнала, а коэффициент усиления синфазного сигнала должен быть, наоборот, низким.

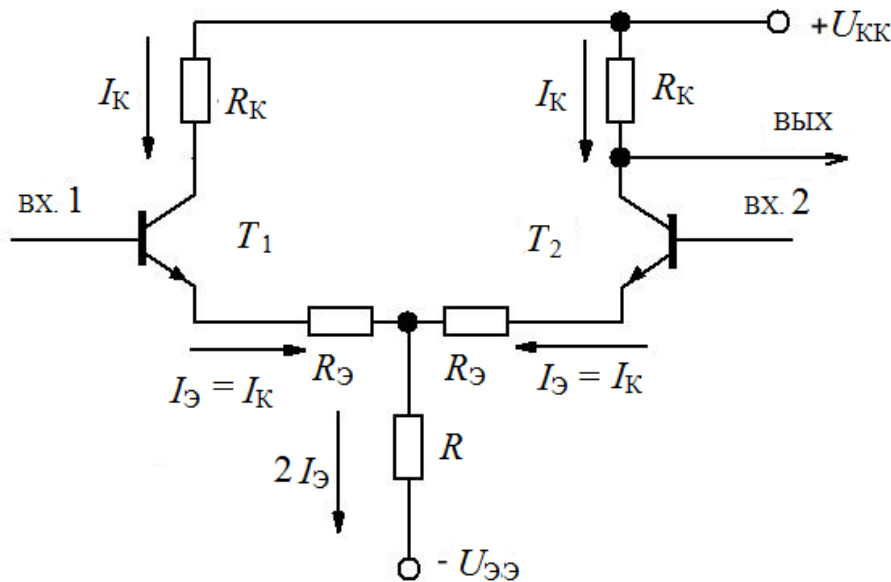


Рис. 6.3. Схема ДУ

ДУ часто характеризуют коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС): $\text{КОСС} = \frac{\text{полезный сигнал}}{\text{синфазный сигнал}}$. Для хорошего ДУ КОСС должен быть большим.

Рассмотрим работу ДУ, используя модель Эберса – Молла. При этом применяются следующие условные обозначения: « $\uparrow$ » – изменение, « $\uparrow$ » – увеличение, « $\downarrow$ » – уменьшение, « $\rightarrow$ » – следовательно.

1. Пусть сигналы на входах изменяются одинаково. Тогда

$$\uparrow U_{\text{ВХ1}} = U_{\text{ВХ2}} \rightarrow \uparrow U_{\text{Э1}} = U_{\text{Э2}} \rightarrow U_{\text{БЭ1}} = U_{\text{БЭ2}} = \text{const} \rightarrow I_{\text{К1}} = I_{\text{К2}} = \text{const} \rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}.$$

2. Пусть сигнал меняется на вх. 1 относительно постоянного уровня на вх. 2. Тогда

$$\uparrow U_{\text{ВХ1}} \rightarrow \uparrow U_{\text{Э1}} \rightarrow \uparrow U_{\text{Э2}} \rightarrow \downarrow U_{\text{БЭ2}} \text{ при } U_{\text{ВХ2}} = \text{const} \rightarrow \downarrow I_{\text{К2}} \rightarrow \downarrow U_{\text{РК}} \rightarrow \uparrow U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{К2}},$$

и, наоборот,

$$\downarrow U_{\text{ВХ1}} \rightarrow \downarrow U_{\text{Э1}} \rightarrow \downarrow U_{\text{Э2}} \rightarrow \uparrow U_{\text{БЭ2}} \text{ при } U_{\text{ВХ2}} = \text{const} \rightarrow \uparrow I_{\text{К2}} \rightarrow \uparrow U_{\text{РК}} \rightarrow \downarrow U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{К2}}.$$

3. Пусть сигнал меняется на вх. 2 относительно постоянного уровня на вх. 1. Тогда

$$\uparrow U_{\text{ВХ2}} \text{ при } U_{\text{ВХ1}} = \text{const} = U_{\text{Э1}} = U_{\text{Э2}} \rightarrow \uparrow U_{\text{БЭ2}} \rightarrow \uparrow I_{\text{К2}} \rightarrow \uparrow U_{\text{РК}} \rightarrow \downarrow U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{К2}},$$

и, наоборот,

$$\downarrow U_{\text{ВХ2}} \text{ при } U_{\text{ВХ1}} = \text{const} = U_{\text{Э1}} = U_{\text{Э2}} \rightarrow \downarrow U_{\text{БЭ2}} \rightarrow \downarrow I_{\text{К2}} \rightarrow \downarrow U_{\text{РК}} \rightarrow \uparrow U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{К2}}.$$

Таким образом, в зависимости от взаимного изменения уровня напряжения на входах выходной сигнал ДУ оказывается либо положительной, либо отрицательной полярности, поэтому принято называть вх. 1 *неинвертирующим*, а вх. 2 – *инвертирующим*.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала определяется отношением выходного сопротивления R_K к суммарному сопротивлению эмиттерной цепи T_2 относительно входа 1: $K_{\text{дифф}} = \frac{R_K}{2(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})}$.

Коэффициент усиления синфазного сигнала определяется отношением выходного сопротивления R_K к суммарному сопротивлению эмиттерной цепи T_2 относительно земли: $K_{\text{синф}} = \frac{R_K}{R_{\text{э}} + r_{\text{э}} + 2R}$. Значение $2R$ берется из-за удвоенного тока $2I_{\text{э}}$, протекающего через этот резистор по отношению к $r_{\text{э}}$ и $R_{\text{э}}$.

$\text{КОСС} \cong \frac{R}{R_{\text{э}} + r_{\text{э}}}$. Он определяется отношением $\frac{K_{\text{дифф}}}{K_{\text{синф}}}$ при больших значениях R .

Из данных выражений следует, что $K_{\text{дифф}} \uparrow$ при $\uparrow R_K$, $\downarrow R_{\text{э}}$ и $\downarrow r_{\text{э}}$. В этом случае $\downarrow K_{\text{синф}}$ (и, соответственно, $\uparrow \text{КОСС}$) возможно лишь при существенном $\uparrow R$. При этом необходимо иметь в виду, что $\downarrow R_{\text{э}}$ и $r_{\text{э}}$ приводит к $\downarrow R_{\text{вх}}$ схемы, так как $R_{\text{вх}} \approx \beta \cdot (R_{\text{э}} + r_{\text{э}})$.

Пример выполнения эксперимента лабораторной работы

Для проведения экспериментов нужно собирать несколько разных схем с операционным усилителем.

На рисунке 6.4 приведена схема для измерения коэффициента усиления операционного усилителя. Коэффициент усиления рассчитывается по формуле $K_u = dU_{\text{вых}}/dU_{\text{вх}}$.

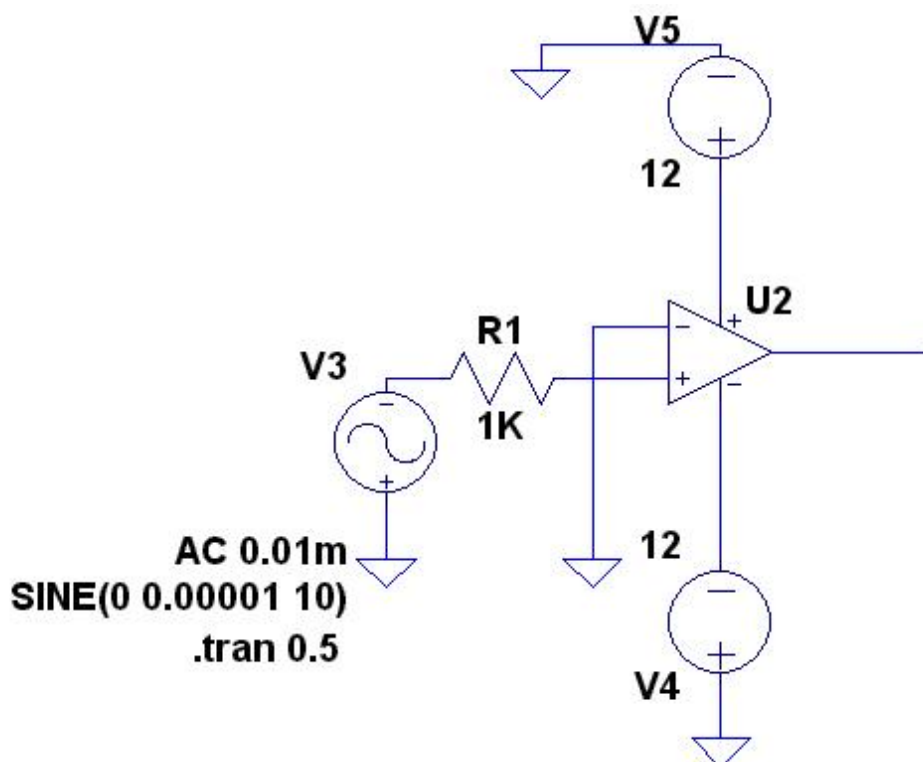


Рис. 6.4. Схема для измерения коэффициента усиления

Для расчета вместо бесконечно малых приращений будем брать конечные приращения, полученные при анализе схемы. Для этого нужно экран осциллографа развернуть и измерительные линии установить; одну на минимальные значения амплитуд, а другую на максимальные значения амплитуд. В нижней части экрана прочесть разности напряжений, которые и являются приращениями. Далее выполнить деление.

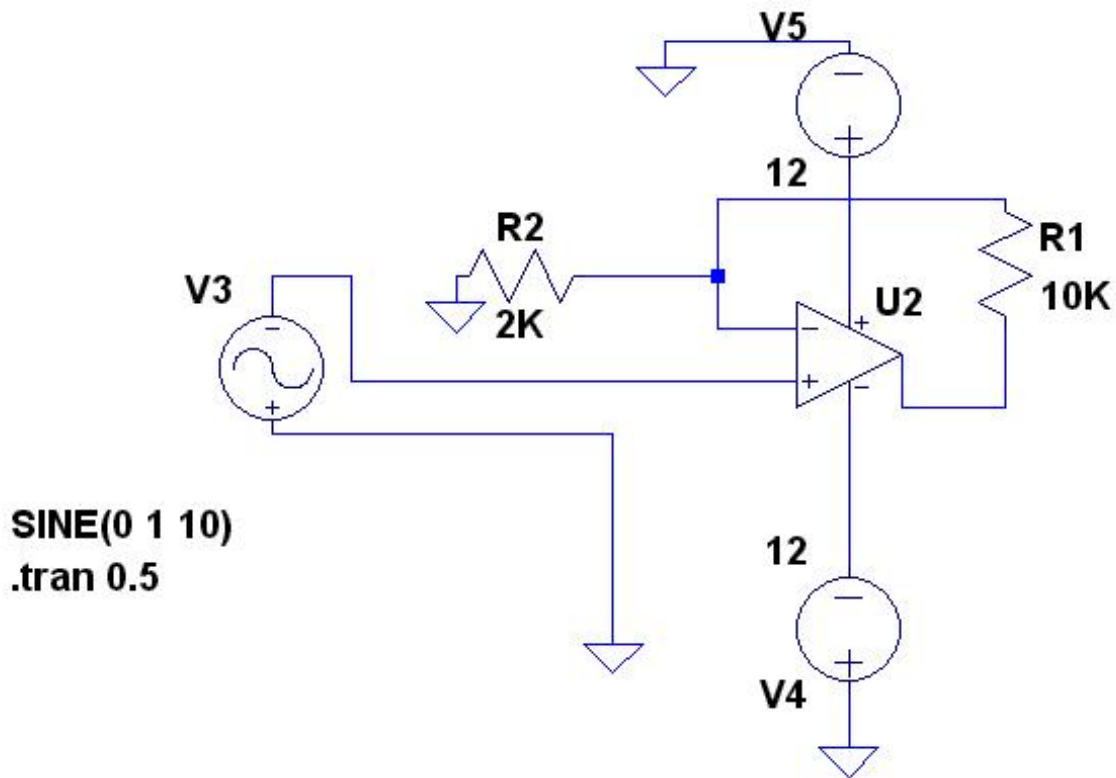


Рис. 6.5. Схема проведения основных экспериментов с операционным усилителем.

Для проведения остальных экспериментов нужно собрать схему, показанную на рис. 6.5. На рисунке показана схема для исследования основного неинвертирующего включения. Для проведения остальных экспериментов нужно произвести переключения в этой схеме. Результаты экспериментов должны быть представлены графиками и их анализом.

Коэффициент усиления имеет значения в диапазоне от нескольких тысяч до сотен тысяч. Потому для получения достоверных результатов в первом эксперименте амплитуда входного напряжения должна быть не более 10 мкВ.

Для остальных экспериментов входное напряжение нужно задавать такой величины, чтобы выходное напряжение не выходило за ограничение, то есть $|U_{\text{пит}} - 2\text{В}|$.

Для основных включений инвертирующего и неинвертирующего выходное напряжение определяется соотношением $U_{\text{вых}} = K_{\text{п}} * U_{\text{вх}}$.

Коэффициент передачи определяется соотношением резисторов:

1. инвертирующее включение — $K_p = R_o/R_i$,
2. неинвертирующее включение — $K_p = (R_o + R_i)/R_i$.

По полученным результатам экспериментов необходимо проверить правильность указанных соотношений.

Если цепь обратной связи подключить к неинвертирующему входу, то получаем схему с положительной обратной связью — триггер Шмитта как это показано на рис. 6.6.

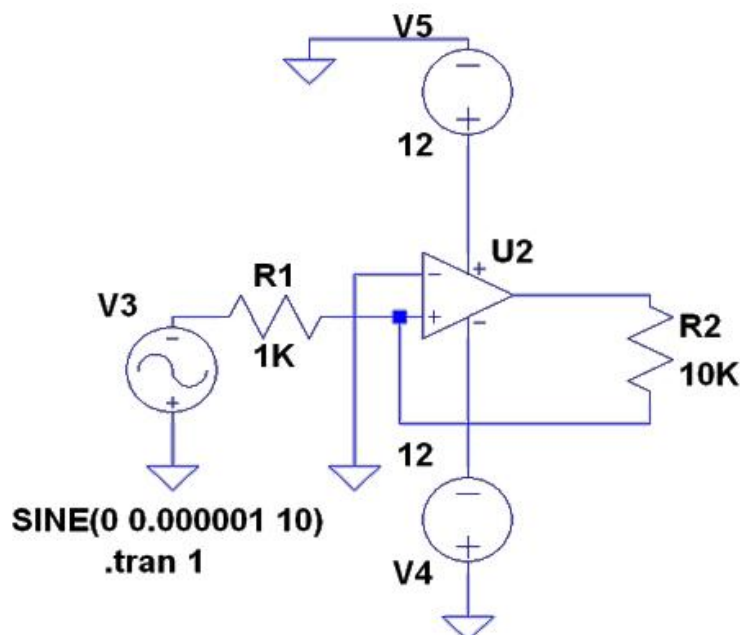


Рис. 6.6. Схема с положительной обратной связью

Для оценки параметров этой схемы нужно получить график зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. На графике должна быть четко видна петля гистерезиса, по характерным точкам которой определяем характеристики триггер Шмитта. Для построения устройств с заданными частотными свойствами необходимо использовать цепь обратной связи, у которой сопротивление зависит от частоты. Для этого нужно параллельно одному из резисторов обратной связи подключить конденсатор, как показано на рис. 6.7.

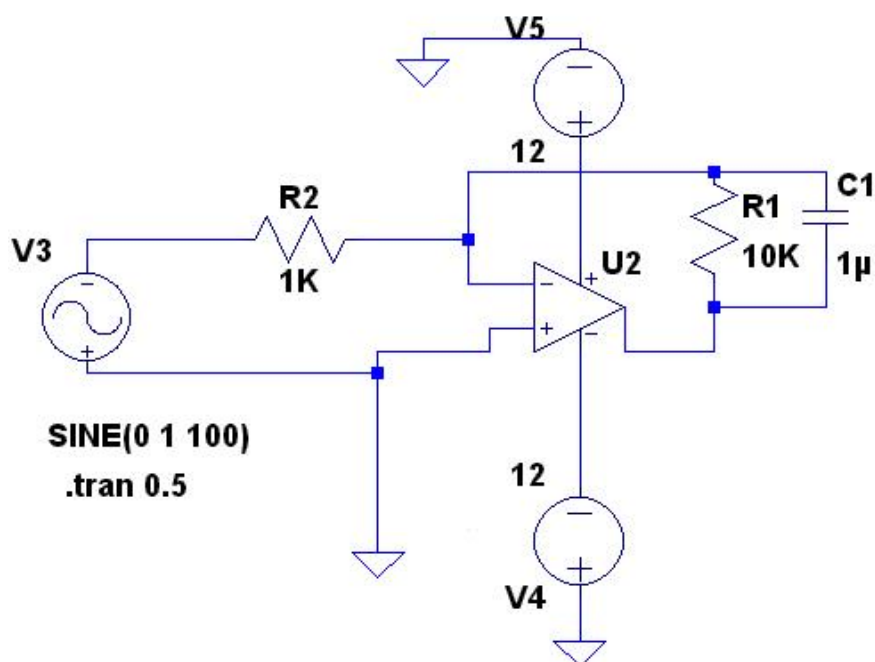


Рис. 6.7. Схема частотной зависимости

Изменяя емкость этого конденсатора определить, как при этом будет изменяться АЧХ.

Программа лабораторной работы:

1. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать электрические схемы экспериментов с операционным усилителем, можно выбрать наиболее распространенный тип ОУ - 741.
2. Задать значения параметров источника напряжения.
3. Провести настройку измерительной аппаратуры.
4. Провести эксперименты и описать их.
5. Используя возможности пакета получить графики экспериментов, сделать выводы.
6. Оформить отчет.

При выполнении данной работы необходимо провести следующие эксперименты:

1. Измерить коэффициент усиления операционного усилителя,
2. Исследовать основные включения операционного усилителя,
3. Исследовать включение операционного усилителя с положительной обратной связью,
4. Исследовать операционный усилитель с частотно зависимой обратной связью.

Экспериментально-расчетное задание № 6.1

«Исследование схем включения ОУ»

Собрать схему инвертирующего усилителя на основе ОУ (рис. 6.8).

Использовать модель 741.

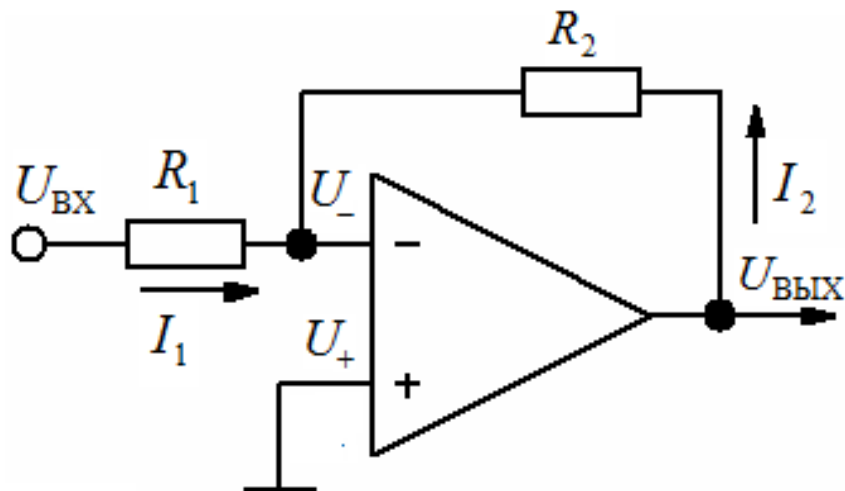


Рис. 6.8. Схема инвертирующего усилителя

Подать на вход с помощью генератора синусоидальное напряжение амплитудой $U_{\text{ВХ}} = 0,2 \text{ В}$ частотой 1 кГц . Измерить с помощью осциллографа $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$, определить коэффициент усиления, сравнить с расчетом.

Исследовать передаточную характеристику усилителя $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. Для этого необходимо задавать амплитуду входного сигнала в диапазоне $0,01 - 5 \text{ В}$ и измерять амплитуду выходного сигнала. Результаты занести в таблицу, построить график.

Установить на входе усилителя напряжение $U_{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В}$. Изменять частоту входного сигнала в диапазоне $0,1 \text{ Гц} - 10 \text{ МГц}$. Измерить амплитуду выходного сигнала на каждой частоте. Построить зависимость коэффициента усиления от частоты в логарифмическом масштабе (АЧХ усилителя). По графику определить верхнюю граничную частоту (на уровне $0,707$) и частоту единичного усиления (на которой коэффициент усиления равен единице).

Собрать схему не инвертирующего усилителя (рис. 6.9).

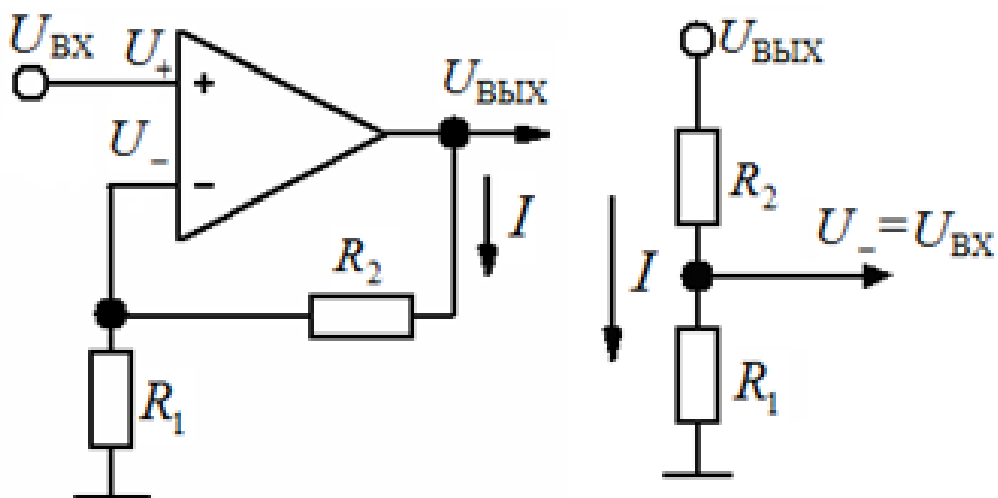


Рис. 6.9. Схема не инвертирующего усилителя

Подать на вход с помощью генератора синусоидальное напряжение амплитудой $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ частотой 1 кГц . Измерить с помощью осциллографа $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$, определить коэффициент усиления, сравнить с расчетом.

Исследовать передаточную характеристику усилителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Для этого необходимо задавать амплитуду входного сигнала в диапазоне $0,01 - 5 \text{ В}$ и измерять амплитуду выходного сигнала. Результаты занести в таблицу, построить график.

Установить на входе усилителя напряжение $U_{\text{вх}} = 0,5 \text{ В}$. Изменять частоту входного сигнала в диапазоне $0,1 \text{ Гц} - 10 \text{ МГц}$. Измерить амплитуду выходного сигнала на каждой частоте. Построить зависимость коэффициента усиления от частоты в логарифмическом масштабе (АЧХ усилителя). По графику определить верхнюю граничную частоту (на уровне $0,707$) и частоту единичного усиления (на которой коэффициент усиления равен единице).

Рассчитать коэффициент усиления не инвертирующего и инвертирующего ОУ по параметрам из табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры для расчета не инвертирующего и инвертирующего ОУ

№ пп	R1, кОм	R2, кОм
1	10	100
2	11	91
3	12	82
4	13	150
5	15	130
6	16	120
7	18	220
8	20	200
9	22	180
10	24	160
11	10	120
12	11	130
13	12	150
14	13	91
15	15	180
16	16	200
17	18	240
18	20	180
19	22	270
20	24	300

Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель (ОУ)?
2. Как определяются коэффициент усиления ОУ?

3. Что такое инвертирующее включение ОУ?
4. Что такое неинвертирующее включение ОУ?
5. Что такое триггер Шмитта?
6. Что такое АЧХ ОУ?
7. Из каких каскадов состоит операционный усилитель?
8. Назовите параметры идеального операционного усилителя.
9. Как определяется коэффициент усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителя?
10. Как рассчитать напряжение на выходе сумматора?
11. Нарисуйте осциллограммы на выходе интегратора

Лабораторная работа №7 **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА**

Цель работы:

Исследовать свойства насыщенных транзисторных ключей.

Необходимое оборудование:

Персональный ПК с установленными пакетами *LTSpice*, *Proteus*.

Электронные компоненты, макетные платы, измерительное оборудование, паяльное оборудование.

Порядок выполнения работы:

Включить ПК, запустить на выполнение программный пакет *LTSpice* и выполнить предложенные задания, запустить программный пакет *Proteus* выполнить предложенные задания, выполнить работу с лабораторным оборудованием.

Оформление отчета:

По каждой лабораторной работе каждым студентом должен быть предоставлен отчет в виде электронного или печатного документа. В отчете приводятся наименование и номер лабораторной работы, цель работы, программа работы с указанием всех необходимых экспериментов, полученных результатов, их объяснения и выводов.

Теоретические пояснения к работе:

Логические ключи и инверторы на МОП-транзисторах

Логические ключи позволяют включать нагрузку в цепи стока при подаче управляющего сигнала. Ниже (рис. 12.1) приведен пример логического ключа на *n*-канальном МОП-транзисторе.

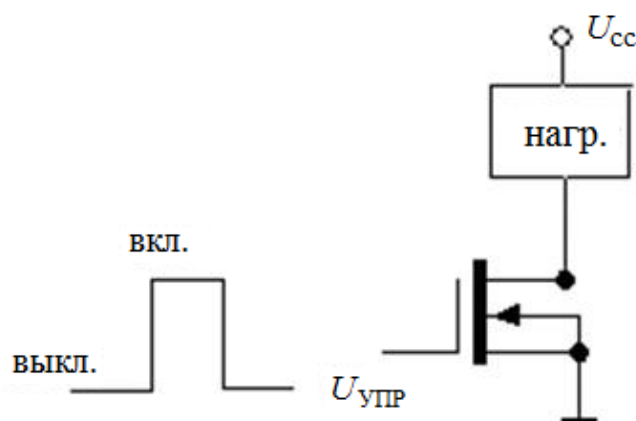


Рис. 7.1. Схема логического ключа на ПТ

Инверторы позволяют получить на выходе сигнал с полярностью, противоположной входному.

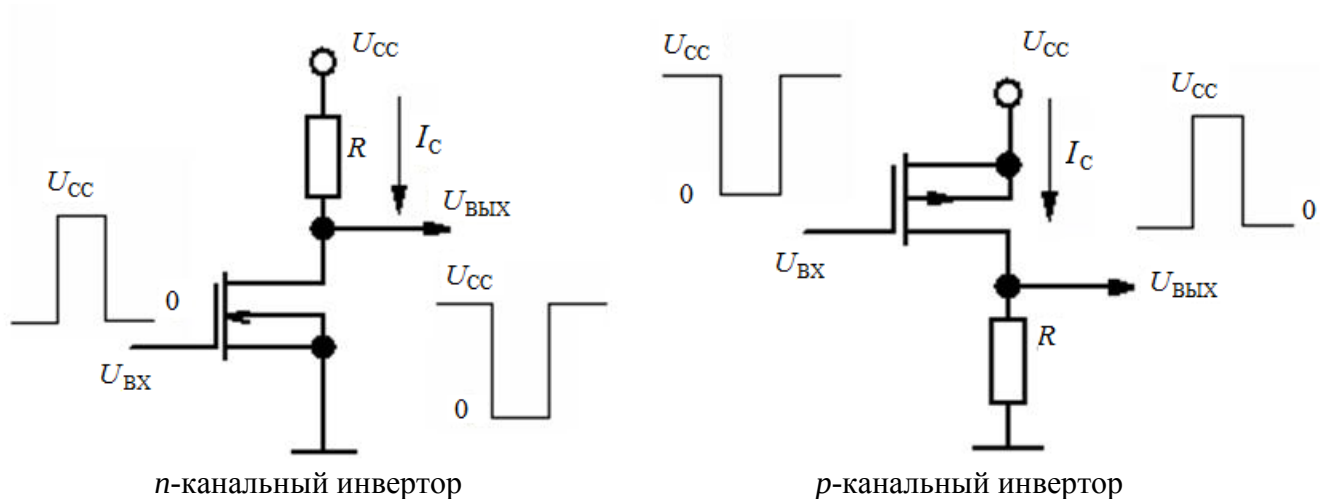


Рис. 7.2. Схемы инверторов на ПТ

Недостатки *n*- и *p*-канальных инверторов:

- 1) потребляют ток во включенном состоянии;
- 2) имеют большое выходное сопротивление в выключенном состоянии, определяемое величиной нагрузочного резистора $R = [10 \dots 100 \text{ к}]$.

Данный недостаток устраняется в КМОП-инверторах.

КМОП-инвертор

КМОП-инвертор — схема, выполненная на двух комплементарных МОП-транзисторах и являющаяся базовой структурой для всех логических КМОП-элементов.

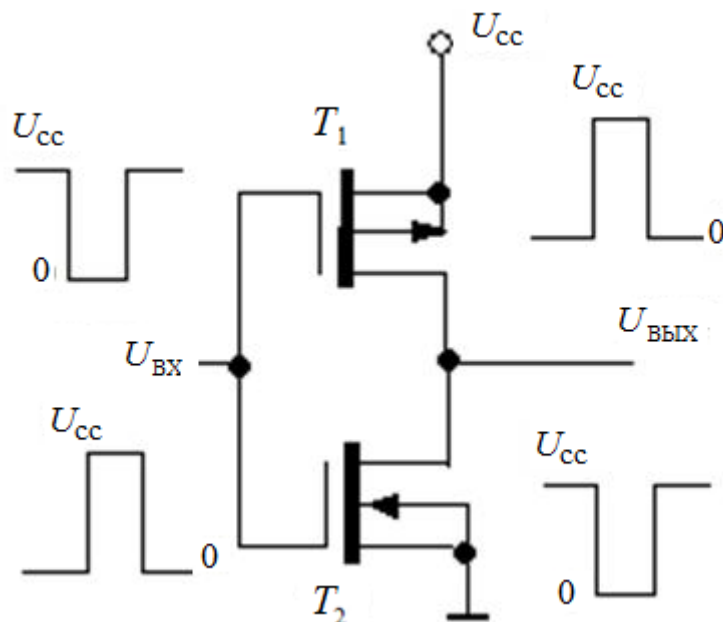


Рис. 7.3. Схема КМОП-инвертора

Достоинства КМОП-инверторов:

- 1) практически отсутствует потребление тока;
- 2) очень малое выходное сопротивление.

Действительно, потребления тока практически нет, так как транзисторы работают по очереди. При положительной полярности входного импульса n -канальный МОП-транзистор открыт, а p -канальный – закрыт и его сопротивление $R_{T_2} > 20$ МОм. При отрицательной полярности входного импульса, наоборот, p -канальный МОП-транзистор открыт, а n -канальный – закрыт и его сопротивление также составляет $R_{T_1} > 20$ МОм.

Малое выходное сопротивление обусловлено тем, что один из транзисторов всегда открыт и имеет типичное сопротивление канала – 20–100 Ом. В результате $R_{\text{вых}} = R_{\text{эКВ}} = R_{T_1} \parallel R_{T_2} \leq 20 \dots 100$ Ом.

Аналоговые ключи на МОП-транзисторах

МОП-транзисторы в качестве аналоговых ключей в основном применяются в силу таких свойств, как малое сопротивление в проводящем режиме («вкл.») и высокое сопротивление в состоянии отсечки («выкл.»), малые токи утечки и малая емкость. МОП-транзисторы являются для аналоговых сигналов идеальными ключами, управляемыми напряжением.

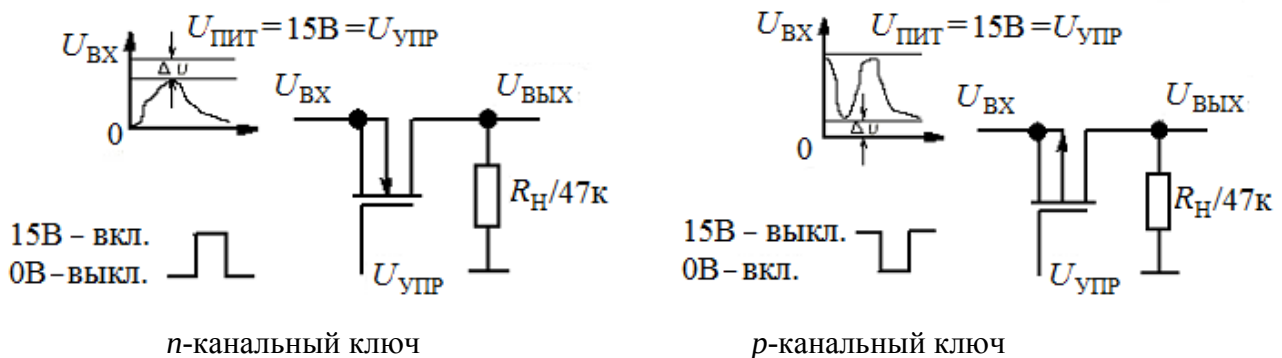


Рис. 7.4. Схемы аналоговых ключей на МОП-транзисторах

Диапазон входного сигнала для n -канального ключа ограничен от 0 В до $U_{\text{ПИТ}} - \Delta U$, где $\Delta U \approx 5$ В, поскольку дальнейшее уменьшение ΔU приводит к тому, что $U_{\text{УПР}}$ не может удержать канал в полностью открытом состоянии. В результате в рассматриваемой схеме увеличение $U_{\text{ВХ}} > 10$ В приведет к $U_{\text{ЗИ}} < 5$ В и уменьшению тока стока.

Диапазон входного сигнала для p -канального ключа ограничен от $U_{\text{ПИТ}}$ до $\Delta U \approx 5$ В, так как при дальнейшем уменьшении отрицательного напряжения $U_{\text{ЗИ}}$ по отношению к истоку оно окажется недостаточным для удержания канала в полностью открытом состоянии. Рекомендуемая величина резистора нагрузки для аналогового ключа – 1–100 к.

Аналоговый КМОП-ключ

КМОП-ключ выполнен на комплементарных МОП-транзисторах и обеспечивает возможность прохождения сигнала во всем динамическом диапазоне, определяемом источником питания (т.е. от 0 В до $U_{\text{пит}}$). В КМОП-ключе затворы транзисторов соединены через инвертор, объединенные истоки образуют вход, а объединенные стоки – выход ключа. Таким образом, n -канальный транзистор T_1 пропускает входной сигнал от 0 до почти $U_{\text{пит}}$, а p -канальный транзистор T_2 пропускает входной сигнал от $U_{\text{пит}}$ до почти 0 В. В результате весь динамический диапазон 0– $U_{\text{пит}}$ оказывается перекрытым.

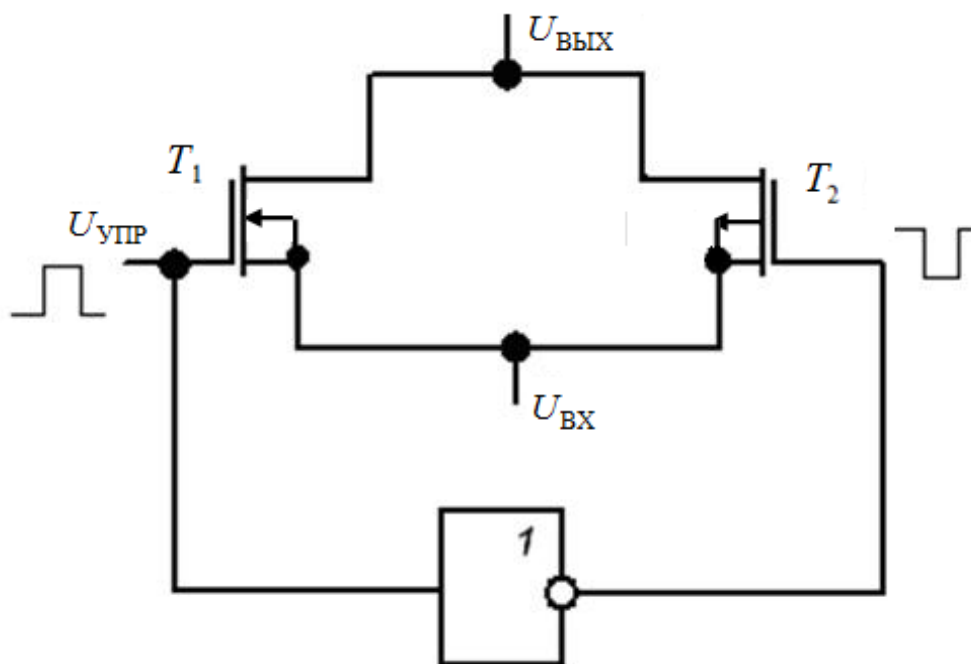


Рис. 7.5. Аналоговый КМОП-ключ

Программа лабораторной работы:

1. В программах *LTSpice* и *Proteus* собрать электрические схемы аналоговых ключей на биполярных, МОП и КМОП транзисторах.
2. Установить начальную рабочую точку транзисторов.
3. Задать значения параметров источника напряжения.
4. Задать значения генераторов сигналов.
5. Провести настройку измерительной аппаратуры.
6. Провести эксперименты и описать их.
7. Используя возможности пакета получить графики экспериментов, сделать выводы.
8. Оформить отчет.

Пример выполнения эксперимента лабораторной работы

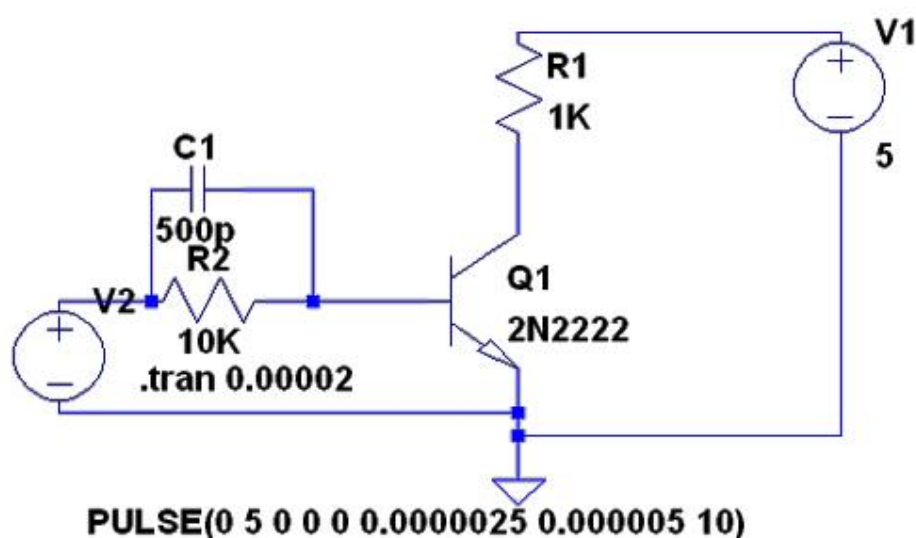


Рис. 7.6. Схема эксперимента с транзисторным насыщенным ключом.

Схема эксперимента приведена на рис. 7.6. Настройка генератора сигнала на рис. 7.7.

Данная схема позволяет провести с ключом самые разнообразные эксперименты, так можно получить графики изменения входного напряжения и тока во времени. Так же можно получить зависимости выходного напряжения и тока во времени. Изменяя величины сопротивлений в цепях базы и коллектора можно снять все зависимости при различных коэффициентах насыщения.

Vinitial[V]:	0
Von[V]:	5
Tdelay[s]:	0
Trise[s]:	0
Tfall[s]:	0
Ton[s]:	0.0000025
Tperiod[s]:	0.000005
Ncycles:	10

Рис. 7.7. Настройка генератора импульсов.

При выполнении работы каждый студент должен провести эксперименты с транзисторами двух типов. Причем эксперименты должны быть проведены в двух режимах:

- с коэффициентом насыщения близком к единице,
- с коэффициентом насыщения $10 \div 1000$.

Также необходимо провести эксперимент с одной из схем с применением схемотехнических мероприятий по повышению быстродействия (либо установка форсирующего конденсатора, либо установка диода Шоттки)

Основная цель исследований насыщенного транзисторного ключа состоит в определении его быстродействия при сохранении выходных напряжений на уровнях потенциального кодирования ТТЛ.

Так как управляющим сигналом является входное напряжение и выходным сигналом является напряжение на коллекторе, то для определения быстродействия нужно иметь графики зависимости входного и выходного напряжений во времени. Учитывая малое время переключения транзистора входной сигнал нужно задавать с частотой $2 \div 10$ МГц. Рассмотрим как можно определить быстродействие ключа на основе полученных в эксперименте диаграмм. На рис 7.8 приведены диаграммы входного и выходного напряжений транзисторного ключа.

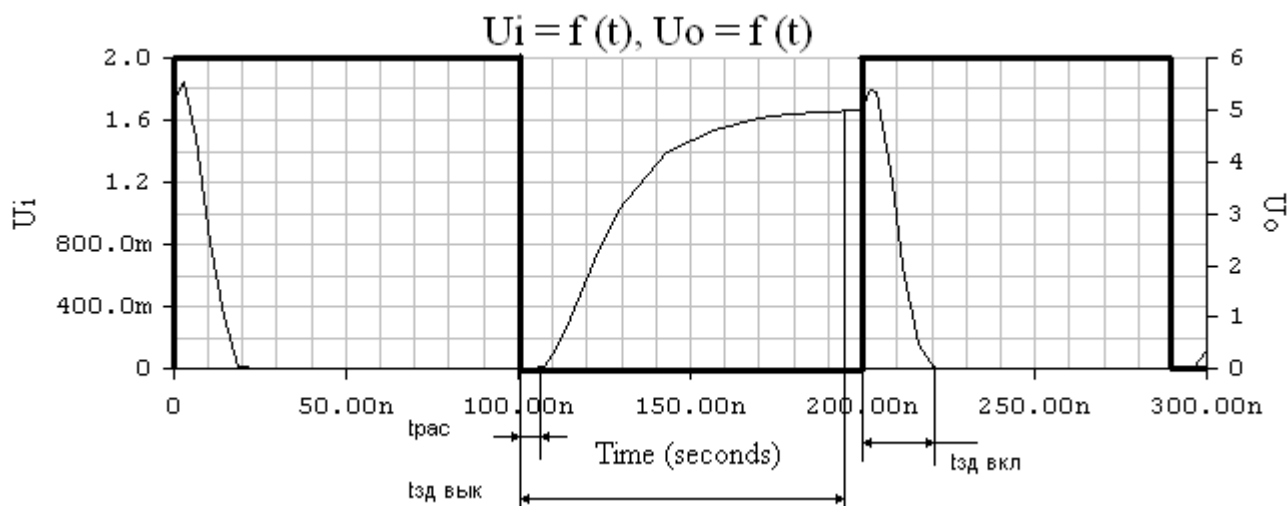


Рис. 7.8. Временная диаграмма изменений входного и выходного напряжений транзисторного ключа.

Обработка диаграммы выполнена в программе Paint. Время задержки включения — 20 нс, время задержки выключения — 90 нс, время рассасывания избыточного заряда в базе — 6 нс. Время равно разности ($t_{зд выкл} - t_{рас}$) — время рассасывания заряда неосновных носителей в базе.

В заключение анализа можно сказать, что транзисторный ключ с заданными параметрами обладает низким быстродействием (хотя коэффициент насыщения незначительно превышает единицу). В основном низкое быстродействие объясняется плохими частотными характеристиками транзистора 2N2222.

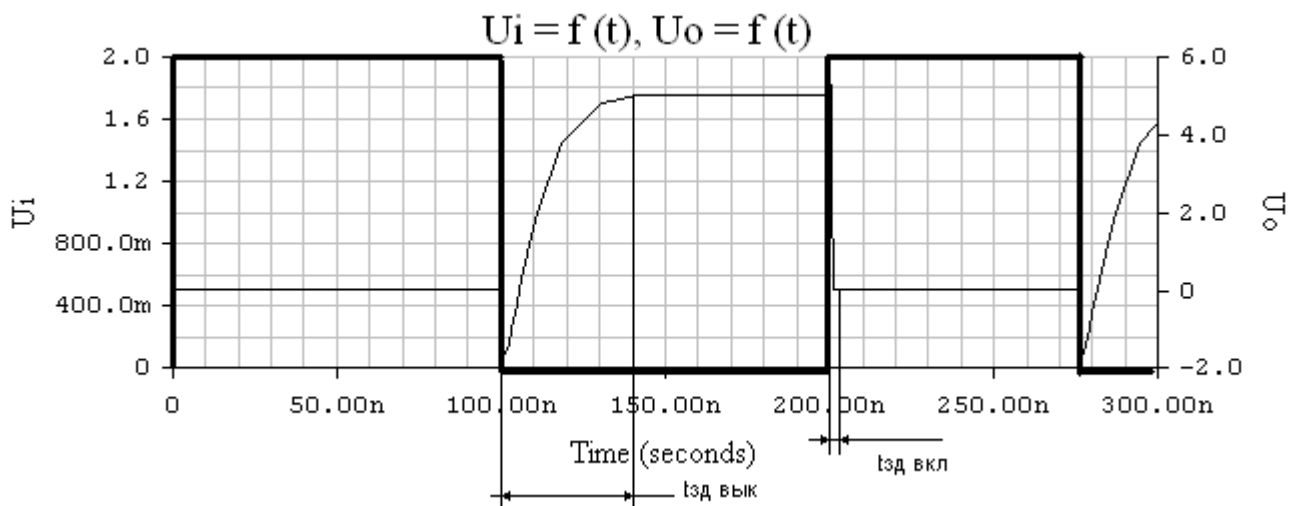


Рис. 7.9. Временная диаграмма изменения входного и выходного напряжений для транзисторного ключа с установленной форсирующей емкостью.

С целью улучшения характеристик ключа параллельно резистору базы включим форсирующий конденсатор величиной 100 пф и выполним анализ полученных графиков.

Анализ полученного графика позволяет сделать вывод об улучшении характеристик ключа после установки форсирующей емкости. Так, время задержки включения — 0,75 нс, время задержки выключения — 70 нс. Если включение существенно улучшилось, то время выключения изменилось не существенно. Следовательно, существенного улучшения характеристик можно достигнуть только установкой более быстродействующего транзистора.

В момент времени $t = 200$ нс на вход подано напряжение величиной 2В, и в этот момент начинается процесс открывания ключа. Этот процесс состоит в том, что в базу втекает ток определяемый величиной входного напряжения и в базе начинается накопление заряда неосновных носителей. Проявлением накопления заряда является изменение тока коллектора. Изменение тока коллектора заканчивается тогда, когда:

- либо заканчивается накопление заряда в базе,
- либо величина тока начинает определяться не зарядом в базе, а величиной сопротивления в цепи коллектора.

В первом случае речь идет об активном линейном режиме, и величина выходного напряжения может быть достаточно большой. Если же величина напряжения мала, сравнима с напряжением насыщения, то говорят о насыщении близком к единице, как получилось у нас.

Во втором случае процесс заканчивается насыщением транзисторного ключа, при этом обязательно напряжение на коллекторе имеет малую величину, не более $U_{нас}$ транзистора, а в базе накапливается избыточный заряд неосновных носителей, что приводит к снижению быстродействия при выключении ключа.

В момент $t = 100$ нс входное напряжение становится равным нулю, что соответствует началу процесса закрывания ключа. Этот процесс состоит в том, что в базе начинается рассасывание заряда неосновных носителей. Если избыточный заряд равен нулю, то уменьшение заряда сразу же приводит к изменению коллекторного тока. Если же избыточный заряд имеется, то сначала рассасывается он и коллекторный ток не меняется (не меняется и напряжение на коллекторе). Когда избыточный заряд рассосется, начнется изменение коллекторного тока и напряжения. Это мы видим на диаграмме рис. 7.9. Изменение коллекторного напряжения начинается только через 6 нс. Следовательно, время рассасывания избыточного заряда равно 6 нс, и это является задержкой выключения ключа. Если бы избыточный заряд отсутствовал, то задержка выключения ключа была бы равна нулю.

Контрольные вопросы

1. Каковы функции транзисторного ключа?
2. Что такое — коэффициент насыщения?
3. Что такое — избыточный заряд?
4. Как влияет форсирующий конденсатор на работу транзисторного ключа?
5. Как влияет диод Шоттки на работу транзисторного ключа?
6. В чем состоит отличие р- и n-канальных инверторов на полевых транзисторах (ПТ)?
7. Какие недостатки инверторов на ПТ и за счет чего устраняет КМОП-инвертор?
8. На чем основана работа аналоговых ключей на ПТ?
9. Какие недостатки аналоговых ключей на ПТ устраняет аналоговый КМОП-ключ?
10. На чем основана работа простейшего источника тока на ПТ?
11. В чем заключается автоматическое смещение в источнике тока на ПТ?
12. Что и каким образом достигается при совместном использовании ПТ и ОУ в источнике тока?
13. На чем основана работа аналогового мультиплексора?
14. На чем основана работа аналогового демultipлексора?
15. В чем заключается принцип работы схемы выборки — хранения?
16. Каким образом можно осуществить сброс в пиковом детекторе (интеграторе)?
17. Для каких целей используют истоковые повторители (ИП)?
18. Каким образом задается смещение и выбирается нагрузка в ИП?
19. Как можно улучшить работу ИП?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Водовозов А.М. Основы электроники [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.М. Водовозов – Электрон. текстовые данные. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – ISBN 978-5-9729-0137-1 – 140 с. – ЭБС «IPRbooks». Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/51731.html>
2. Новожилов, О. П. Электроника и схемотехника в 2 ч. Часть 1: [Электронный ресурс] учебник для академического бакалавриата / О. П. Новожилов. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 382 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-03513-1. ЭБС “Юрайт”. Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/book/9C9A15AD-47A5-4719-B5A2-E1C27357A56C>
3. Новожилов, О. П. Электроника и схемотехника в 2 ч. Часть 2: [Электронный ресурс] учебник для академического бакалавриата / О. П. Новожилов. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 421 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-03515-5. ЭБС “Юрайт”. Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/book/A249DF90-9B06-4320-87A4-58BCF3A99C6D>
4. Чижма С.Н. Электроника и микросхемотехника [Электронный ресурс]: учеб. пособие. - М.: ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2012. – 359 с. – ISBN 978-5-89035-649-9. ЭБС "Консультант Студента". Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785890356499.html>
5. Миленина, С. А. Электроника и схемотехника [Электронный ресурс]: учебник и практикум для академического бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 208 с. – (Серия : Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-9787-3. ЭБС “Юрайт”. Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/book/143598F2-997C-4795-9D40-2BD7163002E2>
6. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. 6-е изд. М.: Мир, 2003. 704 с.
7. Гальперин М. В. Электронная техника: учебник / М. В. Гальперин. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2004. 304 с.
8. Гольденберг Л. М. Импульсные и цифровые устройства: учебник для ВУЗов / Л. М. Гольденберг. М.: Связь, 1973. 496 с.
9. Бойко В. И. Схемотехника электронных систем. Цифровые устройства / В. И. Бойко [и др.]. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 512 с.
10. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: справочник / под ред. С. Б. Якубовского. М.: Радио и связь, 1989. 496 с.
11. Батушев В. А. Микросхемы и их применение: справ. пособие / В. А. Батушев [и др.]. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
12. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: справочник / под ред. Б. Л. Перельмана. М.: Радио и связь, 1981. 656 с.
13. Петухов В. М. Полупроводниковые приборы. Транзисторы. Дополнение второе: справочник / В. М. Петухов. М.: Рикел; Радио и связь, 1995. 288 с.

Учебное издание

Чернов Андрей Владимирович
Карташов Олег Олегович

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Аналоговые устройства

Печатается в авторской редакции

Технический редактор А.В. Артамонов

Подписано в печать 03.10.17. Формат 60×84/16.

Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 5,35.

Тираж экз. Изд. № 90374. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2