

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Электроника и схемотехника»
для студентов

Специальности 10.05.03 Информационная безопасность
автоматизированных систем

Специализация «Анализ безопасности информационных систем»

Ставрополь
2026

Оглавление

Введение	4
Лабораторная работа №1 Физические основы вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов	5
Лабораторная работа №2 Исследование статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов	8
Лабораторная работа №3 Характеристики и параметры биполярного транзистора	12
Лабораторная работа №4 Основные характеристики JFET-транзисторов	15
Лабораторная работа №5 Характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом	19
Лабораторная работа №6 Физические принципы работы и статические характеристики полупроводниковых приборов	24
Лабораторная работа №7 Характеристики и параметры полевых мдп-транзисторов с индуцированным каналом	27
Лабораторная работа №8 Принцип работы и статические характеристики каскада с общим эмиттером (ОЭ)	32
Лабораторная работа №9 Усилители на биполярных транзисторах. Каскад с общим эмиттером	35
Лабораторная работа №10 Усилители на JFET и МДП-транзисторах с индуцированным каналом	40
Лабораторная работа №11 Исследование усилителей на полевых транзисторах	44
Лабораторная работа №12 Основы работы и статические характеристики дифференциального каскада на биполярных транзисторах	49
Лабораторная работа №13 Исследование дифференциального каскада на биполярных транзисторах	52
Лабораторная работа №14 Исследование характеристик и параметров операционного усилителя	57
Лабораторная работа №15 Исследование линейных устройств на операционных усилителях	61
Лабораторная работа №16 Исследование триггеров	65
Лабораторная работа №17 Исследование счетчиков	69
Лабораторная работа №18 Исследование регистров	73
Список литературы	78

Введение

Электроника и схемотехника – это фундаментальные дисциплины, изучающие принципы построения, анализа и проектирования электронных устройств на основе дискретных компонентов и интегральных микросхем. Основной задачей курса является формирование у студентов знаний о методах расчета и моделирования электронных схем, а также развитие навыков их практической реализации.

Современная электроника охватывает широкий спектр направлений – от аналоговой и цифровой схемотехники до микропроцессорных систем и устройств силовой электроники. Исторически развитие электроники связано с изобретением полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов) и интегральных микросхем, что привело к революции в вычислительной технике и автоматизации.

Знание основ электроники и схемотехники необходимо для проектирования устройств в таких областях, как телекоммуникации, автоматизированные системы управления, робототехника и IoT. В рамках данной дисциплины рассматриваются базовые элементы электронных схем, методы их анализа, а также принципы работы усилителей, генераторов, цифровых логических схем и преобразователей сигналов.

Курс лабораторных работ состоит из двенадцати лабораторных работ, списка литературы и оглавления. Предлагаемое учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности: 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем».

Лабораторная работа №1 Физические основы вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов

Цель работы

Изучение физических принципов формирования вольт-амперных характеристик (ВАХ) р-п перехода, анализ влияния материалов и температуры на параметры полупроводниковых диодов.

Теоретическая часть

1. Физика р-п перехода

1. Равновесное состояние:

- При контакте р- и п-областей возникает диффузия основных носителей (дырок $\rightarrow$ п-зона, электронов $\rightarrow$ р-зона).
- Формируется обеднённый слой шириной 0.1–1 мкм с внутренним полем $E_{\text{вн}}$ и потенциальным барьером:

$$\phi_0 = kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right), \phi_0 = qkT \ln \left(\frac{n_i^2 N_A N_D}{n_i^2} \right),$$

где N_A, N_D – концентрации примесей, n_i – собственная концентрация носителей.

2. Механизмы проводимости:

- **Диффузионный ток** (прямое смещение): Обусловлен инжекцией неосновных носителей.
- **Дрейфовый ток** (обратное смещение): Термогенерированные носители ускоряются полем $E_{\text{вн}}$.

2. Уравнение ВАХ идеального диода

$$I = I_S (e^{qU/kT} - 1), I = I_S (e^{nkT/qU} - 1),$$

где:

- $I_S = qA(D_{ppn}L_p + D_{nnp}L_n)$ – ток насыщения,
- n – коэффициент неидеальности (1–2),

- AA – площадь перехода,
- $D_p D_p, D_n D_n$ – коэффициенты диффузии,
- $L_p L_p, L_n L_n$ – диффузионные длины.

Графическая интерпретация:

- **Прямая ветвь:** Экспоненциальный рост при $U > 3kT/q$ (≈ 25 мВ при 300 К).
- **Обратная ветвь:** Ток насыщения $I \approx -IS$ до наступления пробоя.

3. Влияние материалов

Параметр	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
n_i (см ⁻³)	2.4×10^{13}	1.5×10^{10}	1.8×10^6
ϕ_0 (В)	0.3	0.7	1.2
IS (А)	10^{-6}	10^{-12}	10^{-18}

4. Температурные зависимости

1. **Прямое напряжение:** Уменьшается на 2 мВ/°С:

$$\frac{dU}{dT} \approx -\frac{\phi_0}{T} - \frac{U}{T}.$$

2. **Обратный ток:** Увеличивается по закону:

$$IS \sim T^3 e^{-E_g/kT},$$

где E_g – ширина запрещённой зоны.

5. Неидеальные эффекты

- **Генерационно-рекомбинационные токи:** В обеднённом слое при $0 < U < \phi_0$.

- **Туннелирование:** Доминирует в сильнолегированных переходах (диоды Зенера).
- **Омические потери:** Сопротивление базы r_{BrV} искажает ВАХ при больших токах.

Контрольные вопросы

1. Вывести уравнение ВАХ из уравнений непрерывности.
2. Объяснить физический смысл коэффициента неидеальности n .
3. Почему $ISIS$ у Ge на 6 порядков выше, чем у Si?
4. Как температура влияет на напряжение пробоя стабилитрона?
5. Сравнить ВАХ диода Шоттки и p-n перехода.

Лабораторная работа №2 Исследование статических вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы:

Исследование статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых диодов, определение их основных параметров и изучение влияния температуры на характеристики.

Теоретическое обоснование

1. Полупроводниковый диод

Полупроводниковый диод — двухэлектродный прибор на основе р-п-перехода или перехода металл-полупроводник (диод Шоттки). Основное свойство — односторонняя проводимость.

2. Вольт-амперная характеристика (ВАХ)

ВАХ описывает зависимость тока I через диод от приложенного напряжения U . Для идеального р-п-перехода справедливо уравнение Шокли:

$$I = I_0(e^{U/\phi T} - 1), I = I_0(e^{qTU/kT} - 1),$$

где:

- I_0 — обратный ток насыщения,
- $\phi T = kT/q$ — температурный потенциал (≈ 26 мВ при 300 К),
- k — постоянная Больцмана,
- q — заряд электрона.

Условия идеализации:

- Отсутствие генерации и рекомбинации в обеднённом слое.
- Низкий уровень инжекции.

3. Особенности реальных диодов:

- **Объёмное сопротивление базы (r_{brb}):** вызывает отклонение ВАХ от идеальной.
- **Эффект модуляции сопротивления базы:** уменьшение r_{brb} при высоком уровне инжекции.
- **Температурная зависимость:**
 - Прямая ветвь: $TKH \approx -2$ мВ/К (падение напряжения уменьшается с ростом температуры).
 - Обратная ветвь: ток термогенерации растёт с температурой.

4. Виды пробоя p-n-перехода:

- **Тепловой:** необратимый, вызван перегревом.
- **Лавинный:** обратимый, возникает при высоком обратном напряжении.
- **Туннельный:** обратимый, характерен для сильно легированных переходов.

5. Диоды Шоттки:

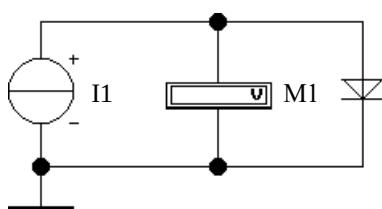
Отличаются от p-n-диодов:

- Меньшим прямым падением напряжения (на 0,2–0,4 В).
- Отсутствием накопления неосновных носителей, что обеспечивает высокое быстродействие.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка схемы

Собрать схему в Electronics Workbench:



- Источник тока (группа *Sources*).
- Диод (библиотека *Motorol1*, тип по табл. 1).

Таблица 1

Номер рабоче го места	Кремниевы е диоды	Диоды Шоттки
1	D1N4933	MBR735
2	D1N4934	MBR745
3	D1N4935	MBR1035
4	D1N5400	MBR1045
5	D1N5401	MBR1535CT
6	D1N5402	MBR1545CT
7	D1N5404	MBR1635
8	D1N5406	MBR1645
9	D1N4933	MBR1035
10	D1N4935	MBR1045

- Вольтметр (группа *Indicators*).

2. Снятие ВАХ

- Для кремниевого диода при $t_1=27^{\circ}\text{C}$ $t_1=27^{\circ}\text{C}$:
 - Задать ток I от 1 мА до 1 А (шаг: 1, 10, 20, 50, 100, 200, 350, 500, 750, 1000 мА).
 - Зафиксировать напряжение U для каждого значения тока.
- Для диода Шоттки: повторить измерения.

- При $t_2=47^\circ\text{C}$ $t_2=47^\circ\text{C}$ (изменить температуру в настройках модели).

3. Обработка результатов

- Построить графики ВАХ для всех случаев в одних осях (масштаб: 0,1 В/см, 0,1 А/см).
- Рассчитать:
 - Дифференциальное сопротивление: $r_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I$ $r_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I$ (по точкам 1 А и 0,75 А).
 - Статическое сопротивление: $R = U/I$ $R = U/I$ при $I=1$ А.
 - ТКС: $\alpha_{\text{Упр}} = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{t_2 - t_1}$ $\alpha_{\text{Упр}} = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{t_2 - t_1}$.

4. Анализ

- Сравнить ВАХ кремниевого диода и диода Шоттки.
- Оценить влияние температуры на параметры.

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Схема эксперимента.
3. Таблицы измерений.
4. Графики ВАХ.
5. Расчёты параметров.
6. Выводы:
 - Отличия р-п-диода и Шоттки.
 - Влияние температуры на ВАХ.
 - Погрешности измерений.

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл уравнения Шокли.
2. Почему ВАХ реального диода отклоняется от идеальной?

3. Как температура влияет на прямой и обратный ток?
4. В чём преимущества диодов Шоттки?
5. Как определить дифференциальное сопротивление по графику ВАХ?

Лабораторная работа №3 Характеристики и параметры биполярного транзистора

1. Цель работы

Исследование статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) и определение его малосигнальных параметров.

2. Теоретическое обоснование

Биполярный транзистор (БТ) — полупроводниковый прибор с тремя слоями чередующейся проводимости (n-p-n или p-n-p), содержащий два взаимодействующих p-n-перехода. Основные области транзистора: эмиттер (сильно легированный, инжектирует носители), база (узкая, управляет потоком носителей) и коллектор (собирает носители).

Режимы работы БТ:

1. **Активный режим** (эмиттерный переход смещён в прямом направлении, коллекторный — в обратном). Используется в усилителях.
2. **Насыщение** (оба перехода смещены в прямом направлении). Применяется в ключевых схемах.
3. **Отсечка** (оба перехода смещены в обратном направлении).
4. **Инверсный активный режим** (коллекторный переход смещён в прямом направлении, эмиттерный — в обратном).

Характеристики транзистора в схеме ОЭ:

- **Входная характеристика:** Зависимость тока базы I_B от напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ при постоянном $U_{КЭ}$.
- **Выходная характеристика:** Зависимость тока коллектора I_K от напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ при постоянном I_B .

Эффект Эрли:

Изменение толщины базы при варьировании $U_{КЭ}$, приводящее к росту I_K с увеличением $U_{КЭ}$. Проявляется в наклоне выходных характеристик.

Параметры транзистора:

- **Коэффициент передачи тока базы (β):** $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B = \Delta I_B / \Delta I_K$.
- **Входное сопротивление ($r_{БЭ}$):** $r_{БЭ} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B = \Delta I_B / \Delta U_{БЭ}$.
- **Выходное сопротивление ($r_{КЭ}$):** $r_{КЭ} = \Delta U_{КЭ} / \Delta I_K = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ}$.

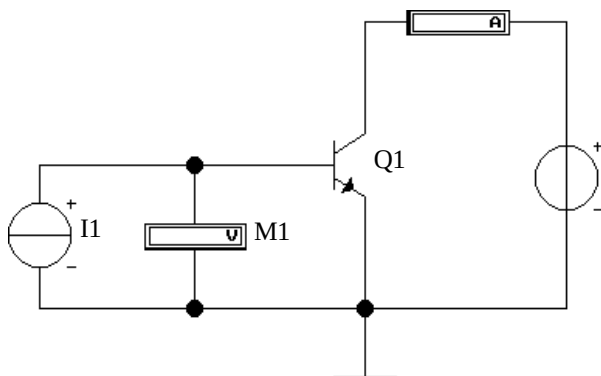
3. Оборудование и ПО

1. Программа **Electronics Workbench** (или аналог — Multisim, LTspice).
2. Биполярный транзистор (например, BC107, BC108B).
3. Источники постоянного напряжения и тока.
4. Резисторы, измерительные приборы (вольтметры, амперметры).

4. Порядок выполнения работы

4.1. Сборка схемы

Собрать схему для исследования БТ в схеме ОЭ:



- Источник напряжения $V1V1$ (0–15 В) подключить между коллектором и эмиттером.
- Источник тока $I1I1$ (0–100 мкА) — между базой и эмиттером.
- Измерить $UБЭUБЭ$ вольтметром $M1M1$, $IКIК$ — амперметром $M2M2$.

4.2. Снятие входных характеристик

1. Установить $UКЭ=0$ $UКЭ=0$ В, варьировать $IБIБ$ от 1 мкА до $IБmaxIБmax$ (при $IК=10$ мА $IК=10$ мА), фиксируя $UБЭUБЭ$.
2. Повторить для $UКЭ=5$ $UКЭ=5$ В.
3. Построить графики $IБ=f(UБЭ)IБ=f(UБЭ)$ для обоих случаев.

4.3. Снятие выходных характеристик

1. Задать $IБ=IБmax/4IБ=IБmax/4$.
2. Изменять $UКЭUКЭ$ от 0.1 до 15 В, записывая $IКIК$.
3. Повторить для $IБ=2IБ1,3IБ1,4IБ1IБ=2IБ1,3IБ1,4IБ1$.
4. Построить семейство кривых $IК=f(UКЭ)IК=f(UКЭ)$.

4.4. Измерение параметров

1. **Коэффициент $\beta\beta$** при $UКЭ=5$ В, $IК=1$ мА $UКЭ=5$ В, $IК=1$ мА:
 - Изменить $IБIБ$ на 5–10%, зафиксировать $\Delta IК\Delta IК$.
 - Рассчитать $\beta=\Delta IК\Delta IБ\beta=\Delta IБ\Delta IК$.
2. **Входное сопротивление $rБЭrБЭ$** при тех же условиях:
 - Измерить $\Delta UБЭ\Delta UБЭ$ при изменении $IБIБ$.
 - Вычислить $rБЭ=\Delta UБЭ\Delta IБrБЭ=\Delta IБ\Delta UБЭ$.
3. **Выходное сопротивление $rКЭrКЭ$** при $IК=1$ мА $IК=1$ мА:
 - Изменить $UКЭUКЭ$ с 5 В до 10 В, зафиксировать $\Delta IК\Delta IК$.
 - Рассчитать $rКЭ=\Delta UКЭ\Delta IКrКЭ=\Delta IК\Delta UКЭ$.

5. Обработка результатов

1. Таблицы с экспериментальными данными.

2. Графики входных и выходных характеристик.
3. Расчётные значения $\beta\beta$, $r_{БЭrБЭ}$, $r_{КЭrКЭ}$.

6. Выводы

1. Анализ влияния $U_{КЭ}U_{КЭ}$ на входные характеристики (сдвиг при $U_{КЭ}>0U_{КЭ}>0$).
2. Объяснение наклона выходных характеристик (эффект Эрли).
3. Сравнение измеренных параметров с типовыми значениями для выбранного транзистора.

7. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлен наклон выходных характеристик БТ?
2. Как влияет температура на $\beta\beta$ и $U_{БЭ}U_{БЭ}$?
3. Почему входное сопротивление БТ в схеме ОЭ мало?
4. Объясните физический смысл эффекта Эрли.

Лабораторная работа №4 Основные характеристики JFET-транзисторов

Цель и содержание работы

Изучение принципов работы, статических и динамических характеристик полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (JFET). Анализ их параметров, схем включения и областей применения.

Теоретическое обоснование

1. Устройство и принцип действия JFET

JFET (Junction Field-Effect Transistor) — полевой транзистор с управляющим р-п-переходом. Основные элементы:

- **Исток (Source, S)** — входной электрод, источник носителей заряда.

- **Сток (Drain, D)** — выходной электрод, собирает носители.
- **Затвор (Gate, G)** — управляющий электрод, формирует р-п-переход с каналом.
- **Канал** — область между истоком и стоком с проводимостью п- или р-типа.

Принцип работы:

Ток между истоком и стоком (I_{DS}) управляется напряжением на затворе (U_{GS}). При подаче обратного напряжения на затвор р-п-переход расширяется, сужая канал и уменьшая I_{DS} .

2. Классификация JFET

- **п-канальные** — канал из полупроводника п-типа.
- **р-канальные** — канал из полупроводника р-типа.

3. Основные параметры JFET

• Статические параметры:

- **Напряжение отсечки ($U_{GS(off)}$)** — напряжение затвор-исток, при котором $I_{DS} \approx 0$.
- **Ток насыщения стока (I_{DSS})** — максимальный ток стока при $U_{GS} = 0$.
- **Крутизна стокзатворной характеристики (S)** — отношение изменения I_{DS} к изменению U_{GS} ($S = \Delta I_{DS} / \Delta U_{GS}$).

• Динамические параметры:

- **Входная ёмкость (C_{iss})** — ёмкость между затвором и истоком.
- **Выходная ёмкость (C_{oss})** — ёмкость между стоком и истоком.

- **Обратная ёмкость (C_{rss})** — ёмкость между затвором и стоком.

4. Вольт-амперные характеристики (ВАХ)

- **Стоковые характеристики:** Зависимость I_{DS} от U_{DS} при фиксированном U_{GS} .
 - **Омическая область** — линейная зависимость I_{DS} от U_{DS} (при малых U_{DS}).
 - **Область насыщения** — I_{DS} почти не зависит от U_{DS} (рабочий режим усилителей).
- **Стокзатворная характеристика:** Зависимость I_{DS} от U_{GS} при $U_{DS} = \text{const}$.

5. Режимы работы JFET

- **Режим обеднения:**
 - $U_{GS} < 0$ (для n-канального), канал сужается.
 - Основной режим для усилителей.
- **Режим насыщения:**
 - $U_{GS} = 0$, ток I_{DS} максимален (I_{DSS}).
- **Режим отсечки:**
 - $U_{GS} \leq U_{GS(off)}$, канал перекрыт.

6. Схемы включения JFET

- **С общим истоком (ОИ):**
 - Высокое усиление по напряжению.
 - Фаза сигнала инвертируется.
- **С общим стоком (ОС):**

- Высокое входное сопротивление, усиление ≈ 1 .
- Повторитель напряжения.
- **С общим затвором (ОЗ):**
 - Низкое входное сопротивление, хорошие частотные свойства.

7. Преимущества JFET перед биполярными транзисторами

- Высокое входное сопротивление (до 10^9 Ом).
- Низкий уровень шумов.
- Термическая стабильность.

8. Применение JFET

- Усилители высокой частоты.
- Аналоговые ключи.
- Входные каскады измерительных приборов.

Аппаратура и материалы

1. Справочники по полевым транзисторам (например, параметры J113, 2N5457).
2. Учебные пособия по полупроводниковой электронике.

Методика выполнения работы

1. Изучить теорию JFET.
2. Записать параметры выбранного транзистора (I_{DSS} , $U_{GS(off)}$, S).
3. Построить семейство стоковых и стокзатворных характеристик.
4. Сравнить n-канальные и p-канальные JFET.

Содержание отчета

1. Титульный лист
2. Теоретическая часть:
 - Устройство и принцип действия JFET.

- Основные параметры и характеристики.
- Схемы включения.

3. Выводы:

- Особенности работы JFET в разных режимах.
- Области применения.

Вопросы для защиты

1. Чем JFET отличается от MOSFET?
2. Как определить крутизну S по ВАХ?
3. Почему в режиме насыщения I_{DS} не зависит от U_{DS} ?
4. Какие преимущества у схемы с общим стоком?
5. Где применяются JFET в радиотехнике?

Лабораторная работа №5 Характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом

1. Цель работы

Исследование статических характеристик полевого транзистора с управляющим р-п-переходом (JFET) и определение его ключевых параметров: крутизны передаточной характеристики, дифференциального сопротивления канала и коэффициента усиления по напряжению.

2. Теоретическое обоснование

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом (JFET) — полупроводниковый прибор, в котором ток канала модулируется поперечным электрическим полем, создаваемым обратносмещённым р-п-переходом затвора.

Конструкция и принцип действия

- **Структура:** Состоит из канала (n- или p-типа) с омическими контактами истока (S) и стока (D), а также p-n-перехода затвора (G) (Рис. 1).
 - **n-канальный JFET:** Канал из слаболегированного n-полупроводника, затвор — p⁺-области.
 - **p-канальный JFET:** Канал из p-полупроводника, затвор — n⁺-области.
- **Принцип работы:**
 - При подаче напряжения $U_{СИ}$ между стоком и истоком через канал течёт ток $I_{СІС}$.
 - Обратное смещение затвора ($U_{ЗИ} < 0$ для n-канального) расширяет обеднённую область p-n-перехода, сужая канал и уменьшая $I_{СІС}$.
 - При $U_{ЗИ} = U_{ЗИ.отс}$ канал полностью перекрывается, и $I_{СІС} \approx 0$.

Режимы работы

1. **Омическая область:** При малых $U_{СИ}$ канал ведёт себя как резистор, $I_{СІС}$ линейно зависит от $U_{СИ}$.
2. **Область насыщения:** При $U_{СИ} \geq U_{СИ.нас} = |U_{ЗИ.отс} - U_{ЗИ}|$ ток $I_{СІС}$ стабилизируется (эффект модуляции длины канала).
3. **Пробой:** При превышении $U_{СИ.max}$ происходит лавинный пробой перехода.

Характеристики и параметры

- **Выходная характеристика:** $I_{СІС} = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$. Показывает переход из омической области в насыщение.

- **Передаточная характеристика:** $IC=f(U_{ЗИ})$ $IC=f(U_{ЗИ})$
) при $U_{СИ}=const$ $U_{СИ}=const$ (Рис. 3). Определяет зависимость тока стока от напряжения затвора.
- **Малосигнальные параметры:**
 - **Крутизна (SS):** $S=\Delta IC/\Delta U_{ЗИ}|_{U_{СИ}=const}$ $S=\Delta U_{ЗИ}/\Delta IC|_{U_{СИ}=const}$
(единицы мА/В).
 - **Выходное сопротивление ($r_{СИ}$):** $r_{СИ}=\Delta U_{СИ}/\Delta IC|_{U_{ЗИ}=const}$ $r_{СИ}=\Delta IC/\Delta U_{СИ}|_{U_{ЗИ}=const}$ (десятки кОм).
 - **Коэффициент усиления (μ):** $\mu=S \cdot r_{СИ}$ $\mu=S \cdot r_{СИ}$.

Температурные эффекты

- При нагреве уменьшается подвижность носителей (снижение IC) и контактная разность потенциалов (рост IC).
- **Термостабильная точка:** Напряжение $U_{ЗИ.Т} \approx U_{ЗИ.отс} + 0.63 В$ $U_{ЗИ.Т} \approx U_{ЗИ.отс} + 0.63 В$, при котором IC не зависит от температуры.

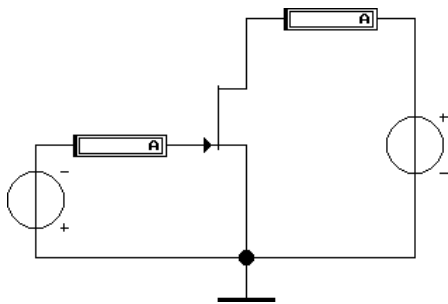
3. Оборудование и ПО

1. Программа **Electronics Workbench** (или аналоги: Multisim, LTspice).
2. Полевой транзистор (например, J112, BF245).
3. Источники постоянного напряжения ($V1$ для $U_{ЗИ}$, $V2$ для $U_{СИ}$).
4. Миллиамперметр для измерения IC , вольтметр для $U_{ЗИ}$.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Сборка схемы

Собрать схему:



- Затвор подключён к источнику $V1$ ($0...10$ В).
- Сток — к $V2$ ($0...25$ В), исток заземлён.
- Измерить I_C (амперметр $M2$), $U_{ЗИ}$ (вольтметр $M1$).

4.2. Измерение начального тока стока

1. Установить $U_{ЗИ}=0$ В, $U_{СИ}=15$ В.
2. Зафиксировать $I_{C.нач}$.

4.3. Определение напряжения отсечки

1. При $U_{СИ}=15$ В увеличивать $|U_{ЗИ}|$ до $I_C \approx 0$.
2. Записать $U_{ЗИ.отс}$ с точностью 0.01 В.

4.4. Измерение тока затвора

1. При $U_{ЗИ}=U_{ЗИ.отс}$ измерить I_Z (единицы нА).
2. Рассчитать входное сопротивление: $R_{ЗИ}=U_{ЗИ.отс}/I_Z$.

4.5. Снятие передаточной характеристики

1. При $U_{СИ}=15$ В изменять $U_{ЗИ}$ от 0 до $U_{ЗИ.отс}$:
 - Шаг 0.5 В при $I_C > 500$ мкА.
 - Шаг 0.2 В при $I_C < 500$ мкА.
2. Построить график $I_C = f(U_{ЗИ})$.

4.6. Снятие выходных характеристик

1. Задать $U_{ЗИ}=0, U_{ЗИ.отс}/4, U_{ЗИ.отс}/2, 3U_{ЗИ.отс}/4$.
2. Для каждого $U_{ЗИ}$ варьировать $U_{СИ}$ от 0 до 25 В:

- Шаг 1 В при $U_{СИ} < 10 В$ $U_{СИ} < 10 В$.
- Шаг 5 В при $U_{СИ} \geq 10 В$ $U_{СИ} \geq 10 В$.

3. Построить семейство кривых $I_C = f(U_{СИ})$ $I_C = f(U_{СИ})$.

4.7. Определение крутизны

1. При $U_{СИ} = 15 В$ $U_{СИ} = 15 В$ установить $I_C \approx I_{C.нач}/2$ $I_C \approx I_{C.нач}/2$.
2. Изменить $U_{ЗИ}$ $U_{ЗИ}$ на 5–10%, зафиксировать ΔI_C ΔI_C .
3. Рассчитать $S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ}$ $S = \Delta U_{ЗИ} / \Delta I_C$.

4.8. Измерение $r_{СИ}$ $r_{СИ}$

1. При $I_C \approx I_{C.нач}/2$ $I_C \approx I_{C.нач}/2$ увеличить $U_{СИ}$ $U_{СИ}$ с 15 В до 25 В.
2. Записать ΔI_C ΔI_C , вычислить $r_{СИ} = 10 В / \Delta I_C$ $r_{СИ} = \Delta I_C / 10 В$.

4.9. Расчёт коэффициента усиления

Вычислить $\mu = S \cdot r_{СИ}$ $\mu = S \cdot r_{СИ}$.

5. Обработка результатов

1. Таблицы с данными измерений.
2. Графики:
 - Передаточная характеристика.
 - Семейство выходных характеристик.
3. Расчётные значения S , $r_{СИ}$ $r_{СИ}$, μ .

6. Выводы

1. Анализ формы характеристик (линейность передаточной, наклон выходных).
2. Сравнение $U_{ЗИ.отс}$ $U_{ЗИ.отс}$, $I_{C.нач}$ $I_{C.нач}$ с паспортными данными.
3. Обсуждение влияния эффекта модуляции длины канала на $r_{СИ}$ $r_{СИ}$.

7. Контрольные вопросы

1. Чем отличается JFET от МДП-транзистора?

2. Почему в режиме насыщения IC_{IC} слабо зависит от $U_{СИ}$ $U_{СИ}$?
3. Как температура влияет на $U_{ЗИ}$. от $U_{ЗИ}$. от $U_{ЗИ}$?
4. Объясните физический смысл крутизны.

Лабораторная работа №6 Физические принципы работы и статические характеристики полупроводниковых приборов

Цель и содержание работы

Исследование физических основ работы полупроводниковых приборов и их статических характеристик. Анализ принципов действия р-п-перехода, биполярных и полевых транзисторов.

Теоретическое обоснование

1. Физические основы полупроводников

Полупроводники - материалы с удельным сопротивлением между проводниками и диэлектриками. Их свойства определяются зонной структурой:

- Валентная зона (заполнена электронами)
- Запрещенная зона (энергетический барьер)
- Зона проводимости (свободные электроны)

Ключевые понятия:

- Собственная проводимость (равное количество электронов и дырок)
- Примесная проводимость:
 - Донорные примеси (n-тип)
 - Акцепторные примеси (р-тип)

2. р-п-переход и его свойства

Образуется при контакте полупроводников р- и n-типов. Характеристики:

- Встроенное поле контактной разности потенциалов
- Ширина обедненного слоя
- Вольт-амперная характеристика:
 - Прямое включение (экспоненциальный рост тока)
 - Обратное включение (малый обратный ток)
 - Пробой (лавинный, туннельный, тепловой)

3. Полупроводниковые диоды

Основные типы:

- Выпрямительные
- Стабилитроны
- Варикапы
- Светодиоды
- Фотодиоды

Статические параметры:

- Прямое падение напряжения
- Обратный ток
- Емкость перехода
- Максимальные напряжения и токи

4. Биполярные транзисторы (БТ)

Принцип действия основан на инжекции неосновных носителей через эмиттерный переход и их собирании коллекторным переходом.

Статические характеристики:

- Входные ($I_{Б} = f(U_{БЭ})$)
- Выходные ($I_{К} = f(U_{КЭ})$)
- Передаточные ($I_{К} = f(I_{Б})$)

Основные параметры:

- Коэффициент передачи тока (β)
- Обратные токи переходов
- Напряжения насыщения

5. Полевые транзисторы

Классификация:

1. С управляющим р-п-переходом (JFET)
2. С изолированным затвором (MOSFET)

Статические параметры:

- Напряжение отсечки
- Ток насыщения
- Крутизна характеристики
- Входное сопротивление

6. Методы измерения статических характеристик

- Точечный метод
- Осциллографический метод
- Использование характеристиографов

Аппаратура и материалы

1. Справочники по полупроводниковым приборам
2. Учебные пособия по физике полупроводников
3. Характеристики типовых приборов

Методика выполнения работы

1. Изучить теоретический материал
2. Записать основные параметры исследуемых приборов
3. Проанализировать типовые статические характеристики

4. Сравнить параметры различных классов приборов

Содержание отчета

1. Титульный лист
2. Теоретическая часть:
 - Физические основы работы полупроводников
 - Принцип действия р-п-перехода
 - Характеристики диодов
 - Статические параметры транзисторов
3. Выводы:
 - Сравнительный анализ характеристик
 - Области применения приборов

Вопросы для защиты

1. Объясните механизм образования р-п-перехода
2. Чем отличается прямая и обратная ветви ВАХ диода?
3. Каков физический смысл коэффициента β в БТ?
4. В чем отличие статических характеристик JFET и MOSFET?
5. Как измеряют статические характеристики полупроводниковых приборов?

Лабораторная работа №7 Характеристики и параметры полевых мдп-транзисторов с индуцированным каналом

1. Цель работы

Исследование статических характеристик и определение основных параметров полевых МДП-транзисторов (MOSFET) с индуцированным каналом, включая пороговое напряжение, крутизну передаточной характеристики и выходное сопротивление.

2. Теоретическое обоснование

2.1. Конструкция и принцип действия

МДП-транзистор (металл-диэлектрик-полупроводник) с индуцированным каналом состоит из:

- **Подложки** (р-типа для n-канального транзистора).
- **Областей истока и стока** (n+-типа), созданных диффузией или ионной имплантацией.
- **Диэлектрического слоя** (SiO_2 толщиной < 0.1 мкм).
- **Металлического затвора**, расположенного над каналом.

Принцип работы:

1. При $U_{ЗИ}=0$ ток стока $I_{С}$ отсутствует (канал не сформирован).
2. При подаче $U_{ЗИ} > U_{ЗИ.пор}$ (пороговое напряжение) в приповерхностном слое подложки индуцируется канал n-типа, и возникает ток $I_{С}$.
3. Ток $I_{С}$ регулируется напряжением $U_{ЗИ}$ и зависит от $U_{СИ}$:
 - **Омическая область:** $I_{С}$ линейно растёт с $U_{СИ}$ (канал ведёт себя как резистор).
 - **Область насыщения:** При $U_{СИ} \geq U_{ЗИ} - U_{ЗИ.пор}$ ток $I_{С}$ стабилизируется (эффект модуляции длины канала).

2.2. Характеристики и параметры

- **Выходные характеристики:** $I_{С} = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$. Показывают переход из омической области в насыщение.
- **Передаточная характеристика:** $I_{С} = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$. Квадратичная зависимость в режиме насыщения.
- **Малосигнальные параметры:**

- **Крутизна (SS):** $S = \Delta I_C \Delta U_{ЗИ} | U_{СИ} = \text{const} S = \Delta U_{ЗИ} \Delta I_C U_{СИ} = \text{const}$
(характеризует управляющую способность затвора).
- **Выходное сопротивление ($r_{СИ} r_{СИ}$):** $r_{СИ} = \Delta U_{СИ} \Delta I_C | U_{ЗИ} = \text{const} r_{СИ} = \Delta I_C \Delta U_{СИ} U_{ЗИ} = \text{const}$
(определяет наклон характеристик в насыщении).
- **Коэффициент усиления (μ):** $\mu = S \cdot r_{СИ} \mu = S \cdot r_{СИ}$.

2.3. Влияние подложки

При подаче отрицательного напряжения на подложку (относительно истока):

- Увеличивается $U_{ЗИ.пор}$ (сдвиг передаточной характеристики вправо).
- Снижается крутизна из-за уменьшения подвижности носителей.

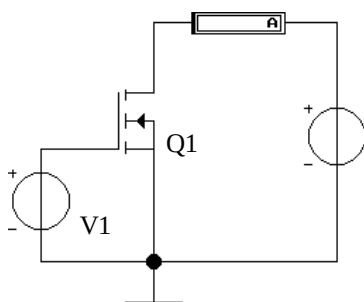
3. Оборудование и ПО

1. Программа **Electronics Workbench** (или аналог: LTspice, Multisim).
2. МДП-транзистор (например, 2N7000, ZVN3306).
3. Источники напряжения:
 - V1: 0...10 В (затвор-исток).
 - V2: 0...60 В (сток-исток).
4. Измерительные приборы: миллиамперметр, вольтметр.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Сборка схемы

Собрать схему:



- Затвор подключён к V_1V_1 , сток — к V_2V_2 , исток и подложка заземлены.
- Измерить I_{CIC} (амперметр $M1M1$), $U_{ЗИ}U_{ЗИ}$ (вольтметр $M2M2$).

4.2. Определение порогового напряжения

1. Установить $U_{СИ}=30 В$ $U_{СИ}=30В$.
2. Плавно увеличивать $U_{ЗИ}U_{ЗИ}$ от 0 В до появления тока $I_C \geq 1 мА$ $I_C \geq 1мА$.
3. Зафиксировать $U_{ЗИ.пор}U_{ЗИ.пор}$ с точностью 0.01 В.

4.3. Снятие передаточной характеристики

1. При $U_{СИ}=30 В$ $U_{СИ}=30В$ изменять $U_{ЗИ}U_{ЗИ}$ от $U_{ЗИ.пор}U_{ЗИ.пор}$ до значения, при котором $I_C=200 мА$ $I_C=200мА$.
2. Шаг изменения:
 - 0.1 В при $I_C < 50 мА$ $I_C < 50мА$.
 - 0.5 В при $I_C \geq 50 мА$ $I_C \geq 50мА$.
3. Построить график $I_C=f(U_{ЗИ})$ $I_C=f(U_{ЗИ})$.

4.4. Снятие выходных характеристик

1. Задать $U_{ЗИ}U_{ЗИ}$ согласно варианту.

№	Тип транзистора	Напряжения затвор-исток			
		$U_{ЗИ1}, В$	$U_{ЗИ2}, В$	$U_{ЗИ3}, В$	$U_{ЗИ4}, В$
1	2N7000	3,1	3,4	3,7	4,0
2	2N7002	3,1	3,4	3,7	4,0
3	BS170	2,8	3,2	3,6	4,0
4	VN10LF	2,8	3,2	3,6	4,0

5	ZVN0124	1,9	2,1	2,3	2,5
6	ZVN2106	1,9	2,1	2,3	2,5
7	ZVN3306	2,8	3,2	3,6	4,0
8	ZVN3310	2,6	3,0	3,4	3,8
9	ZVN4106	3,1	3,4	3,7	4,0
10	ZVN4210	2,2	2,3	2,4	2,5

2. Для каждого УЗИУЗИ изменить УСИУСИ от 0 до 60 В:

- Шаг 0.5 В при $U_{СИ} < 2 В$ $U_{СИ} < 2 В$.
- Шаг 10 В при $U_{СИ} \geq 10 В$ $U_{СИ} \geq 10 В$.

3. Построить семейство кривых $I_C = f(U_{СИ})$ $I_C = f(U_{СИ})$.

4.5. Измерение крутизны

1. При $U_{СИ} = 30 В$ $U_{СИ} = 30 В$ установить $I_C = 100 мА$ $I_C = 100 мА$ регулировкой УЗИУЗИ.
2. Изменить УЗИУЗИ на 5–10%, зафиксировать $\Delta I_C \Delta I_C$.
3. Рассчитать $S = \Delta I_C \Delta U_{ЗИ} S = \Delta U_{ЗИ} \Delta I_C$.

4.6. Определение $r_{СИ} r_{СИ}$

1. При $I_C = 100 мА$ $I_C = 100 мА$ увеличить $U_{СИ} U_{СИ}$ с 30 В до 40 В.
2. Записать $\Delta I_C \Delta I_C$, вычислить $r_{СИ} = 10 В \Delta I_C r_{СИ} = \Delta I_C 10 В$.

5. Обработка результатов

1. Таблицы с экспериментальными данными.
2. Графики:
 - Передаточная характеристика.
 - Выходные характеристики для 4 значений УЗИУЗИ.
3. Расчёт параметров: $U_{ЗИ.пор} U_{ЗИ.пор}$, SS , $r_{СИ} r_{СИ}$, μ .

6. Выводы

1. Сравнение $U_{ЗИ.пор}$ с паспортными данными транзистора.
2. Анализ формы характеристик:
 - Линейность передаточной характеристики при малых $U_{СИ}$.
 - Наклон выходных характеристик в области насыщения.
3. Обсуждение влияния эффекта модуляции длины канала на $r_{СИ}$.

7. Контрольные вопросы

1. Чем отличается МДП-транзистор с индуцированным каналом от транзистора со встроенным каналом?
2. Почему в режиме насыщения $I_{СI}$ слабо зависит от $U_{СИ}$?
3. Как напряжение на подложке влияет на $U_{ЗИ.пор}$?

Лабораторная работа №8 Принцип работы и статические характеристики каскада с общим эмиттером (ОЭ)

Цель и содержание работы

Исследовать принцип работы и статические характеристики транзисторного каскада с общим эмиттером (ОЭ). Рассмотреть его ключевые параметры, режимы работы и влияние элементов схемы на его характеристики.

Теоретическое обоснование

1. Общие сведения о транзисторных каскадах

Транзисторные каскады являются основными усилительными элементами в аналоговой электронике. В зависимости от схемы включения транзистора различают три основных типа каскадов:

- с **общим эмиттером (ОЭ)** – обеспечивает усиление по току и напряжению;
- с **общей базой (ОБ)** – усиливает только напряжение;

- с **общим коллектором (ОК)** – усиливает ток, но не напряжение (эмиттерный повторитель).

Наибольшее распространение получил каскад с ОЭ благодаря высокому коэффициенту усиления и универсальности.

2. Принцип работы каскада с ОЭ

Каскад с общим эмиттером строится на биполярном транзисторе (БТ) **n-p-n** или **p-n-p** типа. В схеме ОЭ:

- **эмиттер** является общей точкой для входной и выходной цепи;
- **база** – входной электрод;
- **коллектор** – выходной электрод.

Режимы работы транзистора в каскаде ОЭ:

1. **Активный режим** – транзистор открыт, работает как усилитель.
2. **Режим отсечки** – транзистор закрыт (нет тока базы).
3. **Режим насыщения** – транзистор полностью открыт (максимальный ток коллектора).

3. Статические характеристики каскада с ОЭ

Статические характеристики описывают зависимость токов и напряжений в схеме при постоянном входном сигнале.

Основные характеристики:

1. **Входная характеристика** – зависимость тока базы $I_{Б}$ от напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ при фиксированном $U_{КЭ}$.
2. **Выходная характеристика** – зависимость тока коллектора $I_{К}$ от напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ при фиксированном $I_{Б}$.
3. **Передаточная характеристика** – зависимость $I_{К}$ от $I_{Б}$.

Коэффициенты усиления:

- **Коэффициент усиления по току** $h_{21\varepsilon} = \beta = \Delta I_k \Delta I_b$ $h_{21\varepsilon} = \beta = \Delta I_b \Delta I_k$.
- **Коэффициент усиления по напряжению** $K_u = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$ $K_u = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta U_{\text{вых}}$.

4. Влияние элементов схемы на работу каскада

- **Резистор в цепи коллектора R_k** – определяет коэффициент усиления и выходное сопротивление.
- **Резистор в цепи эмиттера R_ε** – стабилизирует режим работы за счет отрицательной обратной связи.
- **Разделительные конденсаторы C_1, C_2** – пропускают переменный сигнал, блокируя постоянную составляющую.

5. Достоинства и недостатки каскада с ОЭ

Достоинства:

- Высокий коэффициент усиления по току и напряжению.
- Широкое применение в усилителях и генераторах.

Недостатки:

- Зависимость параметров от температуры.
- Нелинейность характеристик при больших сигналах.

Методика и порядок выполнения работы

1. Изучить теоретические основы работы каскада с ОЭ.
2. Рассмотреть статические характеристики транзистора в схеме ОЭ.
3. Проанализировать влияние элементов схемы на параметры каскада.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Краткое описание принципа работы каскада с ОЭ.
2. Графики статических характеристик с пояснениями.
3. Анализ влияния элементов схемы на работу каскада.
4. Выводы по работе.

Вопросы для защиты работы

1. Какие существуют схемы включения транзистора?
2. В чем особенность каскада с общим эмиттером?
3. Какие статические характеристики имеет каскад с ОЭ?
4. Как влияет резистор $R_{Э}R_{Э}$ на стабильность работы каскада?
5. Какие основные коэффициенты усиления характеризуют каскад с ОЭ?
6. Каковы достоинства и недостатки схемы с ОЭ?

Лабораторная работа №9 Усилители на биполярных транзисторах.

Каскад с общим эмиттером

1. Цель работы

Исследование характеристик и параметров усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ), изучение влияния отрицательной обратной связи на параметры усилителя и освоение методик измерения основных характеристик усилительных каскадов.

2. Теоретическое обоснование

2.1. Основные параметры усилителей

Усилитель — устройство, увеличивающее мощность входного сигнала за счёт энергии источника питания. Основные параметры:

- **Коэффициент усиления:**

- По напряжению: $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ $K_U = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}$

- По току: $K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}, K_I = I_{\text{вх}} / I_{\text{вых}}$
- По мощности: $K_P = K_U \cdot K_I, K_P = K_U \cdot K_I$
- **Входное сопротивление:** $r_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}, r_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}$
- **Выходное сопротивление:** $r_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(R_H = \infty) - U_{\text{вых}}(R_H) / I_{\text{вых}}(R_H) - U_{\text{вых}}(R_H) / U_{\text{вых}}(R_H = \infty) - U_{\text{вых}}(R_H)$

2.2. Частотные характеристики

- **Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ):**
Зависимость $K_U(f)$.
- **Фазочастотная характеристика (ФЧХ):** Зависимость $\phi(f)$.
- **Граничные частоты:**
 - Нижняя f_H — частота, на которой K_U снижается до 0.707 от максимального.
 - Верхняя f_V — аналогично для высоких частот.

2.3. Обратная связь в усилителях

- **Отрицательная обратная связь (ООС):**
 - Уменьшает K_U , но повышает стабильность, расширяет полосу пропускания и снижает нелинейные искажения.
 - В каскаде с ОЭ реализуется через резистор $R_{\text{Э}}$ в цепи эмиттера.
- **Виды ООС:**
 - По напряжению (параллельная).
 - По току (последовательная).

2.4. Каскад с общим эмиттером

- **Транзистор VT:** Усилительный элемент.

- Делитель R_{B1}, R_{B2} : Задаёт режим по постоянному току.
- Резистор $R_{ЭРЭ}$: Стабилизирует ток коллектора через ООС.
- Конденсатор $C_{ЭСЭ}$: Шунтирует $R_{ЭРЭ}$ по переменному току, исключая снижение $K_{УКУ}$.
- Разделительные конденсаторы $C_B, C_{КСБ}, C_K$: Исключают влияние источника сигнала и нагрузки на режим по постоянному току.

Режим работы:

- Напряжение $U_{КЭ0}$ выбирается из условия $U_{КЭ0} \approx E/2$ для максимальной амплитуды выходного сигнала.
- Ток делителя $I_D = (3 \dots 10) \cdot I_{БД} = (3 \dots 10) \cdot I_B$ для стабильности режима.

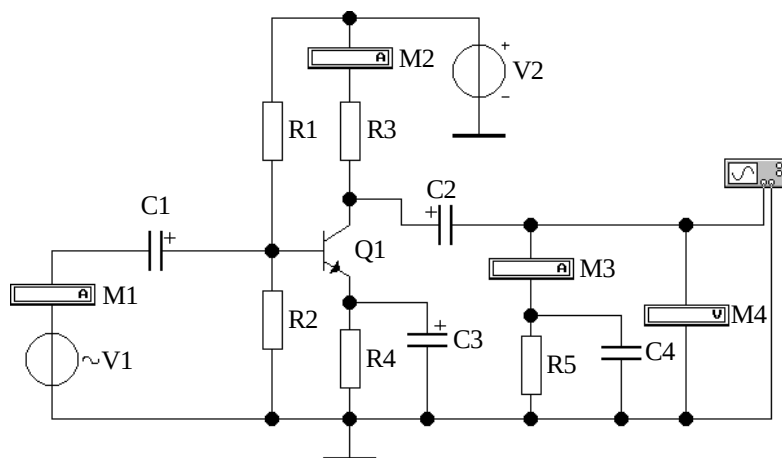
3. Оборудование и ПО

1. Программа **Electronics Workbench** (или аналог: Multisim, LTspice).
2. Биполярный транзистор (например, BC107, BC108B).
3. Резисторы, конденсаторы согласно варианту (Табл. 1).
4. Источники питания:
 - V1V1: Генератор сигналов (7 мВ, 1 кГц).
 - V2V2: Источник постоянного напряжения (12 В).
5. Измерительные приборы:
 - Вольтметры, амперметры (AC/DC).
 - Осциллограф для контроля формы сигнала.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Сборка схемы

Собрать схему усилителя с параметрами из Таблицы:



№	Тип транзистора	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, Ом	R5, кОм	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, нФ
1	BC107	82	10	1,8	110	3,6	5	1	500	6,8
2	BC107A	82	11	2,0	120	3,9	5	1	500	6,2
3	BC107B	82	9,1	2,2	130	4,3	5	2	200	5,6
4	BC108B	82	9,1	2,4	150	5,1	5	1	200	5,1
5	BC394	82	10	2,7	160	5,1	5	1	200	4,7
6	BF258	75	11	3,0	180	6,2	5	1	200	4,7
7	BSS71	82	10	3,3	200	6,2	5	1	200	3,9
8	BSS72	91	11	3,6	220	6,8	5	1	200	3,6
9	BSS73	91	11	3,9	240	7,5	5	1	200	3,3
10	BSSS71	91	12	4,3	270	9,1	5	1	200	3,0

- Подключить делитель R_{B1}, R_{B2} , резисторы R_K, R_E , конденсаторы C_B, C_K, C_E .
- Настроить генератор $V1$: $U_{вх}=7\text{ мВ}$, $f=1\text{ кГц}$.

4.2. Измерение коэффициента усиления

1. Установить $U_{\text{вых}} \approx 1 \text{ В}$ $U_{\text{вых}} \approx 1 \text{ В}$ регулировкой $U_{\text{вх}}$ $U_{\text{вх}}$.
2. Проверить отсутствие искажений сигнала на осциллографе.
3. Рассчитать $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ $K_U = U_{\text{вх}} / U_{\text{вых}}$.

4.3. Определение K_I и K_P

1. Измерить $I_{\text{вх}}$ $I_{\text{вх}}$ (амперметр М1М1), $I_{\text{вых}}$ $I_{\text{вых}}$ (амперметр М3М3).
2. Вычислить $K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$ $K_I = I_{\text{вх}} / I_{\text{вых}}$, $K_P = K_U \cdot K_I$ $K_P = K_U \cdot K_I$.

4.4. Измерение $r_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вых}}$

1. Рассчитать $r_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$ $r_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}$.
2. Для $r_{\text{вых}}$:
 - Измерить $U_{\text{вых}}$ без нагрузки ($R_H = \infty$).
 - Подключить R_H , зафиксировать $U_{\text{вых}}(R_H)$ и $I_{\text{вых}}(R_H)$.
 - Вычислить по формуле: $r_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(\infty) - U_{\text{вых}}(R_H) / I_{\text{вых}}(R_H)$ $r_{\text{вых}} = I_{\text{вых}}(R_H) / U_{\text{вых}}(\infty) - U_{\text{вых}}(R_H)$.

4.5. Определение граничных частот

1. **Нижняя f_H :** Уменьшать f генератора до снижения $U_{\text{вых}}$ до 0.707 от значения на 1 кГц.
2. **Верхняя f_V :** Аналогично увеличивать f .

4.6. Исследование ООС

1. Отключить СЭС, повторить пп. 4.2–4.5.
2. Сравнить параметры с исходными.

5. Обработка результатов

1. Таблицы с измеренными и расчётными значениями:

Параметр	Без ООС	С ООС
----------	---------	-------

K_{UKU}

$f_H, f_B/f_H, f_B$

$g_{BX}g_{BX}$

2. Графики:

- Осциллограммы входного/выходного сигналов.
- АЧХ (при наличии данных для разных частот).

6. Выводы

1. Сравнение K_{UKU} , $g_{BX}g_{BX}$, $g_{ВХ}g_{ВХ}$ с ООС и без неё.
2. Анализ влияния ООС на полосу пропускания (f_H/f_H , f_B/f_B).
3. Объяснение стабилизирующей роли $R_{ЭРЭ}$ в режиме по постоянному току.

7. Контрольные вопросы

1. Как разделительные конденсаторы влияют на работу усилителя?
2. Почему $U_{КЭ0}U_{КЭ0}$ выбирают близким к $E/2E/2$?
3. Как ООС через $R_{ЭРЭ}$ стабилизирует ток коллектора?
4. Чем обусловлены частотные искажения в каскаде с ОЭ?

Лабораторная работа №10 Усилители на JFET и МДП-транзисторах с индуцированным каналом

Цель и содержание работы

Исследовать принцип работы, характеристики и особенности применения усилителей на полевых транзисторах:

- JFET (Junction Field-Effect Transistor) – транзисторах с управляющим р-п-переходом;
- МДП-транзисторах (металл-диэлектрик-полупроводник) с индуцированным каналом (MOSFET).

Рассмотреть их статические и динамические параметры, схемы включения и области применения.

Теоретическое обоснование

1. Общие сведения о полевых транзисторах

Полевые транзисторы (FET) – полупроводниковые приборы, управляемые электрическим полем. В отличие от биполярных транзисторов, они имеют высокое входное сопротивление и малую мощность управления.

Основные типы:

1. **JFET (Junction FET)** – с управляющим р-п-переходом.
2. **MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET)** – с изолированным затвором (МДП-структура).

2. Усилители на JFET

2.1. Принцип работы JFET

JFET имеет три электрода:

- **Исток (Source, S)** – входной электрод.
- **Сток (Drain, D)** – выходной электрод.
- **Затвор (Gate, G)** – управляющий электрод.

Режимы работы:

- **Режим обеднения** – при подаче обратного напряжения на затвор.
- **Режим обогащения** – в JFET практически не используется.

2.2. Схема усилителя на JFET с общим истоком (ОИ)

Аналогична схеме с общим эмиттером у биполярных транзисторов.

Характеристики:

- Высокое входное сопротивление.
- Умеренное усиление по напряжению.
- Низкий уровень шумов.

3. Усилители на MOSFET с индуцированным каналом

3.1. Принцип работы MOSFET

MOSFET с индуцированным каналом не имеет проводящего канала в отсутствие напряжения на затворе. Канал индуцируется при подаче напряжения.

Режимы работы:

- **Режим отсечки** – при $U_{зи} < U_{порог}$
- **Режим насыщения** – при $U_{зи} > U_{порог}$

3.2. Схема усилителя на MOSFET с общим истоком

Особенности:

- Крайне высокое входное сопротивление.
- Высокое усиление по напряжению.
- Широкое применение в цифровых и аналоговых схемах.

4. Сравнение JFET и MOSFET

Параметр	JFET	MOSFET с индуцированным каналом
Управление	p-n-переходом	Электрическим полем
Входное сопротивление	Высокое ($\approx 10^9$ Ом)	Очень высокое ($\approx 10^{12}$ Ом)
Чувствительность к ESD	Умеренная	Высокая
Применение	Аналоговые усилители	Цифровые схемы, усилители

5. Основные параметры усилителей на FET

1. **Крутизна характеристики (S)** – отношение изменения тока стока к изменению напряжения затвор-исток.
2. **Входная и выходная емкости** – влияют на частотные свойства.
3. **Напряжение отсечки (для JFET) / пороговое напряжение (для MOSFET).**

6. Области применения

- Микрофонные и высокочастотные усилители (JFET).
- Цифровые микросхемы, процессоры (MOSFET).
- Силовая электроника (MOSFET).

Методика и порядок выполнения работы

1. Изучить принцип работы JFET и MOSFET.
2. Рассмотреть схемы усилителей на этих транзисторах.
3. Проанализировать их характеристики и параметры.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Описание принципа работы JFET и MOSFET.
2. Сравнительную таблицу их параметров.
3. Анализ схем усилителей на FET.
4. Выводы по работе.

Вопросы для защиты работы

1. Чем JFET отличается от MOSFET?
2. Каковы основные характеристики усилителя на JFET?
3. Как работает MOSFET с индуцированным каналом?
4. Какие преимущества имеют усилители на FET перед биполярными?
5. Где применяются усилители на полевых транзисторах?

Лабораторная работа №11 Исследование усилителей на полевых транзисторах

Цель работы

Изучение принципов построения, характеристик и параметров усилительных каскадов на полевых транзисторах с управляющим *р-п*-переходом.

Экспериментальное исследование каскадов с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ), включая измерение коэффициентов усиления, входного/выходного сопротивлений и частотных характеристик.

Теоретическое обоснование

1. Классификация усилительных каскадов

В зависимости от электрода, общего для входной и выходной цепей, различают три схемы включения:

- **С общим истоком (ОИ):** Аналог биполярного каскада с общим эмиттером. Характеризуется высоким входным сопротивлением, значительным усилением по напряжению и инверсией фазы сигнала.
- **С общим стоком (ОС) (истоковый повторитель):** Аналог эмиттерного повторителя. Обеспечивает усиление по току, низкое выходное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению, близкий к 1.
- **С общим затвором (ОЗ):** Имеет низкое входное сопротивление и применяется редко, преимущественно в каскодных схемах.

2. Принцип работы каскада с общим истоком:

- Входной сигнал подается на затвор через разделительный конденсатор $C_{ЗСЗ}$.
- Напряжение смещения $U_{ЗИ0}$ задает рабочую точку на линейном участке сток-затворной характеристики (Рис. 32).
- Автоматическое смещение реализуется резистором $R_{ИИ}$ в цепи истока:
 $R_{ИИ} = U_{ЗИ0} / I_C$, $R_{ИИ} = I_C / U_{ЗИ0}$.
- Конденсатор $C_{ИИ}$ шунтирует $R_{ИИ}$ по переменному току, исключая отрицательную обратную связь.

Параметры каскада:

- **Входное сопротивление:** $r_{BX} = R_3$ ($0.5 - 10 \text{ МОм}$).
- **Выходное сопротивление:** $r_{ВЫХ} \approx R_C$.
- **Коэффициент усиления по напряжению:**
 $K_E = -S \cdot (r_{СИ} \parallel R_C) \cdot \xi_{BX} \cdot \xi_{ВЫХ}$,
 $K_E = -S \cdot (r_{СИ} \parallel R_C) \cdot \xi_{BX} \cdot \xi_{ВЫХ}$,
где S — крутизна транзистора, ξ_{BX} , $\xi_{ВЫХ}$ — коэффициенты передачи входной и выходной цепей.

3. Частотные характеристики

- **Низкие частоты:** Определяются постоянными времени $\tau_{H1}=C3(R_{\Gamma}+R3)$, $\tau_{H2}=CC(RC+R_H)$, $\tau_{H3}=C_{II}/S$.
- **Высокие частоты:** Ограничены эффектом Миллера. Входная емкость: $C_{BX}=C_{3II}+(1+K_U)C3C$.

4. Каскад с общим стоком

- Сигнал снимается с истока через R_{II} .
- Коэффициент усиления:
 $K_{E_{xx}}=S R_{II}/(1+S R_{II})$.
- Выходное сопротивление:
 $r_{B_{IX}}=R_{II}/(1+S R_{II})$.

Экспериментальная часть

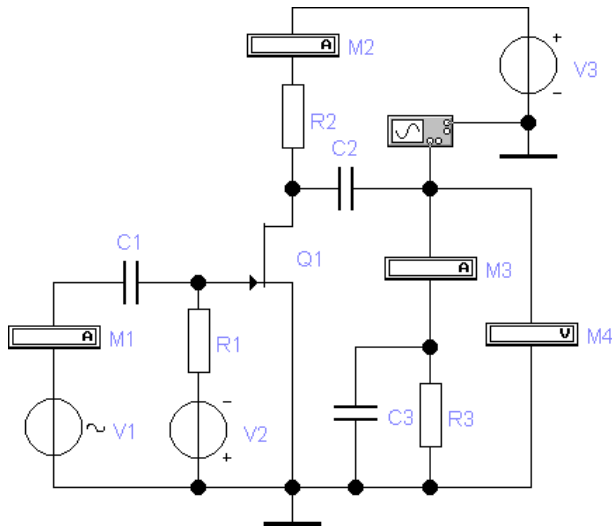
1. Исследование каскада с общим истоком

Оборудование:

- Программа *Electronics Workbench*.
- Транзистор (тип из Табл. 6, например, BF244B).
- Резисторы: $R1=1\text{ МОм}$, $R2=15\text{ кОм}$, $R3=22\text{ кОм}$.
- Конденсаторы: $C1=0.1\text{ мкФ}$, $C2=0.091\text{ мкФ}$, $C3=12\text{ пФ}$.

Порядок выполнения:

1. Собрать схему:



2. Настроить источник $V1$: $U_{BX}=75\text{ мВ}$, $f=1\text{ кГц}$.

3. Установить ток стока $I_C=430\text{ мкА}$ регулировкой $V2$.

4. Измерить $K_U=U_{ВХ}/U_{ВХ}$ при $U_{ВХ}=1\text{ В}$. Проверить отсутствие искажений осциллографом.

5. Рассчитать $K_I=I_{ВХ}/I_{ВХ}$, $K_P=K_U \cdot K_I$, $r_{ВХ}=U_{ВХ}/I_{ВХ}$.

6. Определить $r_{ВХ}$ по формуле:

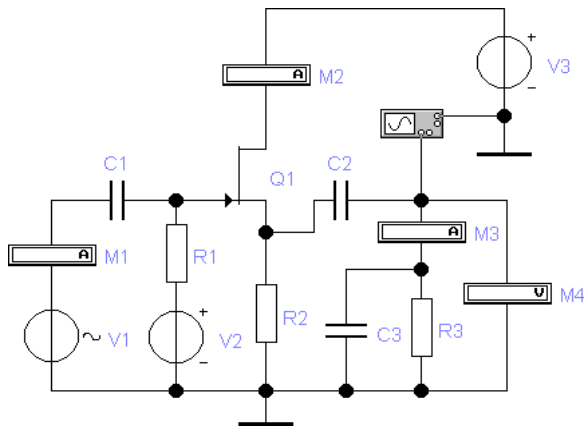
$$r_{ВХ} = R_C \left(\frac{U_{ВХ}}{U_{ВХ}} - 1 \right), r_{ВХ} = R_C \left(\frac{U_{ВХ}}{U_{ВХ}} - 1 \right),$$

где $U_{ВХ}$ — напряжение без нагрузки.

7. Найти верхнюю граничную частоту $f_{В}$ при снижении $U_{ВХ}$ до 0.707 от исходного значения.

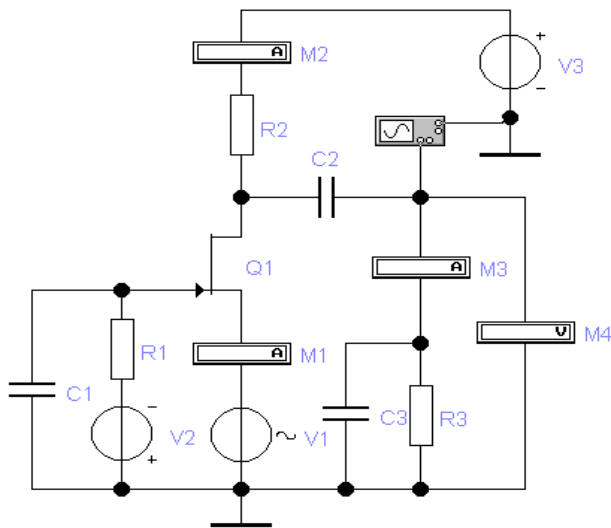
2. Исследование каскадов с ОС и ОЗ

Повторить измерения для схем с аналогичными параметрами.



Результаты и выводы

1. Сравнение каскадов:



- **ОИ:** Максимальное усиление по напряжению, высокое $r_{BX}r_{BX}$.
- **ОС:** Единичное усиление, низкое $r_{ВХ}r_{ВХ}$, применяется для согласования.
- **ОЗ:** Низкое $r_{BX}r_{BX}$, ограниченное применение.

2. Влияние элементов схемы:

- R_3R_3 определяет $r_{BX}r_{BX}$.
- $RCRC$ и SS влияют на $KUKU$.
- Конденсаторы задают АЧХ в НЧ и ВЧ областях.

Контрольные вопросы:

1. Объясните роль резистора $R_{II}R_{II}$ в схеме ОИ.
2. Почему в каскаде ОС коэффициент усиления близок к 1?

3. Как эффект Миллера влияет на работу усилителя?

Лабораторная работа №12 Основы работы и статические характеристики дифференциального каскада на биполярных транзисторах

Цель работы:

Изучить принцип действия, статические характеристики и параметры дифференциального каскада на биполярных транзисторах (БТ), а также его основные свойства и применение в аналоговых схемах.

Теоретическое обоснование

1. Дифференциальный каскад: назначение и структура

Дифференциальный каскад (ДК) – это двухтактный усилительный каскад, построенный на паре биполярных транзисторов, работающих в режиме усиления разности входных сигналов. Основные области применения:

- операционные усилители (ОУ),
- аналоговые компараторы,
- входные каскады усилителей низкой частоты (УНЧ),
- схемы с высокой помехоустойчивостью.

Структурная схема ДК включает:

- два идентичных транзистора ($VT1$ и $VT2$),
- общий источник тока (I_0),
- симметричную нагрузку (R_{k1} , R_{k2}),
- два входа ($U_{вх1}$, $U_{вх2}$) и выходы ($U_{вых1}$, $U_{вых2}$).

2. Принцип работы дифференциального каскада

ДК усиливает **разностный сигнал** ($U_{вх1} - U_{вх2}$) и подавляет **синфазный сигнал** (одинаковый на обоих входах).

- **Дифференциальный (разностный) режим:**

Если на входы поданы противофазные сигналы ($U_{вх1} = -U_{вх2}$), токи транзисторов изменяются в противофазе, а выходное напряжение пропорционально разности входных сигналов:

$$U_{вых} = K_{диф} \cdot (U_{вх1} - U_{вх2}), U_{вых} = K_{диф} \cdot (U_{вх1} - U_{вх2}),$$

где $K_{диф}$ – коэффициент усиления дифференциального сигнала.

- **Синфазный режим:**

Если на оба входа подаётся одинаковый сигнал ($U_{вх1} = U_{вх2}$), изменения токов транзисторов компенсируются, и выходной сигнал стремится к нулю (идеальный случай). В реальных схемах небольшой синфазный сигнал может присутствовать из-за неидеальности элементов.

3. Статические характеристики ДК

3.1. Входные и выходные характеристики

- **Входная характеристика** – зависимость тока базы (I_b) от напряжения база-эмиттер ($U_{бэ}$) для каждого транзистора.
- **Выходная характеристика** – зависимость тока коллектора (I_k) от напряжения коллектор-эмиттер ($U_{кэ}$) при фиксированном токе базы.

3.2. Коэффициенты усиления

- **Дифференциальный коэффициент усиления ($K_{диф}$)** – отношение изменения выходного напряжения к изменению разности входных напряжений:

$$K_{диф} = \Delta U_{вых} / \Delta (U_{вх1} - U_{вх2}). K_{диф} = \Delta (U_{вх1} - U_{вх2}) / \Delta U_{вых}.$$

Для симметричного ДК:

$$K_{\text{диф}} = \beta \cdot R_k r_{бэ} + (1 + \beta) \cdot r_э, K_{\text{диф}} = r_{бэ} + (1 + \beta) \cdot r_э \beta \cdot R_k,$$

где:

- β – коэффициент усиления по току транзистора,
 - $r_{бэ}$ – сопротивление база-эмиттер,
 - $r_э$ – сопротивление эмиттера.
- **Коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС)** – отношение коэффициента усиления дифференциального сигнала к коэффициенту усиления синфазного сигнала:

$$КОСС = \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{сф}}}$$

Чем выше КОСС, тем лучше каскад подавляет помехи.

3.3. Статический режим работы (по постоянному току)

В отсутствие входного сигнала ($U_{вх1} = U_{вх2} = 0$) транзисторы работают в активном режиме, токи коллекторов равны:

$$I_{к1} = I_{к2} = I_0, I_{к1} = I_{к2} = 2I_0,$$

где I_0 – ток источника стабилизации.

4. Влияние параметров транзисторов на работу ДК

- **Неидентичность транзисторов** приводит к разбалансу токов и появлению синфазной составляющей на выходе.
- **Температурная нестабильность** может вызывать дрейф нуля (изменение выходного напряжения при отсутствии входного сигнала).
- **Сопротивление нагрузки** влияет на коэффициент усиления и выходное напряжение.

5. Достоинства и недостатки ДК

Достоинства	Недостатки
Высокая помехоустойчивость	Требует точной симметрии транзисторов
Хорошая температурная стабильность	Сложность настройки
Возможность работы с малыми сигналами	Зависимость от качества источника тока

Выводы

1. Дифференциальный каскад усиливает разность входных сигналов и подавляет синфазные помехи.
2. Основные статические характеристики ДК включают коэффициенты усиления, входные и выходные параметры.
3. Качество работы ДК зависит от идентичности транзисторов, стабильности источника тока и сопротивления нагрузки.

Вопросы для защиты работы

1. Объясните принцип работы дифференциального каскада.
2. Какие параметры характеризуют статический режим ДК?
3. Как рассчитывается дифференциальный коэффициент усиления?
4. Почему ДК эффективно подавляет синфазные сигналы?
5. Какие факторы влияют на стабильность работы ДК?

Лабораторная работа №13 Исследование дифференциального каскада на биполярных транзисторах

Цель работы

Экспериментальное изучение передаточных характеристик, параметров и методов измерения дифференциальных каскадов (ДК) на биполярных

транзисторах. Исследование влияния симметрии схемы, синфазных и дифференциальных сигналов на работу каскада, а также оценка эффективности применения токовых зеркал.

Теоретическая часть

1. Принцип действия дифференциального каскада

Дифференциальный каскад состоит из двух идентичных транзисторных усилителей с общим эмиттерным резистором $R_{ЭЭ}$. Ключевые особенности:

- **Симметричность:** $R_{K1}=R_{K2}=R_K$, транзисторы VT_1 и VT_2 подобраны с близкими параметрами.
- **Двухполярное питание:** Источники E_1 и E_2 обеспечивают работу в активном режиме.
- **Балансировка:** При $U_{BX1}=U_{BX2}=0$ выходное напряжение $U_{ВЫХ}=U_{ВЫХ1}-U_{ВЫХ2}=0$ (сбалансированный мост).

Режим покоя:

- Ток через $R_{ЭЭ}$:

$$I_{ЭЭ}=E_2-U_{БЭ}R_{ЭЭ}, I_{ЭЭ}=R_{ЭЭ}E_2-U_{БЭ},$$

$$\text{где } U_{БЭ} \approx 0.6-0.8 \text{ В}$$

- Коллекторные токи:

$$I_{K1}=I_{K2}=\alpha I_{ЭЭ} \approx E_2-U_{БЭ}2R_{ЭЭ}. I_{K1}=I_{K2}=\alpha I_{ЭЭ} \approx 2R_{ЭЭ}E_2-U_{БЭ}.$$

2. Реакция на входные сигналы

- **Дифференциальный сигнал** ($U_{BX1}=-U_{BX2}$):

Вызывает противофазные изменения токов I_{K1} и I_{K2} . Выходное напряжение:

$$U_{ВЫХ}=-2\Delta I_{K}R_K.$$

- **Синфазный сигнал** ($UBX1=UBX2$, $UBX1=UBX2$):

В идеально симметричном каскаде $UB_{IX}=0$, $UB_{IX}=0$ благодаря компенсации изменений токов.

3. Основные параметры ДК

1. Коэффициенты усиления:

- Дифференциальный сигнал (симметричный выход):

$$KDSS=UB_{IX}/UB_X, KDSS=UB_X/UB_{IX}.$$

- Синфазный сигнал:

$$KS=UB_{IX}/UB_X \text{ СФ}, KS=UB_X \text{ СФ}/UB_{IX}.$$

2. Коэффициент ослабления синфазного сигнала:

$$KOC_{\text{СФ}}=20\lg_{f_0}(KD/KS) \text{ [дБ]}, KOC_{\text{СФ}}=20\lg(KS/KD) \text{ [дБ]}.$$

3. Входное сопротивление:

- Для дифференциального сигнала: $r_{BX} \approx 2\beta r_{\text{Э}}$, $r_{BX} \approx 2\beta r_{\text{Э}}$,
где $r_{\text{Э}}=25 \text{ мВ}$, $r_{\text{Э}}=I_{\text{Э}}/25 \text{ мВ}$.

4. Улучшение параметров ДК

- **Источник тока в эмиттерной цепи:** Заменяет $R_{\text{Э}}$, увеличивая $KOC_{\text{СФ}}$ за счет высокого выходного сопротивления.
- **Токовое зеркало в коллекторной цепи:** Повышает коэффициент усиления, используя высокое дифференциальное сопротивление активной нагрузки.

Экспериментальная часть

1. Исследование ДК с резистором $R_{\text{Э}}$

Оборудование:

- Программа *Electronics Workbench*.
- Транзисторы (тип из табл. 7, например, BC107).
- Резисторы: $R_K=10\text{ кОм}$, $R_{\Sigma}=5\text{ кОм}$.
- Источники питания: $E_1=+15\text{ В}$, $E_2=-15\text{ В}$.

Порядок выполнения:

1. Снятие передаточных характеристик:

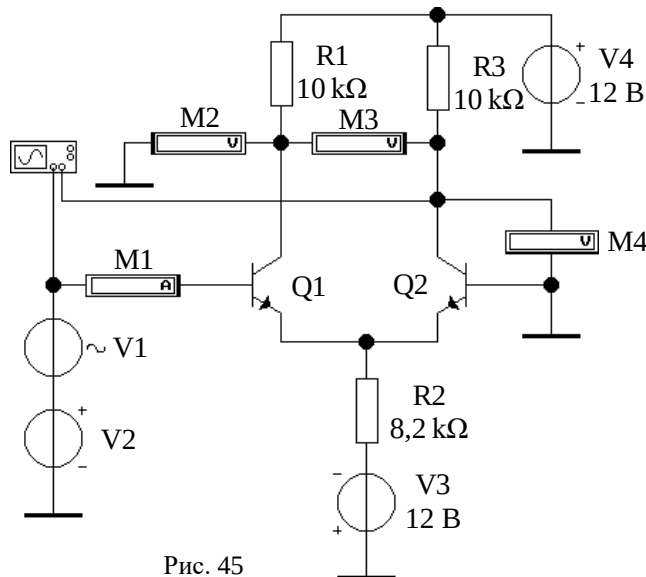


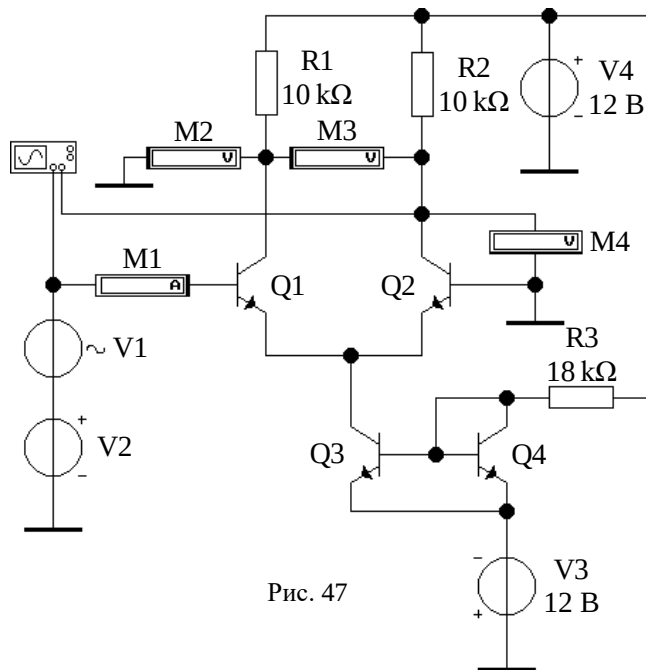
Рис. 45

- Подать U_{BX1} в диапазоне $\pm 200\text{ мВ}$ (шаг 20 мВ).
- Зафиксировать U_{BYX1} , U_{BYX2} , U_{BYX} (вольтметры M2–M4).
- Построить графики $U_{BYX}=f(U_{BX1})$.

2. Измерение коэффициентов усиления:

- Подать синусоидальный сигнал 1 кГц , 5 мВ на VT1.
- Измерить $K_{D12}=U_{BYX2}/U_{BX1}$ и $K_{D1S}=U_{BYX}/U_{BX1}$.

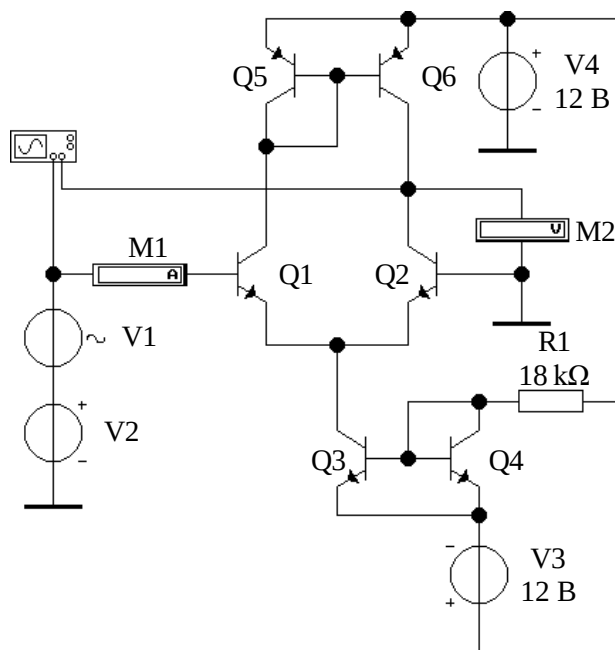
3. Определение КОС.СФКОС.СФ:



- Подать синфазный сигнал 1 кГц, 5 мВ.
- Рассчитать $KS=UB_{YX2} UB_X \text{ СФ } KS=UB_X \text{ СФ } UB_{YX2}$,
затем $KOC.СФ KOC.СФ$.

2. Исследование ДК с токовым зеркалом

1. Схема с активной нагрузкой:



- Использовать транзисторы Q5Q5, Q6Q6 (тип QPL).
- Снять характеристику $U_{BIX2}=f(U_{BX1})$ при $U_{BX1}=\pm 20$ мВ.

2. Измерение $K_{D12KD12}$ при $f=1$ кГц $f=1$ кГц, $U_{BX1} = 0.5$ мВ $U_{BX1} = 0.5$ мВ.

Результаты и выводы

1. Сравнение каскадов:

- С резистором $R_{ЭРЭ}$: Низкое $K_{OC.CФKOC.CФ}$ (20–40 дБ), линейная характеристика.
- С токовым зеркалом: $K_{OC.CФ} > 60$ дБ $K_{OC.CФ} > 60$ дБ, повышенное усиление за счет активной нагрузки.

2. Влияние симметрии: Нарушение баланса приводит к дрейфу нуля и снижению подавления синфазных помех.

Контрольные вопросы:

1. Объясните, почему ДК не усиливает синфазные сигналы в идеальном случае.
2. Как токовое зеркало повышает $K_{OC.CФKOC.CФ}$?
3. Почему для измерения g_{BXrBX} используют малые входные сигналы?

Лабораторная работа №14 Исследование характеристик и параметров операционного усилителя

Цель работы

Экспериментальное изучение передаточных характеристик, параметров и методов измерения операционных усилителей (ОУ). Определение коэффициента усиления, напряжения смещения, входных токов и других ключевых параметров ОУ.

Теоретическая часть

1. Основные свойства операционных усилителей

Операционный усилитель — это интегральная микросхема, обладающая:

- **Высоким коэффициентом усиления** ($K_U = 10^4\text{--}10^6$);
- **Большим входным сопротивлением** ($r_{BX} = 10^5\text{--}10^{12} \text{ Ом}$);
- **Низким выходным сопротивлением** ($r_{ВЫХ} = 10\text{--}1000 \text{ Ом}$).

Структурная схема ОУ (рис. 50):

1. Входной дифференциальный каскад (ДУ):

- Обеспечивает подавление синфазных помех.
- Использует составные транзисторы или полевые структуры для увеличения r_{BX} .

2. Промежуточный усилитель напряжения (УН):

- Дает основное усиление сигнала.

3. Выходной усилитель мощности (УМ):

- Реализован по двухтактной схеме для минимизации искажений.

2. Передаточные характеристики

Зависимость выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ от входного $U_{ВХ}$:

- **Линейный участок:** $U_{ВЫХ} = K_U \cdot U_{ВХ}$
- **Насыщение:** При $U_{ВХ} > U_{ВХ.МАКС}$ выходное напряжение ограничивается значениями $\pm U_{ВЫХ.МАКС}$, близкими к напряжениям питания.

Напряжение смещения $U_{СМ}$ — напряжение на входе, необходимое для нулевого выходного сигнала. Возникает из-за неидеальности транзисторов ДУ.

3. Важнейшие параметры ОУ

1. Коэффициент усиления K_U :

$$K_U = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ} \quad K_U = \Delta U_{ВХ} / \Delta U_{ВЫХ}$$

2. **Коэффициент ослабления синфазного сигнала КОС.СФКОС.СФ:**

$$\text{КОС.СФ} = 20 \lg_{f_0} (K_{\text{У.СФ}}) [\text{дБ}], \text{КОС.СФ} = 20 \lg (K_{\text{У.СФ}} K_{\text{У}}) [\text{дБ}].$$

3. **Входной ток $I_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}}$:** Среднее значение токов инвертирующего и неинвертирующего входов.

4. **Скорость нарастания :** Максимальная скорость изменения выходного напряжения (В/мкс).

Экспериментальная часть

1. Исследование параметров ОУ

Оборудование:

- Программа *Electronics Workbench*.
- ОУ типа LM101–LM158 (табл. 8).
- Источники питания: $V_4 = +15 \text{ В}$, $V_5 = -15 \text{ В}$.

Порядок выполнения:

1. Измерение входного тока:

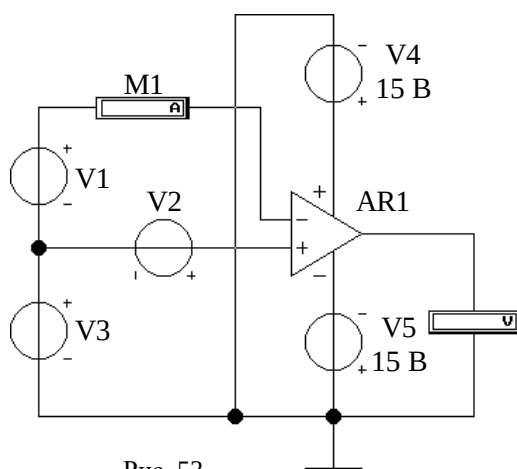


Рис. 53

- Установить $V_1 = V_2 = V_3 = 0$.
 - Зафиксировать показания амперметра M_1 ($I_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}}$).
- ##### 2. Снятие передаточных характеристик:
- **Инвертирующий вход:** Подать $U_{\text{ВХ1}}$ от -500 мВ до $+500 \text{ мВ}$ (шаг 50 мВ), измерить $U_{\text{ВЫХ}}$ (M_2).

- **Неинвертирующий вход:** Аналогично для $UBX2UBX2$.

3. Определение $UCMUCM$):

- Балансировка: Подбором $UBX2UBX2$ добиться $UBYX=0UBYX=0$.

4. Расчет $KUKU$ и $KOC.CФKOC.CФ$):

- Для $KUKU$: Подать $\Delta UBX1\Delta UBX1$, при котором $\Delta UBYX\approx 1 В\Delta UBYX\approx 1 В$.
- Для $KOC.CФKOC.CФ$: Подать синфазный сигнал $\Delta UBX.CФ=\Delta UBX1\Delta UBX.CФ=\Delta UBX1$, измерить $\Delta UBYX\Delta UBYX$.

Результаты и выводы

1. Передаточные характеристики:

- Линейный участок подтверждает высокий $KUKU$.
- Насыщение соответствует $\pm UBYX.МАКС\pm UBYX.МАКС$.

2. Параметры ОУ:

- Типовые значения: $KU\approx 105KU\approx 105$, $KOC.CФ>80 дБКOC.CФ>80 дБ$.
- $UCMUCM$ для разных ОУ варьируется от 1 мкВ до 10 мВ.

3. Влияние неидеальностей:

- Конечный $rBХrBХ$ и $IBХIBХ$ приводят к погрешностям в точных схемах.

Контрольные вопросы:

1. Почему ДУ используется во входном каскаде ОУ?
2. Как $KOC.CФKOC.CФ$ влияет на помехоустойчивость?
3. Объясните физический смысл скорости нарастания.

Лабораторная работа №15 Исследование линейных устройств на операционных усилителях

Цель работы

Экспериментальное изучение характеристик и параметров основных схем включения операционных усилителей (ОУ): инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей. Определение коэффициентов усиления, исследование влияния входных токов и синфазных сигналов.

Теоретическая часть

1. Инвертирующий усилитель

Схема:

- Входной сигнал подается через резистор R_1 на инвертирующий вход.
- Отрицательная обратная связь через R_2 .
- **Коэффициент усиления:**
$$K_U = -R_2/R_1$$

Знак "-" указывает на инверсию фазы сигнала.

Виртуальный ноль: Потенциал инвертирующего входа близок к нулю благодаря глубокой ООС, что позволяет считать $U_{-} \approx 0$.

Влияние входных токов:

- Нескомпенсированные входные токи $I_{BX.И}$ и $I_{BX.Н}$ вызывают напряжение смещения:
$$U_{CM} = \Delta I_{BX} \cdot (R_1 \parallel R_2)$$

- Для компенсации в неинвертирующий вход включают резистор $R_K = R_1 \parallel R_2$ (рис. 55).

2. Неинвертирующий усилитель

Схема:

- Сигнал подается на неинвертирующий вход.
- ООС через делитель R_1, R_2 .
- **Коэффициент усиления:**
 $K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$
- **Повторитель напряжения** (рис. 57): Частный случай при $R_2 = 0, R_1 = \infty$.

3. Дифференциальный усилитель

Схема:

- Реализует операцию вычитания:
 $U_{ВЫХ} = -\frac{R_2}{R_1}(U_{ВХ1} - U_{ВХ2})$
- Условие симметрии: $R_1 = R_3, R_2 = R_4$.
- **Недостатки:**
 - Разные входные сопротивления ($r_{ВХ1} = R_1, r_{ВХ2} = R_3 + R_4$).
 - Чувствительность к синфазным помехам.

Экспериментальная часть

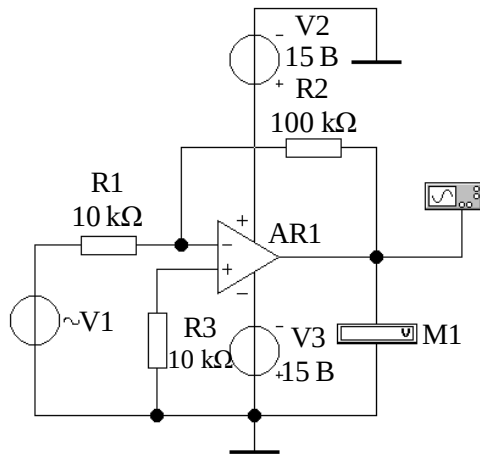
1. Исследование инвертирующего усилителя

Оборудование:

- Программа *Electronics Workbench*.

- ОУ типа LM101–LM158.
- Резисторы: $R_1=1\text{ кОм}$, $R_2=10\text{ кОм}$, $R_3=10\text{ кОм}$.

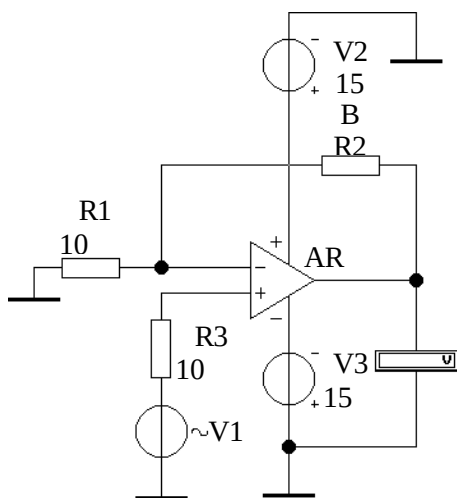
Порядок выполнения:



1. Подать синусоидальный сигнал $U_{BX}=500\text{ мВ}$, $f=1\text{ кГц}$.
2. Измерить $U_{ВХ}$ вольтметром M1.
3. Рассчитать $KU=U_{ВХ}/U_{ВХ}$, сравнить с теоретическим значением.
4. Проверить отсутствие искажений осциллографом.

2. Исследование неинвертирующего усилителя

Схема:

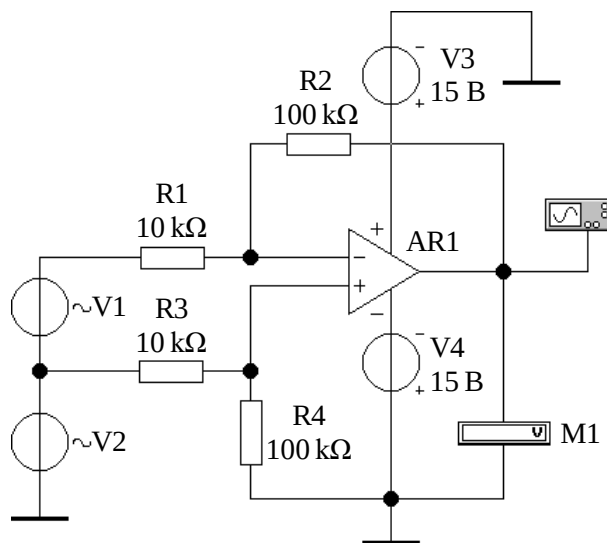


1. Подать $U_{BX}=500\text{ мВ}$.

2. Измерить $U_{ВХ}U_{ВХ}$, вычислить $K_{U.K.U}$.
3. Убедиться в совпадении фазы входного и выходного сигналов.

3. Исследование дифференциального усилителя

Схема:



1. Дифференциальный сигнал:

- Подать $U_{ВХ1}=500\text{ мВ}$, $U_{ВХ2}=0$.
- Измерить $U_{ВХ}U_{ВХ}$, вычислить $K_{U.K.U}$.

2. Синфазный сигнал:

- Подать $U_{ВХ1}=U_{ВХ2}=500\text{ мВ}$.
- Измерить $U_{ВХ}U_{ВХ}$, рассчитать $K_{U.СФ}K_{U.СФ}$.

3. Коэффициент ослабления:

$$K_{\text{ос.сф}} = 20 \lg \left(\frac{K_U}{K_{U.\text{сф}}} \right)$$

Результаты и выводы

1. Инвертирующий усилитель:

- Теоретический $K_U=-10$, экспериментальный — близок к расчетному.
- Наблюдается инверсия фазы.

2. Неинвертирующий усилитель:

- $K_U=11$ (при $R_2/R_1=10$).
- Высокое входное сопротивление.

3. Дифференциальный усилитель:

- $K_{OC.C\Phi} \approx 60-80$ дБ для ОУ общего назначения.
- Подтверждена способность подавлять синфазные помехи.

Контрольные вопросы:

1. Почему в инвертирующем усилителе возникает виртуальный ноль?
2. Как влияет резистор R_K на точность схем?
3. Чем отличается повторитель напряжения от неинвертирующего усилителя?

Лабораторная работа №16 Исследование триггеров

Цель работы

Экспериментальное изучение принципов работы различных типов триггеров: RS-, D- и JK-типов. Исследование их характеристик, таблиц переходов и особенностей функционирования в синхронном и асинхронном режимах.

Теоретическая часть

1. Общие сведения о триггерах

Триггер — электронное устройство с двумя устойчивыми состояниями, используемое для хранения одного бита информации. Основные классификационные признаки:

1. По способу управления:

- **Асинхронные:** Реагируют на входные сигналы немедленно.

- **Синхронные:** Переключаются только при наличии тактового импульса.

2. По типу входа:

- **Статические:** Активируются уровнем сигнала (0 или 1).
- **Динамические:** Срабатывают по фронту (переходу $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$).

3. По функциональности:

- **RS-триггер:** Имеет входы Set (S) и Reset (R).
- **D-триггер:** Запоминает состояние входа D при тактировании.
- **JK-триггер:** Универсальный, сочетает свойства RS- и T-триггеров.

2. Принцип работы основных типов триггеров

1. Асинхронный RS-триггер на элементах И-НЕ:

- **Запрещенная комбинация:** $S = R = 0 \rightarrow Q = \bar{Q} = 1$.
- **Таблица переходов:**

S	R	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0/1	Запрещено
0	1	X	0
1	0	X	1
1	1	X	Q_n

2. Синхронный D-триггер:

- При $C = 1$ копирует состояние входа D на выход Q.
- **Уравнение:** $Q_{n+1} = D$ при активном тактовом сигнале.

3. Двухступенчатый JK-триггер:

- Исключает "гонки" за счет разделения записи и чтения.
- **Режимы:**

- $J = K = 0$: Хранение.
- $J \neq K$: Установка 0 или 1.
- $J = K = 1$: Инверсия состояния.

Экспериментальная часть

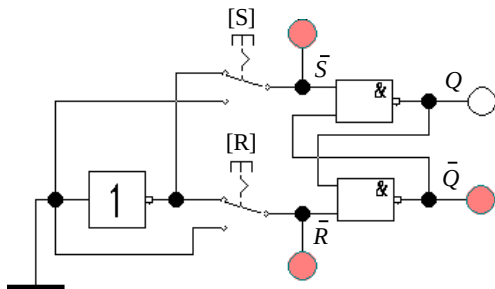
1. Исследование асинхронного RS-триггера

Оборудование:

- Логические элементы И-НЕ (74LS00 в Electronics Workbench).
- Переключатели S, R (клавиши клавиатуры).
- Индикаторы (Red Probe) для Q и $\bar{Q}$.

Порядок выполнения:

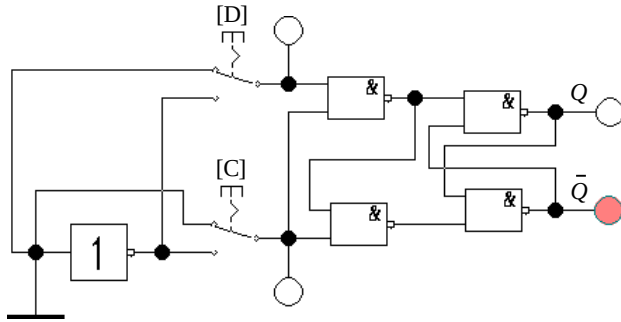
1. Собрать схему.



2. Подавать комбинации сигналов S и R, фиксируя состояния Q и $\bar{Q}$.
3. Заполнить таблицу переходов, учитывая запрещенный режим.

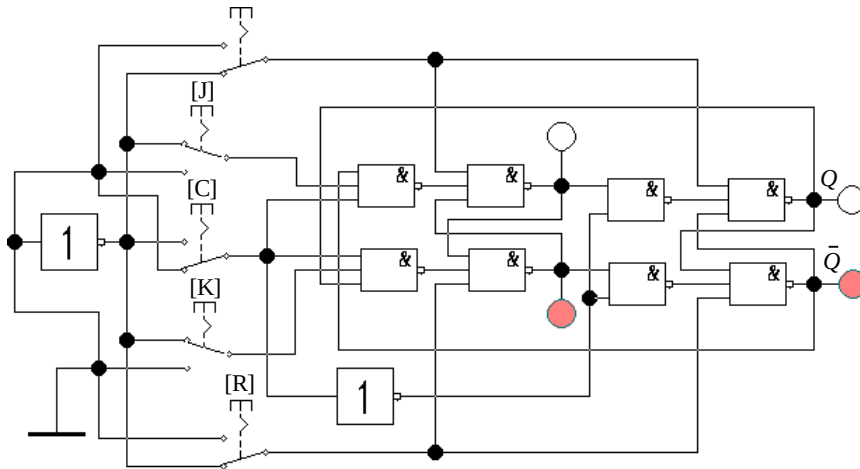
2. Анализ синхронного D-триггера

Схема:



1. Подавать сигналы D при $C = 1$.
2. Проверить реакцию на фронт и срез тактового импульса.
3. Построить временные диаграммы.

3. Исследование JK-триггера



Ключевые эксперименты:

1. Проверить асинхронные входы S и R (приоритетная установка).
2. Изучить работу при $J = K = 1$ (режим счета).
3. Сравнить с одноступенчатой версией.

Результаты и выводы

1. RS-триггер:

- Подтверждена запрещенная комбинация $S = R = 0$.
- В реальных устройствах после запрещенного состояния триггер устанавливается в 0 или 1 случайным образом.

2. D-триггер:

- Надежно запоминает данные только при активном тактовом сигнале.
- Динамическое управление предотвращает ложные срабатывания.

3. JK-триггер:

- Универсальность: реализует все режимы (хранение, установка, инверсия).
- Двухступенчатая структура исключает нестабильность.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличается статический вход от динамического?
2. Почему в JK-триггере нет запрещенной комбинации?
3. Как двухступенчатая архитектура улучшает надежность?

Лабораторная работа №17 Исследование счетчиков

Цель работы

Экспериментальное изучение принципов построения, характеристик и параметров различных типов счетчиков: асинхронных (суммирующего, вычитающего, реверсивного) и синхронного. Приобретение практических навыков анализа их работы с помощью таблиц состояний и временных диаграмм.

Теоретическая часть

1. Классификация счетчиков

1. По направлению счета:

- **Суммирующие:** Увеличивают значение на 1 с каждым импульсом ($000 \rightarrow 001 \rightarrow 010 \rightarrow \dots$).
- **Вычитающие:** Уменьшают значение на 1 ($111 \rightarrow 110 \rightarrow 101 \rightarrow \dots$).

- **Реверсивные:** Поддерживают оба режима (управляется отдельным входом).

2. По способу организации:

- **Асинхронные:** Триггеры переключаются последовательно, с задержкой.
- **Синхронные:** Все триггеры тактируются одновременно.

3. По модулю счета:

- Двоичные (модуль 2^n), десятичные (модуль 10), произвольные.

2. Принципы работы

1. Асинхронный суммирующий счетчик:

- Каждый последующий триггер тактируется перепадом сигнала с предыдущего.
- Накопление задержек ограничивает максимальную частоту.

2. Синхронный счетчик:

- Использует комбинационную логику для определения условий переключения.
- Быстродействие выше, так как все триггеры переключаются одновременно.

3. Ключевые параметры

- **Модуль счета (N):** Количество уникальных состояний (для 3-разрядного двоичного $N=8$).
- **Максимальная частота:** Обратно пропорциональна времени переключения триггеров.

Экспериментальная часть

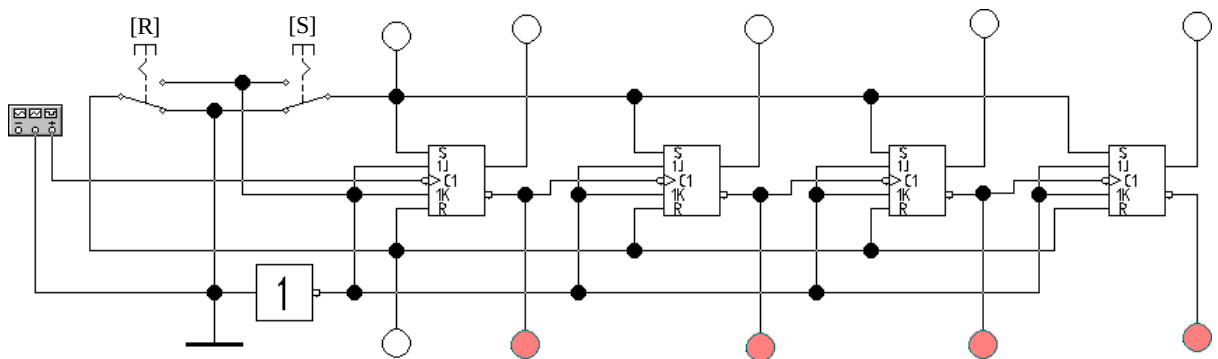
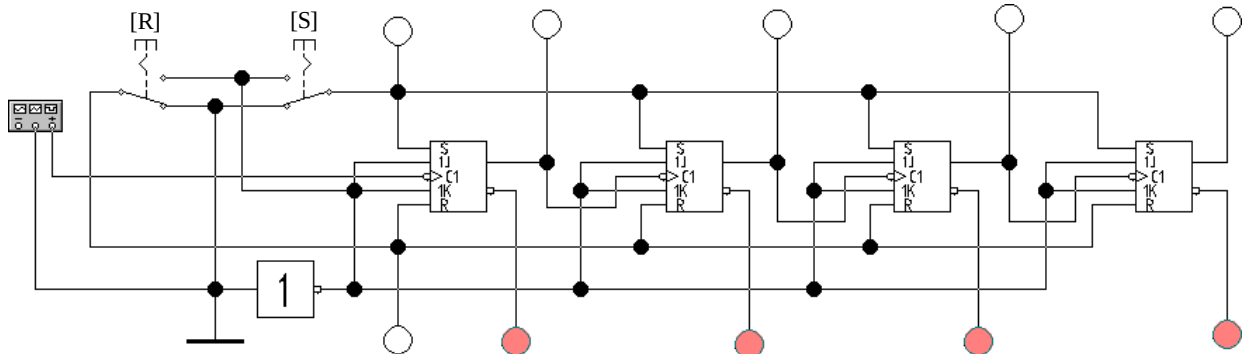
1. Исследование асинхронного суммирующего счетчика

Оборудование:

- JK-триггеры (74LS73 в Electronics Workbench).

- Генератор импульсов (1 кГц, 5 В).
- Логические пробники для индикации состояний $Q_2Q_1Q_0$.

Порядок выполнения:



1. Собрать схему.
2. Подать сигнал сброса ($R=0$), затем установить $R=1$.
3. Подавать импульсы с генератора, фиксируя состояния триггеров.
4. Построить таблицу состояний и временную диаграмму.

Пример таблицы для 3-разрядного счетчика:

Импульс	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0

Импульс	Q ₂	Q ₁	Q ₀
...	...	...	...
7	1	1	1
8	0	0	0

2. Анализ реверсивного счетчика

Особенности:

- Управляющий вход U/D (Up/Down) переключает режимы.
- В режиме вычитания используется инверсный выход предыдущего триггера для тактирования.

Проверка:

1. Установить U/D=1 (суммирование), проверить счет.
2. Переключить U/D=0 (вычитание), убедиться в обратной последовательности.

3. Сравнение с синхронным счетчиком

Критерии:

- Задержка распространения (асинхронный: $\sim 3t_p$ на разряд, синхронный: t_p).
- Максимальная частота: Для синхронного выше в 2–3 раза.

Результаты и выводы

1. Асинхронные счетчики:

- Простота конструкции, но низкое быстродействие.
- Накопление задержек приводит к "размыванию" фронтов на высоких частотах.

2. Синхронные счетчики:

- Сложнее в реализации, но обеспечивают стабильную работу на высоких частотах.

3. Реверсивные счетчики:

- Гибкость применения (например, в микропроцессорных системах для адресации).

Контрольные вопросы:

1. Почему в асинхронных счетчиках ограничена максимальная частота?
2. Как синхронная организация повышает быстродействие?
3. Где применяются декадные счетчики?

Лабораторная работа №18 Исследование регистров

Цель работы

Экспериментальное изучение принципов построения и функционирования различных типов регистров: сдвиговых, реверсивных, параллельных и их преобразований в счетчики специального типа.

Теоретическая часть

1. Классификация регистров

1. По способу обработки данных:

- **Регистры памяти:** Хранение данных в параллельном коде (например, 74LS173).
- **Регистры сдвига:** Последовательная обработка битов (74LS194).

2. По направлению сдвига:

- **Однонаправленные:** Только вправо или влево.
- **Реверсивные:** Управляемое направление (вход U/D).

3. По способу загрузки:

- Последовательные (SISO, SIPO).
- Параллельные (PIPO).
- Комбинированные (PISO).

2. Принципы работы

Экспериментальная часть

1. Регистр сдвига на D-триггерах:

- Каждый триггер передает данные следующему по фронту тактового импульса.
- Время задержки: $n \cdot t_p$, где n – разрядность, t_p – задержка одного триггера.

2. Реверсивный регистр:

- Использует мультиплексоры для выбора направления ($Q_{n-1} \rightarrow Q_n$ или $Q_{n+1} \rightarrow Q_n$).

3. Кольцевой счетчик:

- Замкнутая цепь триггеров (последний соединен с первым).
- Применяется для создания последовательностей управляющих сигналов.

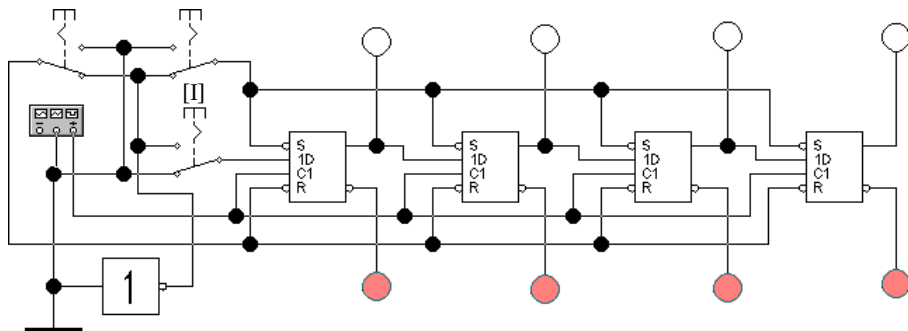
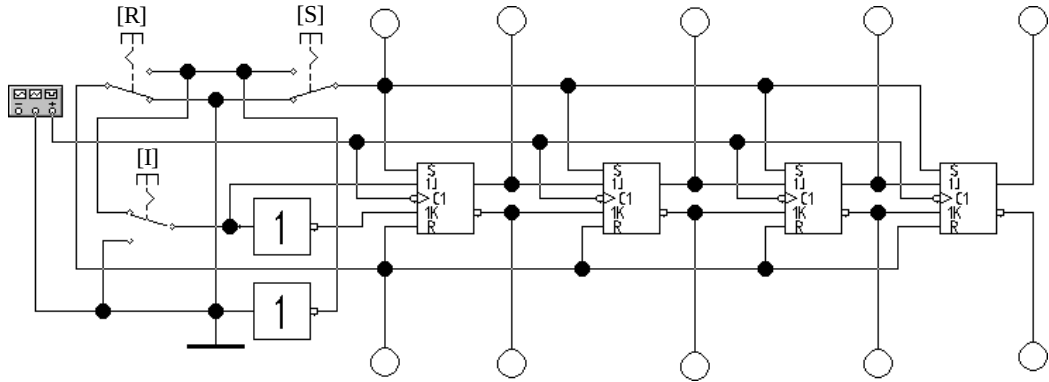
1. Исследование 4-разрядного регистра сдвига

Оборудование:

- D-триггеры (74LS74) или JK-триггеры (74LS73).
- Генератор импульсов (1 кГц, 5 В).
- Логические пробники для индикации состояний $Q_3Q_2Q_1Q_0$.

Порядок выполнения:

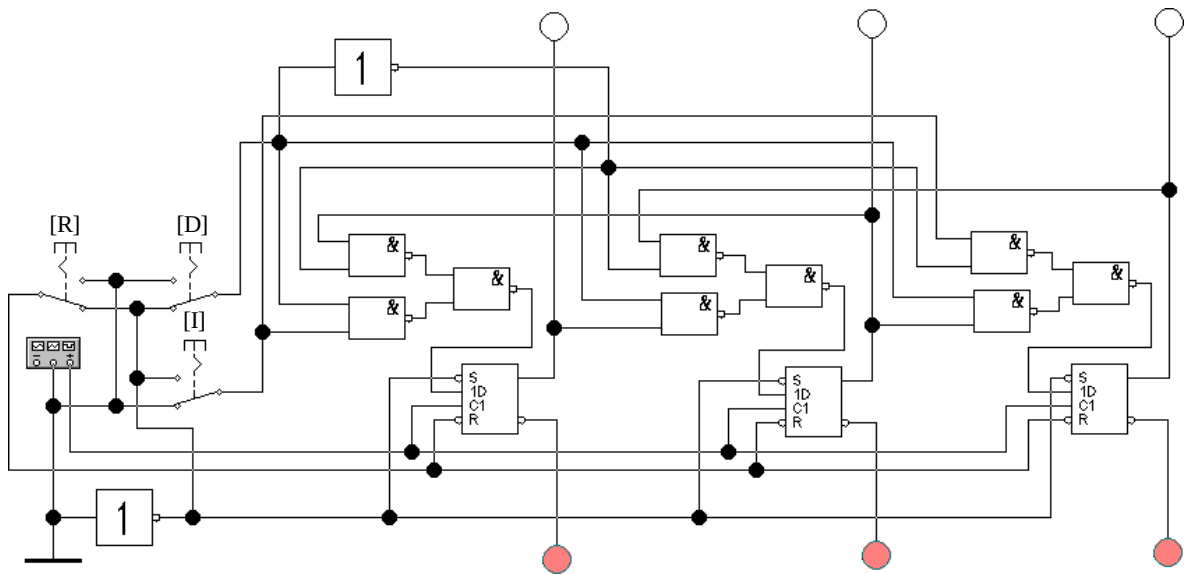
- Собрать схему (для JK-триггеров или для D-триггеров).



1. Подать сигнал сброса ($R=0$), затем установить $R=1$.
2. Подавать последовательные данные (0 или 1) и тактовые импульсы.
3. Зафиксировать состояния выходов:

Такт	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
...	...	...	...	...

2. Анализ реверсивного регистра

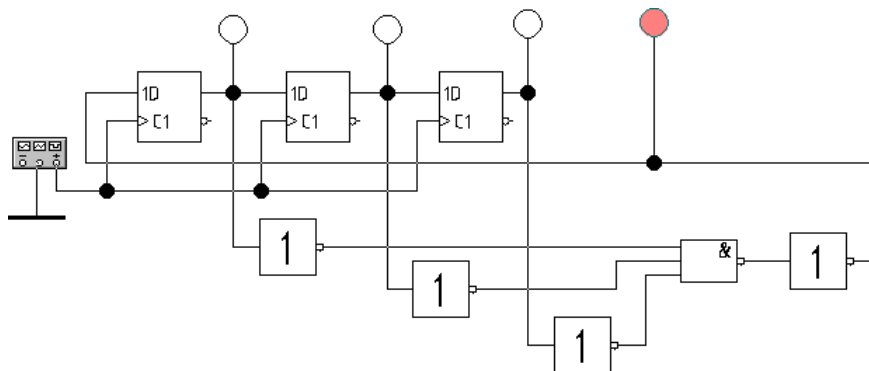


Ключевые шаги:

1. Установить направление сдвига ($D=0$ – вправо, $D=1$ – влево).
2. Подать тестовую последовательность (например, 0001).
3. Проверить сдвиг данных в выбранном направлении.

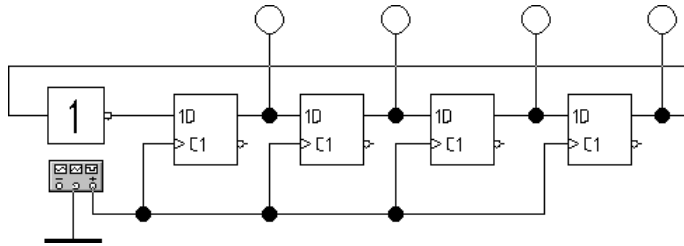
3. Преобразование в счетчики

1. Кольцевой счетчик:



- Замкнуть выход Q_3 на вход D_0 .
- Наблюдать циклическую последовательность (1000→0100→0010→0001→...).

2. Счетчик Джонсона:



- Инвертировать выход Q_3 и подать на D_0 .
- Получить последовательность:
 $0000 \rightarrow 1000 \rightarrow 1100 \rightarrow 1110 \rightarrow 1111 \rightarrow 0111 \rightarrow \dots \rightarrow 0000$.

Результаты и выводы

1. Регистры сдвига:

- Обеспечивают задержку данных на n тактов (n – разрядность).
- Применяются для преобразования последовательного кода в параллельный и обратно.

2. Реверсивные регистры:

- Гибкость управления потоком данных в процессорных системах.

3. Счетчики:

- Кольцевой: Простота, но неэффективное использование состояний (N из 2^n).
- Джонсона: Всего $2n$ уникальных состояний, высокая помехоустойчивость.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличается регистр памяти от регистра сдвига?
2. Как организуется реверсивный сдвиг в регистре на D-триггерах?
3. Почему счетчик Джонсона называют "ползучим" (twisted ring)?

Список литературы

Основная литература:

1. Миленина, С. А. Электротехника, электроника и схемотехника : учебник для вузов / С. А. Миленина, Н. К. Миленин ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 450 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-19750-1.
2. Миленина, С. А. Электроника и схемотехника : учебник и практикум для вузов / С. А. Миленина ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 277 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-19817-1.
3. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Интегральные схемы : учебник для вузов / под редакцией Ю. В. Гуляева. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 460 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-03170-6.
4. Новожилов, О. П. Электроника и схемотехника в 2 ч. Часть 1 : учебник для вузов / О. П. Новожилов. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 382 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-03513-1.
5. Новожилов, О. П. Электроника и схемотехника в 2 ч. Часть 2 : учебник для вузов / О. П. Новожилов. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 421 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-03515-5.

Дополнительной литература:

1. Алехин, В. А. Электротехника, электроника и схемотехника. Лабораторный практикум в облачной среде схемотехнического проектирования TINACloud : учебное пособие / В. А. Алехин. — Москва : Горячая линия-Телеком, 2022. — 216 с. — ISBN 978-5-9912-0631-0.
2. Алехин В. А. Электроника и схемотехника. Конспект лекций с использованием компьютерного моделирования в среде «Tina-Ti» : мультимедийное электронное учебное пособие / Алехин В. А. - Вузовское образование, 2017. - ISBN 978-5-4487-0002-6.
3. Электроника и схемотехника. Лабораторный практикум : учебное пособие / А. Ю. Грищенко, В. А. Горошков, С. А. Арустамов, А. Г. Коробейников. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2024. — 111 с.
4. Миловзоров, О. В. Основы электроники : учебник для среднего профессионального образования / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. — 8-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 397 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-19968-0.
5. Савиных В. Л. Электроника и схемотехника : методические указания к лабораторным работам / Савиных В. Л. - Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2020.